



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

**Escola d'Enginyeria de Telecomunicació  
i Aeroespacial de Castelldefels**

# **TREBALL DE FI DE CARRERA**

**TÍTULO DEL TFC : Estudio de Ground Delay Programs y de estrategias de reducción de velocidad**

**TITULACIÓN: Enginyeria Tècnica Aeronàutica, especialitat Aeronavegació**

**AUTOR: Marc Melgosa Farrés**

**DIRECTORES: Luis Delgado Muñoz  
Xavier Prats Menéndez**

**DATA: 5 de julio de 2012**





**Título :** Estudio de Ground Delay Programs y de estrategias de reducción de velocidad

**Autor:** Marc Melgosa Farrés

**Directores:** Luis Delgado Muñoz  
Xavier Prats Menéndez

**Data:** 5 de julio de 2012

## Resumen

En este trabajo se han estudiado los conceptos de Ground Delay Program (GDP) y de la Collaborative Decision Making (CDM). Se ha hecho un estudio estadístico de los GDPs sucedidos durante el 2006 en todos los aeropuertos de Estados Unidos de América y se han obtenido estadísticas sobre el número de GDPs, sus causas, los retrasos producidos y el número de vuelos afectados por aeropuerto.

Los resultados obtenidos muestran que el 90% de los GDPs tuvieron lugar en únicamente 16 aeropuertos, siendo el aeropuerto de Newark (EWR), en Nueva York, el que acumuló más regulaciones. Respecto a las causas de los GDPs, se ha detectado que en el 74% de los casos son causados por condiciones meteorológicas adversas. El 90% del total de minutos de retraso se repartieron en sólo 10 aeropuertos, con Chicago (ORD) como aeropuerto con más retrasos. Por otro lado, el 90% de los vuelos afectados tienen como destino sólo 10 aeropuertos, siendo, nuevamente, Chicago (ORD) el aeropuerto con más vuelos afectados. Se ha observado que existe una relación entre el número de vuelos afectados y el número de minutos de retraso. No obstante, la mayoría de los aeropuertos con mayor número de retrasos y vuelos afectados también ocupan un nivel elevado en la lista de aeropuertos con mayor número de GDPs.

Mediante el algoritmo K-means se han clasificado los GDPs en clusters de características similares. Los centroides de los clusters del aeropuerto de Newark (EWR) se han usado para simular una estrategia de reducción de velocidad en crucero. Con esta estrategia, parte del retraso asignado por el GDP se absorbe en el aire volando a una velocidad inferior que la nominal, pero que proporciona el mismo consumo de combustible que el vuelo nominal. En caso que el GDP se cancele, los aviones que vuelan más lentos pueden recuperar cierto tiempo del retraso, volviendo a la velocidad nominal, pero sin consumir combustible extra.

Para realizar las simulaciones se han usado los datos del Enhanced Traffic Management System (ETMS) para general el tráfico hacia EWR de dos días del 2006. Se han clasificado las diferentes aeronaves en modelos de Airbus para poder obtener las performances mediante el programa Airbus PEP Suite y el tráfico se ha simulado usando el programa Future ATM Concepts Evaluation Tool (FACET).

Con los resultados de las simulaciones se ha visto que el efecto de la reducción de velocidad depende del momento de cancelación del GDP y del número de vuelos en ese instante. Los resultados obtenidos de las simulaciones muestran que entre un 4% y un 5% del retraso se puede absorber en el aire. Si se simulan los GDPs de Newark, con los datos de los centroides, y se cancelan en el momento en que de media fueron cancelados, se obtiene que con la estrategia de recuperación de velocidad se puede recuperar un 7% más de retraso en el caso del cluster 1, un 33% en el cluster 2 y un 31% en el cluster 3, sin incrementar el consumo de combustible.

**Title :** Study of Ground delay programs and Speed reduction strategies

**Author:** Marc Melgosa Farrés

**Advisors:** Luis Delgado Muñoz  
Xavier Prats Menéndez

**Date:** July 5, 2012

## Overview

The Ground Delay Program (GDP) and the Collaborative Decision Making (CDM) concepts have been studied in this project. A statistical analysis on all GDPs that occurred during 2006 in the United States of America has been done. Some statistics have been derived on the number of GDPs, their causes, the assigned delay and the number of affected flights per airport

Results show that the 90% of the GDPs took place in only 16 airports, being Newark (EWR), in New York, the airport with more regulations. In addition, the 74% of the GDPs were caused by bad weather conditions and the 90% of the total delay was assigned only in 10 airports, being Chicago the airport with more delay assigned. A same behaviour was observed with the number of affected flights: the 90% of the flights had as a destination only 10 different airports and Chicago again, was the airport with more affected flights. A clear relationship exists between the number of affected flights and the assigned delay. However, many airports with more flights and delay are also in the highest positions of the number of GDPs per airport list.

Using the K-means algorithm GDPs have been classified into clusters with similar characteristics. Cluster centroids for Newark (EWR) have been used to simulate a cruise speed reduction strategy aiming to absorb part of the assigned GDP delay airborne, by flying slower but consuming the same amount of fuel than in the nominal flight. In case the GDP is cancelled, aircraft flying at reduced speed can fly recover some delay, by speeding to the nominal speed, but without incurring with extra fuel consumption.

The data from the Enhanced Traffic Management System (ETMS) has been used in order to simulate the traffic with destination EWR in two 2006 days. All aircrafts types has been classified into Airbus types and their performances have been computed using the Airbus PEP Suite. Finally, the traffic has been simulated using the Future ATM Concepts Evaluation Tool (FACET).

The simulation results showed that the speed reduction effects depend on the cancellation time and the number of flights flying at that time. Results show that between 4% to 5% of the total delay can be absorbed in the air. Simulating the Newark GDPs, using the centroids data and cancelling them at their average cancellation time, a 7% of delay can be recovered in the cluster 1 using the speed reduction strategy, 33% in the cluster 2 and 31% in the cluster 3 at no extra fuel consumption.



Als meus pares per donar-me suport durant  
tot aquest temps.



# ÍNDICE GENERAL

<b>Glosario</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>Introducción</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 1. Ground Delay Programs</b> . . . . .	<b>7</b>
<b>1.1. Descripción de un GDP</b> . . . . .	<b>7</b>
1.1.1. Tiempos característicos de un GDP . . . . .	8
1.1.2. Algoritmos de asignación de slots . . . . .	10
<b>1.2. Funcionamiento general de un GDP</b> . . . . .	<b>11</b>
1.2.1. Collaborative Decision Making . . . . .	11
1.2.2. Ejemplo teórico . . . . .	13
<b>1.3. Estrategias de reducción de velocidad para aplicaciones ATFM</b> . . . . .	<b>15</b>
1.3.1. Costes de operación de una aeronave . . . . .	16
1.3.2. El concepto de velocidad equivalente . . . . .	17
1.3.3. Modalidades de Speed Reduction . . . . .	17
1.3.4. Aplicación de la estrategia de Speed Reduction en un GDP . . . . .	18
<b>CAPÍTULO 2. Análisis de GDPs</b> . . . . .	<b>21</b>
<b>2.1. Análisis inicial de los GDPs</b> . . . . .	<b>21</b>
2.1.1. GDPs por aeropuerto . . . . .	21
2.1.2. Causas de los GDPs . . . . .	21
2.1.3. Minutos de retraso por aeropuerto . . . . .	23
2.1.4. Vuelos afectados por aeropuerto . . . . .	25
2.1.5. Análisis de los tiempos característicos de los GDPs . . . . .	25
<b>2.2. Grupos de GDPs mediante algoritmo K-means</b> . . . . .	<b>26</b>
2.2.1. Análisis del clustering en Newark . . . . .	27
<b>2.3. Ejemplo real de CDM</b> . . . . .	<b>28</b>
<b>CAPÍTULO 3. Simulación con Speed Reduction</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>3.1. Algoritmo</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>3.2. Consideraciones básicas de las simulaciones</b> . . . . .	<b>35</b>

<b>3.3. Resultados</b>	<b>36</b>
3.3.1. Resultados de la cancelación prematura del GDP	37
3.3.2. Resultados en el actual end time de los centroides	39
3.3.3. Efecto de la estrategia de reducción de velocidad en el global de ATM	40
<b>Conclusiones</b>	<b>41</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>43</b>
<b>APÉNDICE A. Parámetros GDP</b>	<b>47</b>
A.1. GDP parameters	47
A.2. Flight parameters	48
<b>APÉNDICE B. Tablas completas de análisis de GDPs</b>	<b>59</b>
<b>APÉNDICE C. Clustering</b>	<b>65</b>
C.1. Algoritmo K-means	65
C.1.1. Medidas de distancia	66
C.1.2. Calidad de los clusters	67
C.1.3. Índice de Silhouette	68

# ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Esquema de un GDP convencional . . . . .	8
1.2	Demanda y capacidad antes del GDP . . . . .	9
1.3	Demanda y capacidad después del GDP . . . . .	9
1.4	Esquema temporal de un GDP . . . . .	10
1.5	Esquema del funcionamiento general de un GDP . . . . .	12
1.6	Esquema de la estrategia CDM durante un GDP . . . . .	13
1.7	Costes de operación y alcance específico en función de la velocidad de crucero . . . . .	16
1.8	Representación esquemática de los retrasos en un GDP convencional y en diferentes escenarios de GDP . . . . .	19
2.1	Análisis del número de GDPs y sus causas . . . . .	22
2.2	Minutos de retraso por aeropuerto . . . . .	24
2.3	Comparación entre retraso inicial real y teórico . . . . .	24
2.4	Vuelos afectados por aeropuerto . . . . .	26
2.5	Centroides de los clusters . . . . .	28
2.6	Histograma de los minutos asignados inicialmente . . . . .	29
2.7	Histograma de los minutos de retraso finalmente realizados . . . . .	30
2.8	Número vuelos en función de la diferencia entre la CTA y la ARTA . . . . .	32
3.1	Generación del tráfico nominal . . . . .	34
3.2	Generación de la demanda . . . . .	34
3.3	Diagrama de las simulaciones . . . . .	35
3.4	Generación del retraso . . . . .	35
3.5	Diagrama del aeropuerto EWR . . . . .	36
3.6	Retraso realizado y recuperado con o sin retraso en el aire . . . . .	38
3.7	Retraso extra recuperado, vuelos volando a $V_{eq}$ y despegues extra . . . . .	39
C.1	Esquema algoritmo K-means . . . . .	65
C.2	Ejemplo de índices Silhouette para 10 clusters . . . . .	69



# ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Asignación de slots previa publicación de GDP	14
1.2	Asignación de slots cuando se publica el GDP	14
1.3	Asignación de slots después de cancelación y sustituciones	15
1.4	Asignación de slots después de la compresión	16
2.1	Aeropuertos con mayor número de GDPs	22
2.2	Aeropuertos con mayor número de retrasos	23
2.3	Aeropuertos con mayor número de vuelos afectados	25
2.4	Número de clusters y coeficiente de silhouette de cada aeropuerto	27
2.5	Centroides de los clusters de EWR	28
2.6	Mensajes ADL de un vuelo normal	30
2.7	Mensajes ADL de un vuelo con sustitución	31
2.8	Mensajes ADL de un vuelo con cancelación	31
3.1	Resultados de los GDPs simulados	36
3.2	División entre retraso en tierra y retraso en el aire	37
3.3	Valores máximos obtenidos en las simulaciones	38
3.4	Resultados de las simulaciones en el actual end time	40
B.1	Número de GDPs por aeropuerto	59
B.2	Minutos de retraso por aeropuerto	60
B.3	Vuelos afectados por aeropuerto	61
B.4	Número de clusters y coeficiente de silhouette de todos los aeropuertos	62



# GLOSARIO

- ACID: Identificador de vuelo.
- ADL: Agregate Demand List.
- AFP: Airspace Delay Program.
- ALD: Airline Delay.
- ARTA: Actual Runway Time of Departure.
- ATC: Air Traffic Control.
- ATCSCC: Air Traffic Control Command Center.
- ATFM: Air Traffic Flow Management.
- BETA: Base Estimated Arrival Time.
- BETD: Base Estimated Departure Time.
- CDM: Collaborative Decision Making.
- CFMU: Central Flow Management.
- CI: Cost Index.
- CTA: Controlled Time of Arrival.
- CTD: Controlled Time of Departure.
- CX: Cancellation.
- ECON:Economic speed.
- ETA: Estimated Time of Arrival.
- ETD: Estimated Time of Departure.
- ETMS:Enhanced Traffic Management System.
- FAA: Federal Aviation Administration.
- FACET: Future Air Traffic Concepts Evaluation Tool.
- FMS: Flight Management System.
- FSM: Flight Schedule Monitor.
- GDP: Ground Delay Program.
- GS: Ground Stop.
- IGTA: Initial Gate Time of Arrival.

- MCR: Maximum Cruise Speed.
- MIT: Miles-in-Trail.
- OAG: Official Airline Guide.
- OCTA: Original Controlled Time of Arrival.
- OCTD: Original Control Time of Departure.
- RBACSize: Ration-by-Aircraft.
- RBD: Ration-by-Distance.
- RBFF-High: Ration-by-Fuel Flow High Precedence.
- RBFF-Low: Ration-by-Fuel Flow Low Precedence.
- RBPax: Ration-by-Passengers.
- RBS: Ration-by-Schedule.
- RWY: Runway.
- SRed: Speed Reduction.
- SR: Specific Range.
- TMI: Air Traffic Management Initiatives.
- TYPE: Tipus de canvi de l'ADL.

## **Aeropuertos**

- APF: Naples, FL.
- ASN: Talladega, AL.
- ATL: Atlanta, GA.
- BOS: Boston, MA.
- BWI: Baltimore, MD.
- CLE: Cleveland, OH.
- CLT: Charlotte, NC.
- CVG: Cincinnati, OH.
- CYHZ: Halifax, NS, International.
- CYUL: Montreal, QC, Dorval.
- CYVR: Vancouver, BC, International.

- 
- CYYC: Calgary, AB.
  - CYYT: Saint Johns, NL.
  - CYYZ: Toronto, ON, International.
  - DAB: Daytona Beach, FL.
  - DAY: Dayton, OH.
  - DCA: Washington, DC, National.
  - DEN: Denver, CO, International.
  - DFW: Fort Worth/Dallas, TX.
  - DTW: Detroit, MI, Metro/Wayne County.
  - EWR: Newark, NJ.
  - FLL: Fort Lauderdale, FL.
  - HPN: Westchester County, NY.
  - IAD: Washington, DC, Dulles.
  - IAH: Houston, TX, Intercontinental.
  - ISM: Kissimmee/Orlando, FL.
  - JFK: New York, NY, Kennedy.
  - LAS: Las Vegas, NV.
  - LAX: Los Angeles, CA.
  - LGA: New York, NY, La Guardia.
  - LWB: Lewisburg, WV.
  - MDW: Chicago, IL, Midway.
  - MEM: Memphis, TN.
  - MSP: Minneapolis, MN.
  - ORD: Chicago, IL, O'Hare.
  - ORL: Orlando, FL, Herndon.
  - PBI: West Palm Beach, FL.
  - PDX: Portland, OR.
  - PHL: Philadelphia, PA, International.
  - PHX: Phoenix, AZ.

- PTK: Pontiac, MI.
- RSW: Fort Myers, FL.
- SDF: Louisville, KY.
- SEA: Seattle, WA, Seattle/Tacoma, International.
- SFO: San Francisco, CA.
- SLC: Salt Lake City, UT.
- TEB: Teterboro, NJ.
- UNV: State College, PA.
- YIP: Ypsilanti, MI.

# INTRODUCCIÓN

Desde la desregularización del negocio del transporte aéreo producida en el 1978, el hecho de viajar en avión se ha transformado de un lujo para unos pocos a un hecho cotidiano para un gran número de personas. En un inicio, ésto fue beneficioso, pero ahora existe el riesgo de la saturación del espacio aéreo, pues las infraestructuras están llegando a sus límites operativos. Actualmente, la saturación provoca congestión y retrasos que implican un coste económico aproximado de 15.000 millones de dólares cada año [1].

Los datos históricos reafirman lo dicho anteriormente, pues el número de vuelos retrasados va aumentando con los años. Centrándonos en Estados Unidos, en el año 2003 el porcentaje de vuelos retrasados fue del 16%, en 2004 del 20%, en 2005 del 21% y en el 2006 del 22%. Si tenemos en cuenta las cancelaciones, éstas producen más retraso por pasajero que los propios retrasos. Además, los altos factores de ocupación hacen que el sistema sea extremadamente sensible a las cancelaciones y que éstas, a su vez, no sean rápidamente solucionables. El motivo es que cuanto más alto es el factor de ocupación más difícil le es a un pasajero encontrar otro vuelo con asientos disponibles [1].

Esta situación de saturación es mucho mayor en Estados Unidos que en Europa. A pesar de tener sistemas de Air Traffic Control (ATC) y estándares de seguridad muy similares, el retraso en la mayoría de los aeropuertos más importantes de Estados Unidos es diez veces superior que en los principales aeropuertos europeos [1]. La diferencia reside en que en Europa existen los slots administrativos, que limitan el número de operaciones que se pueden planificar en un aeropuerto en base a una capacidad relativamente pesimista. En Estados Unidos, la liberalización es mayor y cualquier compañía puede planificar los vuelos que quiera a un aeropuerto, independientemente de los saturado que esté [2].

Por si esto fuera poco, se espera una creciente demanda futura. Según los pronósticos de la FAA (Federal Aviation Administration) el número de pasajeros que usará el servicio aéreo en 2024 alcanzará la cifra de 1.000 millones. Esto significa que, a pesar de la crisis económica mundial, el uso del transporte aéreo seguirá aumentado, pero a un ritmo más lento, pues el último pronóstico predecía el billón de pasajeros tres años antes [3]. Esto significa que la demanda se incrementará progresivamente en los próximos años.

Como el exceso de demanda es un problema actual y creciente en el tiempo, cuando la demanda excede la capacidad de un aeropuerto es necesario aplicar algún tipo de medida. En este trabajo se analizará ampliamente el concepto de GDP (Ground Delay Program), que es la medida más habitual, y su mejora con la CDM (Collaborative Decision Making). Se usarán los datos de todos los GDPs de 2006 para realizar una amplia descripción de éstos y una clasificación en grupos de GDPs con características similares. Con los clusters encontrados en el aeropuerto de Newark, se simulará la estrategia de reducción de velocidad que se propone en [2], [4] y [5] con la intención de ofrecer una recuperación del retraso en el caso de que el GDP se cancelase antes de su hora prevista.

Este trabajo se estructurará en tres capítulos. En el primero, se hará una amplia descripción del concepto de GDP y se explicará su funcionamiento. Además, se dará una explicación teórica de la estrategia de reducción de velocidad y de cuáles son sus principios de funcionamiento. En el segundo capítulo, se presentarán los resultados obtenidos de realizar una estadística de los datos de todos los GDPs de 2006. En este mismo capítulo se explicarán los resultados obtenidos de haber realizado el clustering de los GDPs en los

diferentes aeropuertos y de forma más profunda en el aeropuerto de Newark. Para terminar este capítulo, se presentará un ejemplo real de cómo se aplica la CDM y cómo son los mensajes entre los diferentes centros de ATC y las aerolíneas. Para finalizar el trabajo, en el tercer capítulo se presentarán los resultados de haber realizado la simulación de la estrategia de reducción de velocidad con los datos de tráfico reales de dos días.

# CAPÍTULO 1. GROUND DELAY PROGRAMS

En ocasiones, la capacidad de un aeropuerto se ve superada por la demanda. Ésto puede deberse a un crecimiento de la demanda en horas punta, en acontecimientos importantes o por otros motivos, y/o a que la capacidad decrece como consecuencia de la meteorología, accidentes u otras causas. En Estados Unidos, cuando la capacidad de un aeropuerto se ve superada por la demanda se pueden realizar tres acciones [6]:

- Incrementar la capacidad mejorando las infraestructuras físicas.
- Usar tecnología más avanzada.
- Aplicar Air Traffic Management Initiatives (TMIs).

Teniendo en cuenta que las primeras opciones conllevan una gran inversión, usar los sistemas ya existentes de manera más eficiente, tal y como hace la tercera opción, supone una buena alternativa. Existen cuatro soluciones TMI [6]:

- Ground Stop (GS). Se implementa cuando un aeropuerto experimenta condiciones meteorológicas adversas o bien un fallo grave de seguridad. Los vuelos con destino al aeropuerto afectado se paran en el aeropuerto de origen durante la duración del GS y esperan hasta recibir noticias. Hasta que la situación que ha provocado el GS no desaparece, todos los vuelos permanecen en tierra.
- Ground Delay Program (GDP). Es la solución más utilizada. Un GDP es una respuesta ante un futuro desajuste entre la capacidad y la demanda de llegadas en un aeropuerto. Los vuelos afectados se retrasan en el aeropuerto de origen para ahorrar combustible y asegurar la seguridad, reduciendo el holding en ruta.
- Airspace Flow Program (AFP). Es relativamente nuevo, pues se inició en 2006. Analiza cuando la demanda supera la capacidad en ruta. Si un vuelo se ve afectado se le dan dos opciones. Por un lado puede cambiar la ruta para evitar la zona conflictiva. Por el otro lado, puede aceptar un retraso en tierra hasta que no suponga un problema.
- Miles-in-Trail (MIT). Sirve para acomodar el ritmo de llegadas a un aeropuerto con la capacidad de éste. Los controladores aéreos incrementan la distancia entre aeronaves y las restricciones pueden propagarse a aeronaves que están a cientos de millas del aeropuerto. El objetivo es evitar la congestión y preservar la seguridad en el espacio aéreo de la terminal.

## 1.1. Descripción de un GDP

Asignar retrasos en tierra a los aviones afectados por una regulación es una medida que se aplica tanto en Estados Unidos como en Europa. Sin embargo, el termino *Ground Delay Program* se usa básicamente en Estados Unidos para designar este tipo de TMI. Tal y como se ha comentado antes, el objetivo es adaptar la demanda a la capacidad de un

sector o aeropuerto. Con ese fin, se asigna un retraso a ciertos vuelos en sus aeropuertos de salida. Este tipo de medida se hace porque, a priori, es preferible un retraso en tierra que en el aire, pues en el primer caso no se consume combustible [7], y porque se reduce la congestión en el área terminal .

Los GDPs son frecuentes cuando la capacidad de algunos aeropuertos se reduce significativamente, por ejemplo, cuando las condiciones meteorológicas son adversas. En estos casos se genera una regulación donde el problema reside en determinar cuánto tiempo durará la reducción de la capacidad que produce el problema. Debido a esta incertidumbre en el tiempo de cancelación, los vuelos de largo recorrido, es decir, que su origen está fuera de un radio determinado, no se verán afectados por la regulación. El radio de la regulación se fija cuando se implementa el GDP y depende principalmente del nivel de reducción de la capacidad.

A los vuelos afectados por la regulación se les asigna un controlled time of arrival (CTA) o slot. Con la información de los planes de vuelo y de las previsiones meteorológicas se estima el tiempo de vuelo. De esta manera, se obtiene el controlled time of departure (CTD). Una vez se dispone de estos tiempos regulados, se puede calcular el retraso en tierra o ground delay como el CTD menos el estimated time of departure (ETD), que es la hora de salida prevista antes de la regulación [4]. La figura 1.1 muestra gráficamente el funcionamiento de un GDP, donde D es el retraso (delay) asignado y ETA (estimated time of arrival) es la hora de llegada inicialmente planificada por el operador.

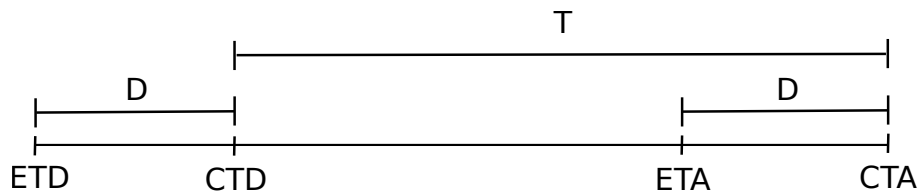


Figura 1.1: Esquema de un GDP convencional

A continuación se ejemplifica como se adapta la demanda a la capacidad de un aeropuerto. En la figura 1.2, la línea amarilla representa la hora actual. A las 13:00 se espera una reducción de la capacidad de 100 vuelos por hora a 75 entre las 17:00 y las 22:00. La demanda supera la capacidad durante ese periodo de tiempo. Cuando el GDP se implementa, se reduce la demanda programada para que no supere la capacidad retrasando los vuelos en tierra. Las barras azules en la figura 1.3 son vuelos retrasados. Como se aprecia, algunos vuelos se retrasan incluso después del GDP, ya que si no fuera así el tráfico llegaría de golpe y se volvería a sobrepasar la capacidad máxima [8].

En Europa el procedimiento en estos casos es muy similar, con la diferencia que todos los vuelos se ven afectados por el GDP, independientemente de su distancia de vuelo o radio. Eurocontrol gestiona este tipo de conflictos mediante la Central Flow Management Unit (CFMU), que se encarga de gestionar los slots. [9]

### 1.1.1. Tiempos característicos de un GDP

En un GDP hay cuatro tiempos característicos que son:

- GDP report time: Se trata del tiempo en que los organismos de control publican que

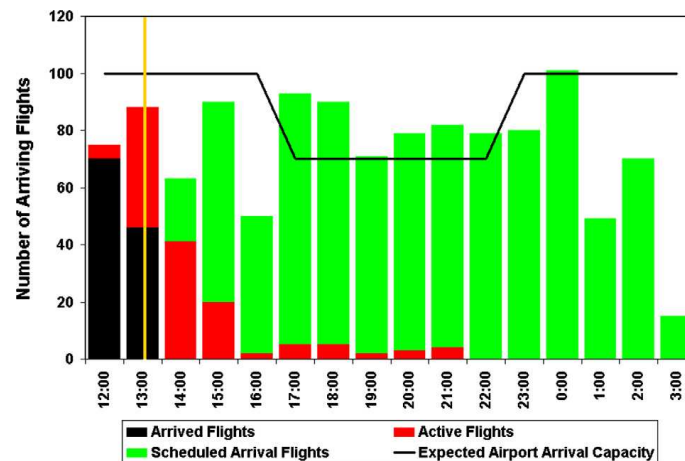


Figura 1.2: Demanda y capacidad antes del GDP (Fuente: [8])

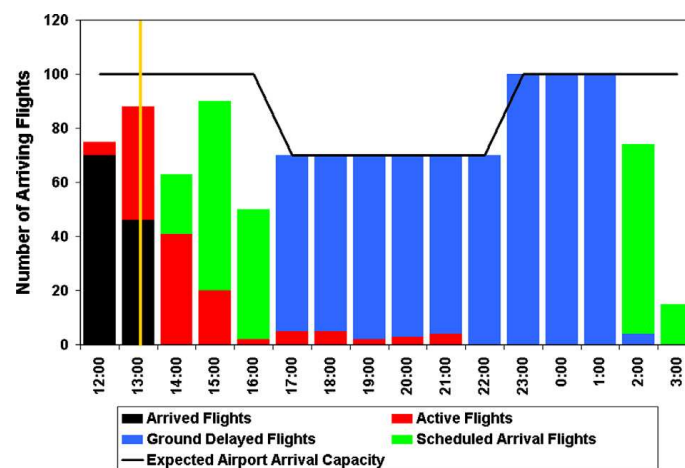


Figura 1.3: Demanda y capacidad después del GDP (Fuente: [8])

habrá un GDP. A partir de este momento, ya pueden haber modificaciones debidas al GDP. Vuelos que ya prevén los retrasos pueden cancelarse, cambiar su ruta o bien modificar su hora de salida.

- GDP start time: A partir de este momento los slots están regulados.
- GDP end time: Se trata del tiempo en que inicialmente se prevé que finalice la regulación.
- GDP actual end time: Es el tiempo en que realmente ha finalizado la regulación. Puede coincidir con el GDP end time, si las previsiones eran correctas, o bien puede ser un tiempo anterior, si se ha sobredimensionado el GDP, o superior, si se ha infravalorado.

Estos tiempos pueden verse representados de forma esquemática en la figura 1.4.

En esa figura se puede ver que el tiempo queda dividido en cuatro segmentos que se pueden analizar separadamente:

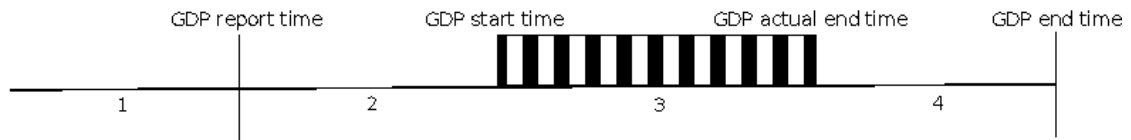


Figura 1.4: Esquema temporal de un GDP

1. Aún no se ha publicado el GDP. Por ese motivo los vuelos no tienen ningún tipo de restricción ni CTA.
2. Ya se conoce la presencia del GDP. Se aplican CTAs.
3. El desajuste entre la demanda y la capacidad se estaría produciendo si no se aplicara el GDP. Se continúan aplicando CTAs. En el final de esta fase la normalidad puede ir restableciéndose pero se continúan aplicando CTAs si la nueva demanda aún supera la nueva capacidad (aunque esta sea la capacidad nominal).
4. En esta fase la demanda vuelve a estar por debajo de la capacidad y por lo tanto no es necesario la aplicación de CTAs.

### 1.1.2. Algoritmos de asignación de slots

Actualmente, el algoritmo de asignación de slots que se utiliza es el llamado Ration-by-Schedule (RBS). Los slots se asignan en función de la hora de llegada publicada en la Official Airline Guide (OAG). No obstante, en [8] se explican otras posibles alternativas. Algunas de ellas son:

- Ration-by-Passengers (RBPax): los aviones con mayor número de pasajeros tienen preferencia frente a otros con menos pasajeros.
- Ration-by-Aircraft Size (RBACSize): a los vuelos con aviones de categoría Heavy se les asignan los slots primero. Después se asignarán los slots a los aviones más pequeños.
- Ration-by-Distance (RBD): la organización se realiza mediante la distancia de círculo máximo. Los vuelos de mayor distancia tienen preferencia ante los vuelos más cortos.
- Ration-by-Fuel Flow High Precedence (RBFF-High): la asignación de los slots se realiza en función del flujo de combustible en la fase de taxi. Vuelos con un consumo en taxi mayor tendrán mayor prioridad.
- Ration-by-Fuel Flow Low Precedence (RBFF-Low): es el caso contrario al anterior. Ahora los vuelos con un consumo en taxi menor tendrán prioridad.

También en [8] se han realizado simulaciones en el aeropuerto de Newark (EWR) para comprobar las ventajas y los inconvenientes de los distintos métodos de ordenación. Con la excepción del algoritmo de ordenación RBFF-Low, todos los algoritmos han obtenido menor retraso para los pasajeros y han consumido menos combustible. Sin embargo hay

que tener en cuenta los conceptos de equidad de aerolínea y de equidad de pasajero. Según el concepto de equidad de aerolínea, a más vuelos tenga una aerolínea, más retraso se le debería asignar, y según la equidad de pasajero, a más pasajeros se tengan más retraso se debería asignar. La intención de estos conceptos de equidad es evitar que a una aerolínea se le aplique mucho retraso y que unos pocos pasajeros se vean afectados por un gran retraso. Teniendo en cuenta estos conceptos de equidad, se ha visto que el algoritmo de RBS es el más equitativo. Por ese motivo es el que se utiliza actualmente.

## 1.2. Funcionamiento general de un GDP

Los especialistas de ATFM monitorizan continuamente la demanda y la capacidad de los aeropuertos. Cuando la demanda prevista supera la capacidad estimada por alguna razón se modela un GDP. Si el tiempo lo permite, se manda un aviso a las compañías aéreas antes de que se implemente el programa. Las aerolíneas comprueban el impacto del GDP propuesto en sus operaciones y pueden cancelar algunos de sus vuelos. Después, los especialistas de ATFM reevalúan si el GDP aún es necesario. Si es así, usan el algoritmo Ration-by-Schedule (RBS) explicado anteriormente y asignan a cada vuelo su Controlled Time of Arrival (CTA) y su Controlled Time of Departure (CTD). Una vez las aerolíneas reciben estos tiempos controlados tienen la oportunidad de responder con sustituciones y cancelaciones.

Las CTAs representan los slots asignados a cada aerolínea y se consideran temporalmente propios de cada aerolínea. Por ese motivo, las compañías pueden intercambiar slots entre dos de sus vuelos para satisfacer sus intereses comerciales. Después de las posibles cancelaciones y sustituciones se lleva a cabo la compresión. Las compresiones son un proceso de intercambio de slots que se realiza para llenar los slots que las aerolíneas no han conseguido llenar mediante cancelaciones y sustituciones. A partir de este momento se harán nuevas compresiones cada vez que se cree un slot vacío. Durante el GDP, los parámetros necesitan ser revisados para tener en cuenta las condiciones que hayan cambiado. Estas revisiones pueden generar nuevas cancelaciones y sustituciones, seguidas por nuevas compresiones [10].

Este proceso de intercambio de mensajes y slots entre las aerolíneas y los centros de control se engloba dentro del concepto de Collaborative Decision Making (CDM), que se explicará detalladamente más adelante. Todo el proceso descrito se representa en la figura 1.5, donde las partes azules representan un GDP convencional y las partes verdes representan la aportación de la CDM. Hay que destacar que esta metodología sólo se aplica en Estados Unidos. En Europa, no existe el concepto de CDM como tal, aunque hay un mínimo de interacción entre las aerolíneas y la CFMU mediante mensajes estandarizados.

### 1.2.1. Collaborative Decision Making

La Collaborative Decision Making se desarrolla con el fin de facilitar los GDPs mediante el intercambio de información entre la FAA y las aerolíneas. Con el uso de esta técnica se consigue lo que se conoce como CDM-enhanced GDP, que permite que las aerolíneas

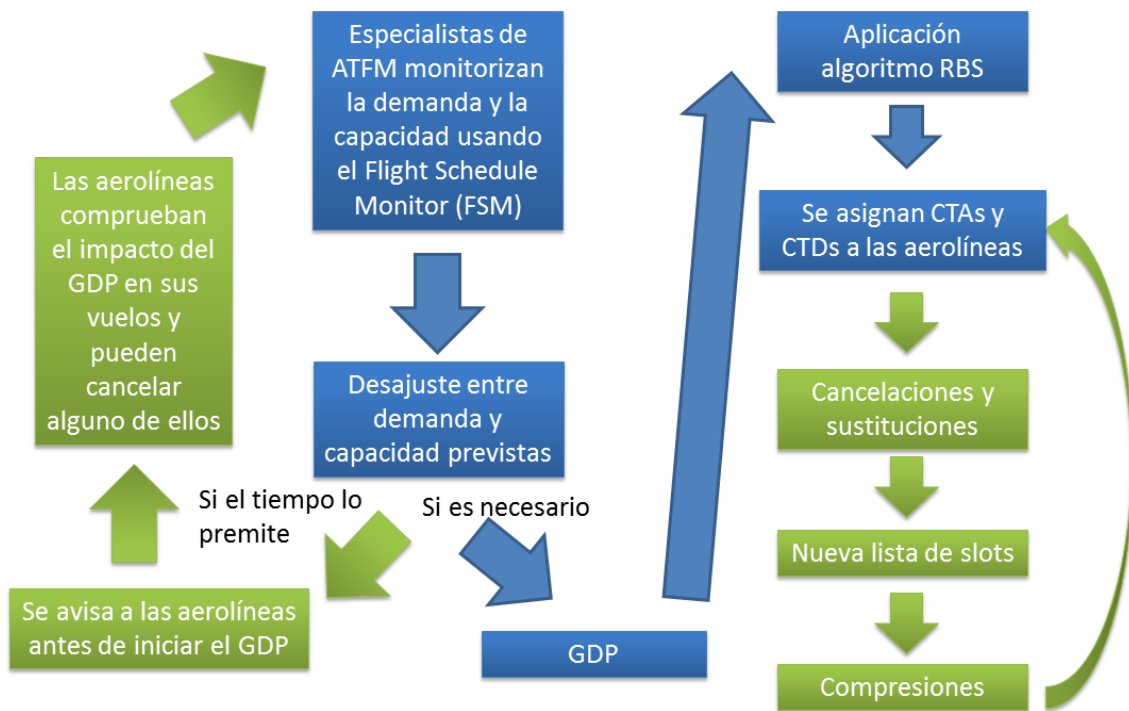


Figura 1.5: Esquema del funcionamiento general de un GDP

tengan más flexibilidad en la gestión de sus vuelos para el beneficio de sus objetivos como aerolínea [6].

El 20 de enero de 1998 se empezaron a hacer pruebas de este mecanismo en los aeropuertos de San Francisco (SFO) y Newark (EWR). Posteriormente, aunque en el mismo año, las operaciones de CDM se empezaron a ejecutar en todos los aeropuertos de los Estados Unidos [11].

La CDM realiza una mejor gestión de la capacidad. Las ventajas de usar esta técnica son [6] [11]:

- Las aerolíneas pueden tener una imagen global de las operaciones del aeropuerto. Así pues, tienen acceso a la demanda total de dicho aeropuerto y de los cambios de capacidad a que se ve sometido. Con estos datos, las propias compañías pueden planificar sus propias operaciones teniendo en cuenta la situación real del espacio aéreo.
- Promueve que las aerolíneas compartan información entre sí. La CDM está diseñada para que cada aerolínea saque provecho de compartir sus datos. Antes de la CDM, las aerolíneas no publicaban sus cancelaciones o retrasos hasta que el slot se perdía, con la intención de que sus competidores no usaran ese slot. Con CDM, si una compañía publica una cancelación, el slot vacante sigue siendo propiedad de la propia aerolínea para que pueda realizar las operaciones que más le convengan.

- La CDM utiliza la información de demanda más actualizada que hay disponible. Gracias a ello, los GDPs pueden terminar antes de lo que se había previsto, pues si las cancelaciones se publican la FAA sabe que la demanda se ha reducido y puede que se ajuste a la capacidad disponible.
- Cada compañía puede utilizar sus slots como mejor sirvan a sus intereses comerciales.
- Las normas para las sustituciones son más simples y flexibles.

El funcionamiento de esta técnica se explica en los siguientes párrafos.

El Air Traffic Control Systems Command Center (ATCSCC), que pertenece a la FAA, monitoriza la demanda y la capacidad de los aeropuertos con horas de antelación usando el Flight Schedule Monitor (FSM). Cuando hay un desequilibrio entre los vuelos programados y la capacidad pronosticada se publica un GDP. El FSM proporciona una solución inicial al problema asignando un Original Controlled Time of Arrival (OCTA) a cada vuelo en función de la hora programada de llegada que aparece en la Official Airline Guide (OAG).

Después de que los slots se hayan asignado inicialmente, las aerolíneas poseen un determinado número de slots y pueden incluso intercambiar o cancelar sus vuelos. Todos estos cambios se envían a la FAA con mensajes CDM. Además, puede pasar que después de todos los cambios que haya hecho una aerolínea haya quedado un slot vacante que no puede ocupar. Para que estos slots no queden vacantes, la FAA aplica un algoritmo de compresión que afecta a todas las aerolíneas. Como consecuencia de las prácticas anteriores, el CTA de cada vuelo se actualiza de forma dinámica por la FAA o las propias aerolíneas.

Cada cinco minutos, el FAA Command Center comparte todos los horarios con las aerolíneas con la Aggregate Demand List (ADL) [6]. Este procedimiento queda descrito en la figura 1.6.

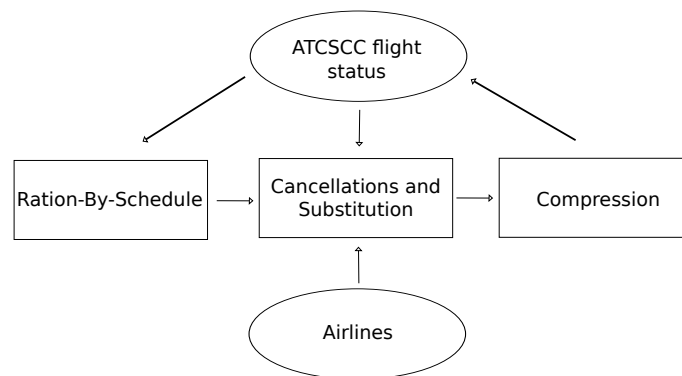


Figura 1.6: Esquema de la estrategia CDM durante un GDP (Fuente: [11])

### 1.2.2. Ejemplo teórico

Para entender mejor el funcionamiento de esta estrategia se propone un ejemplo, donde tendremos tres aerolíneas distintas A,B y C. Supondremos que inicialmente la capacidad

del aeropuerto es de 12 aviones por hora (1 llegada cada 5 minutos). La asignación inicial de slots previa publicación de un GDP podría ser la que se muestra en la tabla 1.1. Ante esta condición, vemos que la demanda es igual que la capacidad, por lo que esta asignación de slots es correcta y no conlleva retraso alguno a ningún vuelo.

Tabla 1.1: Asignación de slots previa publicación de GDP

Aerolínea	Vuelo	ETA
B	1	08:00
A	2	08:05
C	3	08:10
A	4	08:15
B	5	08:20
C	6	08:25
A	7	08:30
A	8	08:35
B	9	08:40
C	10	08:45

A continuación, se publica un GDP porque las condiciones meteorológicas han reducido la capacidad a 6 vuelos por hora (1 vuelo cada 10 minutos). Es obvio que la asignación inicial ya no es satisfactoria por lo que los especialistas asignarán una CTA a cada vuelo para adecuar la demanda a la capacidad. Como se ha comentado, el algoritmo de ordenación es el Ration-By-Schedule, por lo que el nuevo orden de los vuelos será igual al que estaba publicado anteriormente, aunque los vuelos tendrán retraso. La representación de los nuevos slots se puede observar en la tabla 1.2. Tendremos un retraso total de 225 minutos.

Tabla 1.2: Asignación de slots cuando se publica el GDP

Aerolínea	Vuelo	ETA	CTA	Retraso (minutos)
B	1	08:00	08:00	0
A	2	08:05	08:10	5
C	3	08:10	08:20	10
A	4	08:15	08:30	15
B	5	08:20	08:40	20
C	6	08:25	08:50	25
A	7	08:30	09:00	30
A	8	08:35	09:10	35
B	9	08:40	09:20	40
C	10	08:45	09:30	45
Total A				85
Total B				60
Total C				80
Total				225

Ahora imaginemos que el vuelo 7 tiene una conexión y que sería muy perjudicial para la aerolínea que éste llegase con retraso. Con la intención de minimizar estos efectos, la aerolínea A decide cancelar su vuelo 4. Ese slot libre es propiedad de la aerolínea, por

lo que puede cambiar el slot del vuelo 7 por el vacante (que antes pertenecía al vuelo 4). Con este cambio, el slot de las 9:00 quedaría libre. Para reducir el retraso, la aerolínea A sustituye el slot de las 9:10 por el de las 9:00. Ahora el slot vacante es el de las 9:10. Después de que la aerolínea realice estos cambios, la asignación de slots quedaría como se representa en la tabla 1.3. Vemos como el retraso para la aerolínea A se ha reducido de 85 a 30 minutos.

Tabla 1.3: Asignación de slots después de cancelación y sustituciones

Aerolínea	Vuelo	ETA	CTA	Retraso (minutos)
B	1	08:00	08:00	0
A	2	08:05	08:10	5
C	3	08:10	08:20	10
A	7	08:30	08:30	0
B	5	08:20	08:40	20
C	6	08:25	08:50	25
A	8	08:35	09:00	25
Vacío			09:10	
B	9	08:40	09:20	40
C	10	08:45	09:30	45
Total A				30
Total B				60
Total C				80
Total				170

Pero como se ha dicho, una de las características del mecanismo CDM es que promueve el intercambio de información entre aerolíneas. En esta circunstancia, la aerolínea A tendría que publicar que el slot de las 09:10 no lo puede usar y que lo dejará libre. A continuación, se aplicaría el algoritmo de compresión desplazando los vuelos 9 y 10 con la intención de no dejar slots libres. El resultado de estos movimientos se refleja en la tabla 1.4.

El resultado de aplicar esta estrategia es que una modificación de los slots en la compañía A ha permitido que no sólo se beneficie ésta, sino que todas las aerolíneas han sufrido una reducción del retraso. La aerolínea A ha tenido una reducción de retraso de un 64,7%, la aerolínea B lo ha tendio del 16,67% y la C del 12,5%. Globalmente, el retraso se ha reducido en un 33,3%. Además, al no dejar slots vacíos se aprovecha al máximo la capacidad del aeropuerto.

### 1.3. Estrategias de reducción de velocidad para aplicaciones ATFM

Como se ha comentado ya, es común que los GDPs se cancelen antes de lo que estaba previsto. La estrategia de reducción de velocidad (Speed Reduction o SRed) consiste en dividir el retraso asignado en retraso en tierra y retraso en el aire [2]. Las bases de funcionamiento de esta estrategia se explican a continuación.

Tabla 1.4: Asignación de slots después de la compresión

Aerolínea	Vuelo	ETA	CTA	Retraso (minutos)
B	1	08:00	08:00	0
A	2	08:05	08:10	5
C	3	08:10	08:20	10
A	7	08:30	08:30	0
B	5	08:20	08:40	20
C	6	08:25	08:50	25
A	8	08:35	09:00	25
B	9	08:40	09:10	30
C	10	08:45	09:20	35
Total A				30
Total B				50
Total C				70
Total				150

### 1.3.1. Costes de operación de una aeronave

Para cada vuelo existen tres tipos de coste:

- Costes de combustible. Para minimizarlos, hay que volar a la velocidad de Maximum Cruise Speed (MCR).
- Costes dependientes del tiempo. Este tipo de costes son menores a más velocidad, ya que el vuelo entonces es más corto.
- Costes fijos. Son independientes del tiempo.

Los costes de combustible y de tiempo dependen de la velocidad de vuelo, mientras que los costes fijos son constantes. Esta relación puede apreciarse en la figura 1.7(a).

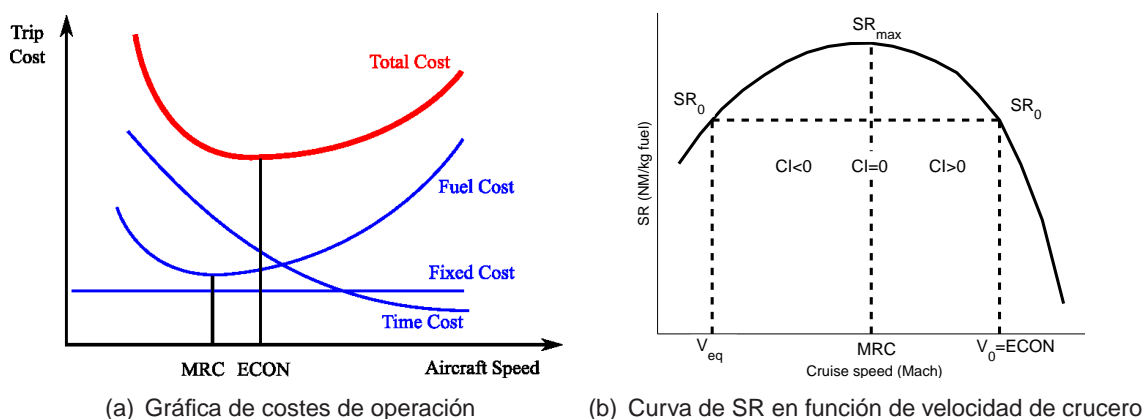


Figura 1.7: Costes de operación y alcance específico en función de la velocidad de crucero (Fuente: [5])

Así pues, dependiendo de la importancia que el operador asigne al coste temporal o al coste del combustible existirá una velocidad óptima u otra. Para realizar esta asignación de

importancia a cada tipo de coste, el Flight Management System (FMS) del avión permite que el piloto introduzca un parámetro llamado cost index (CI) [12]. Éste se define como:

$$CI = \frac{Coste_{tiempo}}{Coste_{combustible}} \quad (1.1)$$

Si el CI es cero significa que el coste del combustible es infinitamente mayor que el coste del tiempo. De esta forma, no importa cuánto tiempo va a durar el vuelo, así que el avión volará a MRC con la intención de ahorrar combustible. Si por el contrario, el CI es elevado, significa que la máxima importancia la tiene el tiempo de vuelo, por lo que se volará a la máxima velocidad operativa, respetando unos márgenes de seguridad. Cuando un piloto selecciona un CI está asignando la importancia que tiene cada uno de los costes y, por consiguiente, está asignando una velocidad óptima que minimice el coste total (indirectamente también se está seleccionando una altitud óptima de vuelo). Esta velocidad se llama ECONomic speed y en este trabajo también  $V_0$ . Las aerolíneas pueden reducir sus costes de operación haciendo una gestión eficiente del CI [13].

Dados una distancia de vuelo, una carga de pago o payload y un cost index, se fijan el nivel de vuelo óptimo, el combustible necesario y la velocidad óptima ( $V_0$ ). La figura 1.7(b) muestra la relación entre el Specific Range (SR) y la velocidad de crucero. El SR se define como la distancia que puede ser recorrida por unidad de combustible quemado y se mide en NM/kg o NM/lb. El SR máximo se consigue volando a MRC, de tal forma que se minimiza la cantidad de combustible consumido por unidad de distancia [2].

### 1.3.2. El concepto de velocidad equivalente

La velocidad equivalente ( $V_{eq}$ ) se define como la mínima velocidad que produce un Specific Range ( $SR_0$ ) igual que el que se tenía volando a la velocidad nominal  $V_0$ . El margen entre  $V_0$  y  $V_{eq}$  depende de la forma de la curva del SR de cada avión, del nivel de vuelo y del peso. A medida que se consume el combustible y el peso del avión disminuye la velocidad  $V_{eq}$  debe ser recalculada. La velocidad mínima del vuelo viene limitada por la velocidad mínima en un nivel de vuelo concreto, o bien, por el peso, con unos márgenes de seguridad [2].

### 1.3.3. Modalidades de Speed Reduction

Con lo dicho anteriormente ya se puede decir que un avión volando con speed reduction despegará antes que si estuviera totalmente retrasado en tierra. En esta circunstancia, si el GDP se cancelara con el avión ya volando, éste estaría en una mejor posición para poder recuperar el retraso.

Hay dos modalidades de Speed Reduccion:

1. En la primera, se propone que los aviones vuelen a la velocidad de mínimo consumo de combustible (Maximum Range Speed). Con esto, el consumo de combustible y las emisiones se reducen, al mismo tiempo que se absorbe el retraso asignado en el aire.

El impacto de esta estrategia fue analizada en [14] usando los datos históricos de todos los vuelos retrasados en 2006, en el Aeropuerto Internacional de San Francisco (SFO). Los resultados mostraron que entre un 5% y un 15% del retraso inicial se podía absorber en el aire. Como consecuencia de esto, para cada vuelo individual se producía un ahorro de combustible de entre un 4% y un 7%.

2. La segunda estrategia consiste en que los aviones vuelen a la mínima velocidad, de tal forma que el Specific Range (SR) se mantenga igual que en la situación inicial [2], es decir a  $V_{eq}$ . En este caso, la velocidad de los aviones será inferior que en la primera estrategia, por lo que el retraso que se pueda absorber en el aire será superior. No obstante, en este caso el consumo de combustible será el mismo y no se producirá ahorro. Esta modalidad es la que se usará más adelante para realizar las simulaciones.

En [5], se clasificaron todos los GDPs que hubieron en 2006 en SFO mediante el algoritmo K-means. Se obtuvieron tres clusters. Los centroides de estos clusters fueron usados para realizar las simulaciones con Future Air Traffic Management Concepts Evaluation Tool (FACET).

En el cluster de mañana se obtuvo que un 15,7% del total de minutos de retraso se realizó volando a velocidad reducida. En el cluster de todo el día se tuvo que este porcentaje ascendió hasta el 25,6% y en el cluster de tarde a un 46,7%. También se analizó el tiempo que se recuperó. En el cluster de mañana, cuando el GDP se canceló antes de hora, se recuperó un 22,9% más del retraso que en el caso sin speed reduction, en el de todo el día un 51,7% y en el de tarde un 154,7%.

#### 1.3.4. Aplicación de la estrategia de Speed Reduction en un GDP

La figura 1.8 muestra el funcionamiento de la estrategia de Speed Reduction para un vuelo dado [5]. Existen tres escenarios:

- Escenario (a). Tenemos un GDP convencional. Se obliga al vuelo a que llegue en la CTA. Entonces el retraso será  $D = CTA - ETA = CTD - ETD$ . Después de esperarse en tierra  $D$  minutos, se cumplirá el plan de vuelo nominal con un tiempo de vuelo de  $T_{V_0}$ .
- Escenario (b). El retraso en tierra será  $d < D$  ya que habrá una nueva hora de salida  $CTD'$ . El vuelo volará más lento de lo planeado y tardará  $T_{V_{red}}$  minutos. Como el vuelo tiene que llegar igualmente en la misma CTA se cumple la relación  $d + T_{V_{red}} = D + T_{V_0}$ .
- Escenario (c). En este escenario el vuelo sale en  $CTD'$  y vuela en  $V_{red}$  inicialmente. No obstante, el GDP se cancela mientras este vuelo está volando. En ese instante, el vuelo puede aumentar la velocidad hasta  $V_0$ . De esta manera, puede recuperar algo del retraso que se le había asignado.

Es importante señalar que si el GDP no se cancela mientras un vuelo está en el aire, la estrategia de SRed y el GDP convencional proporcionarán dos soluciones con un retraso y un consumo de combustible iguales. Sin embargo, si el GDP se cancela en el transcurso de un vuelo, entonces la estrategia de SRed proporcionará una solución con un retraso

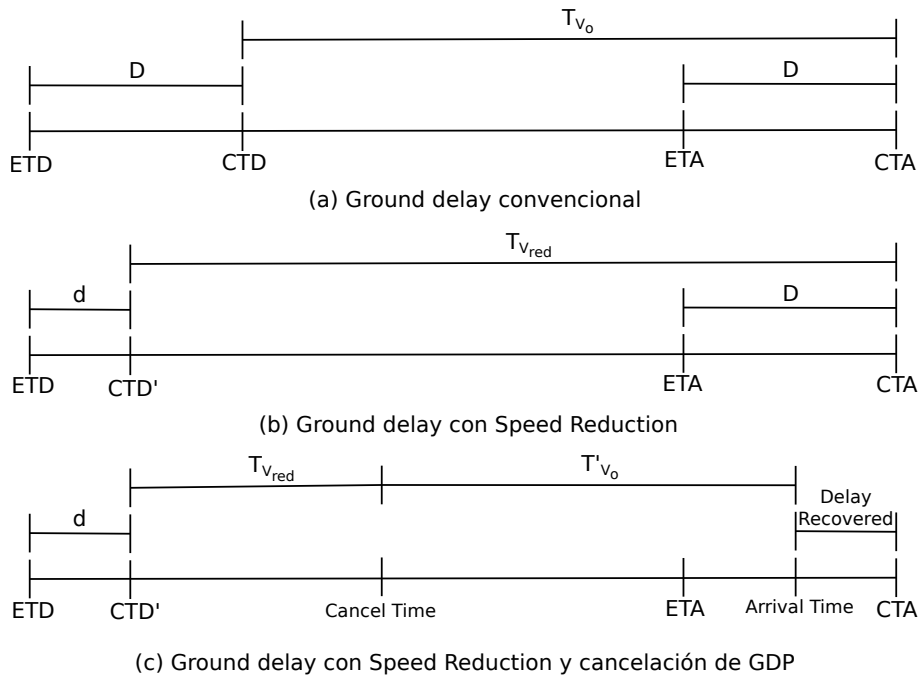


Figura 1.8: Representación esquemática de los retrasos en un GDP convencional y en diferentes escenarios de GDP (Fuente: [5])

inferior. En el caso de usar la primera modalidad de speed reduction también se habría obtenido un ahorro de combustible. Si se usara la segunda modalidad de speed reduction no se produciría ahorro de combustible, ya que ambas velocidades tienen el mismo Specific Range.



# CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE GDPs

Para realizar las siguientes estadísticas se han usado los datos de los GDPs que se aplicaron en Estados Unidos durante el año 2006. Además, también aparecen algunos aeropuertos canadienses ya que Canadá también aplica GDPs. En estos archivos aparece la información básica y descriptiva de cada GDP (ver apéndice A para más detalles), así como los diferentes mensajes realizados entre los centros de control y las diferentes aerolíneas implicadas.

En este capítulo, se analiza la información descriptiva de cada GDP para proporcionar unas estadísticas de los parámetros más característicos que definen los GDPs. Es importante destacar que para la realización de las estadísticas sólo se han tenido en cuenta aquellos vuelos que están afectados única y exclusivamente por un GDP, excluyendo así combinaciones con otras TMLs. Además, los vuelos de los que se desconocían datos fundamentales también se han obviado.

## 2.1. Análisis inicial de los GDPs

Como análisis inicial, se estudió la distribución de GDPs por aeropuerto, analizando las diferentes causas, el número de vuelos afectados y los retrasos producidos.

### 2.1.1. GDPs por aeropuerto

Durante el 2006 se produjeron 1052 GDPs. No obstante, sólo se vieron afectados 49 aeropuertos. En la tabla 2.1 se muestran los aeropuertos afectados en más ocasiones, el número de veces que el aeropuerto fue regulado, el porcentaje parcial y el porcentaje acumulativo de GDPs aplicados respecto al total del año.

En la tabla 2.1 vemos que 16 aeropuertos asumen el 90% de todos los GDPs sucedidos en 2006. En la figura 2.1(a) se reafirma lo dicho anteriormente y vemos como los 16 primeros aeropuertos son protagonistas la mayoría de las veces. En la tabla B.1 (ver Apéndice B) aparecen los datos de todos los aeropuertos, incluyendo el 10% de los aeropuertos restantes.

### 2.1.2. Causas de los GDPs

Más interesante puede resultar analizar las diferentes causas que han motivado los GDPs. Para ello, se han clasificado las distintas causas posibles en cinco categorías:

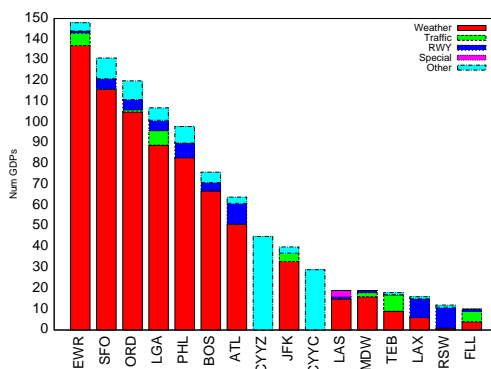
- Weather: relacionado con fenómenos meteorológicos. Por ejemplo, nubes bajas o baja visibilidad.
- Traffic: si está producido por exceso de demanda. Por ejemplo, volumen de tráfico excesivo o tráfico en terminal.
- RWY/Equipment: relacionado con problemas u obras y con fallos en equipamiento de pista. Por ejemplo, reparación de pista o problemas con las luces.

Tabla 2.1: Aeropuertos con mayor número de GDPs

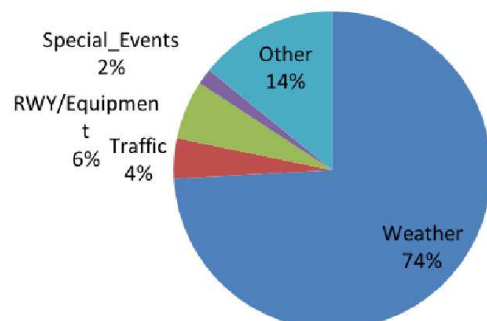
Aeropuerto	Número de GDP	Porcentaje parcial	Porcentaje acumulativo
EWR	148	14,07	14,07
SFO	131	12,45	26,52
ORD	120	11,41	37,93
LGA	107	10,17	48,10
PHL	98	9,32	57,41
BOS	76	7,22	64,64
ATL	64	6,08	70,72
CYYZ	45	4,28	75,00
JFK	40	3,80	78,80
CYYC	29	2,76	81,56
LAS	19	1,81	83,36
MDW	19	1,81	85,17
TEB	18	1,71	86,88
LAX	16	1,52	88,40
RSW	12	1,14	89,54
FLL	10	0,95	90,49

- Special events: son eventos especiales que mueven grandes masas. Por ejemplo, la Superbowl o una carrea de la Nascar.
- Other: si no se puede clasificar en ninguna de las categorías anteriores. Por ejemplo, varias causas o cuando el motivo no está registrado en la base de datos.

En la figura 2.1(a), además de apreciarse el número de GDPs por aeropuerto, también se distinguen las causas que han motivado los GDPs. En su gran mayoría (74%), los GDPs están causados por problemas con las condiciones meteorológicas, tal y como se observa en la figura 2.1(b).



(a) GDP por aeropuerto y causas



(b) Representación porcentual de las causas

Figura 2.1: Análisis del número de GDPs y sus causas

### 2.1.3. Minutos de retraso por aeropuerto

Hasta el momento se ha analizado cuántos GDPS hay en cada aeropuerto y cuáles han sido sus causas. Ahora es necesario comprobar si los aeropuertos con más GDPS son los que causan más retrasos, o bien si hay aeropuertos con menos GDPS pero éstos son mucho más importantes. Para realizar el cálculo del retraso se ha calculado considerándolo como la resta entre la OCTA (Original Control Time of Arrival) y la BETA (Base Estimated Arrival Time). La OCTA es la primera CTA que se le asigna a un vuelo, mientras que la BETA es la hora prevista de llegada que se tenía justo antes de que se publicara el GDP. Por este motivo, los datos de retraso que se han proporcionado en esta sección hacen referencia al retraso inicial real asignado.

Los aeropuertos con mayor número de retrasos se listan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Aeropuertos con mayor número de retrasos

Aeropuerto	Retraso (min)	Porcentaje parcial	Porcentaje acumulativo
ORD	4.533.341	25,14	25,14
EWR	2.591.987	14,37	39,51
LGA	2.286.558	12,68	52,18
ATL	1.969.485	10,92	63,10
PHL	1.823.049	10,11	73,21
BOS	1077.669	5,98	79,19
SFO	855.438	4,74	83,93
JFK	590.186	3,27	87,20
DEN	370.615	2,05	89,26
DFW	288.037	1,60	90,85

En el caso del análisis del número de GDPS en función del aeropuerto, el 90% de los GDPS se aplicaba en 16 aeropuertos. Ahora, el 90% del total de minutos de retraso se concentra en sólo 10 aeropuertos.

En este caso la estadística se concentra mucho más, y además no mantiene el orden de la estadística anterior. Ahora se puede ver que Chicago (ORD) es el aeropuerto con más minutos de retraso (25,14% respecto el total anual), mientras que es el tercero en número de GDPS (120, correspondiente al 11,41% del total anual).

Sin embargo, la mayoría de los aeropuertos con más retrasos aparecen también en los aeropuertos con más GDPS, pero hay dos excepciones. Los aeropuertos de Denver (DEN) y el de Dallas Fort Worth (DFW) acumulan un total de 370.615 (2,05%) y 288.037 (1,60%) minutos de retraso, respectivamente, en sólo 3 GDPS (0,29%) cada uno de ellos. En resumen, tienen el puesto vigesimoséptimo y vigesimooctavo en número de GDPS, pero el noveno y el décimo puesto en lo que se refiere al retraso. Esto significa que los 3 GDPS que se aplicaron en Denver y Fort Worth fueron de bastante importancia.

Por otro lado la tabla completa de minutos de retraso por aeropuerto puede consultarse en el Apéndice B, en la tabla B.2.

El cambio de ordenación de los aeropuertos y la mayor compactación descrita en los párrafos anteriores se visualizan en la figura 2.2.

Sin embargo, el algoritmo de ordenación del GDP es el RBS. Este algoritmo utiliza la IGTA

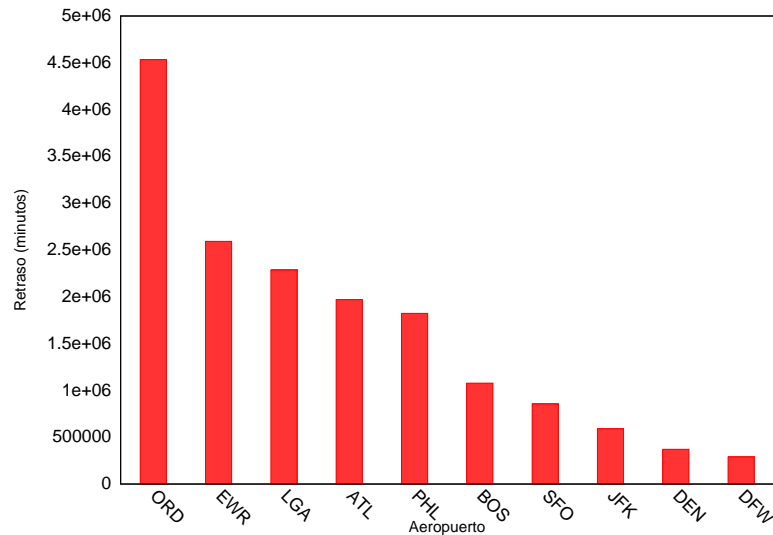


Figura 2.2: Minutos de retraso por aeropuerto

(Initial Gate Time of Arrival) para realizar la asignación y ordenación mediante la CTA. Entonces, el retraso se consideraría como la OCTA menos la IGTA menos 15 minutos, tal y como define el algoritmo. En este documento se ha optado por tener en cuenta el retraso en función de la BETA, pues se trata de un dato mucho más actualizado. Por ese motivo, en algunos casos se obtenía un retraso negativo. En estos casos se ha considerado que el retraso real es cero.

No obstante, para confirmar que los datos obtenidos teniendo en cuenta la BETA (retraso real) son diferentes a los que se obtienen con la IGTA (retraso teórico planificado), se han graficado los dos retrasos en la figura 2.3.

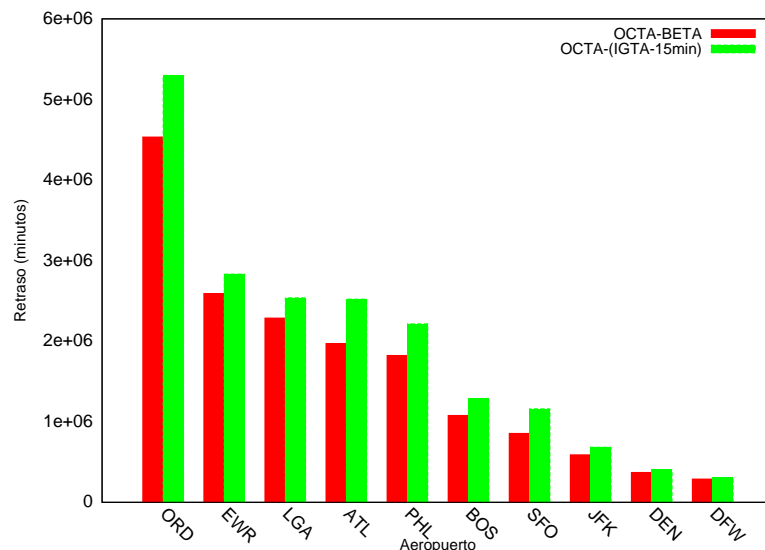


Figura 2.3: Comparación entre retraso inicial real y teórico

En la figura se observa que el retraso teórico es muy superior al real y queda justificada la elección del retraso real para la realización de las estadísticas, pues el retraso teórico

se basa en los datos de los planes de vuelos sin tener en cuenta las condiciones del momento que modifican el comportamiento de las aerolíneas.

#### 2.1.4. Vuelos afectados por aeropuerto

Una vez se han analizado el número de GDPS y el número de minutos de retraso que hay en cada aeropuerto se analiza cuántos vuelos afectados hay también por aeropuerto.

Así pues, los aeropuertos con mayor número de vuelos afectados se listan en la tabla 2.3. Se puede ver que el orden de los aeropuertos vuelve a cambiar, aunque el orden de los primeros aeropuertos no cambia mucho respecto al análisis de minutos de retraso. Se observa una relación entre el número de minutos de retraso y el número de vuelos de retraso en la mayoría de los casos.

Tabla 2.3: Aeropuertos con mayor número de vuelos afectados

Aeropuerto	Vuelos	Porcentaje parcial	Porcentaje acumulativo
ORD	92.816	24,24	24,24
EWR	52.424	13,69	37,92
ATL	51.456	13,44	51,36
LGA	40.565	10,59	61,95
PHL	35.157	9,18	71,13
SFO	24.896	6,50	77,63
BOS	21.234	5,54	83,18
JFK	11.270	2,94	86,12
CYYZ	9.912	2,59	88,71
LAS	5.928	1,55	90,26

Nuevamente, aparece Chicago como el aeropuerto con más vuelos afectados. Quizás no sea el aeropuerto con más GDPS (es el tercero), pero es el primero tanto en minutos de retraso como en vuelos afectados. La tabla completa de vuelos afectados por aeropuerto, donde también aparecen los aeropuertos que representan el 10% de los vuelos afectados, se puede ver en Apéndice B, tabla B.3. Los datos de vuelos afectados están representados en la figura 2.4.

#### 2.1.5. Análisis de los tiempos característicos de los GDPS

Analizando los archivos históricos de los GDPS en todo Estados Unidos se observa que la diferencia entre el GDP report time y el GDP start time es de 1 hora y 21 minutos de media. Sin embargo, hay que destacar que en algunos casos no se cumple la sucesión temporal lógica, es decir, según los datos el GDP start time se produce antes del GDP report time. Teniendo en cuenta que los datos almacenados en la base de datos han sido escritos manualmente se pueden considerar estos casos como errores humanos. Otra posibilidad es que la reducción brusca de capacidad se produzca de forma fortuita y que no haya tiempo de que se anuncie el GDP. Esta sucesión no lógica se produce en un 27% de todos los GDPS.

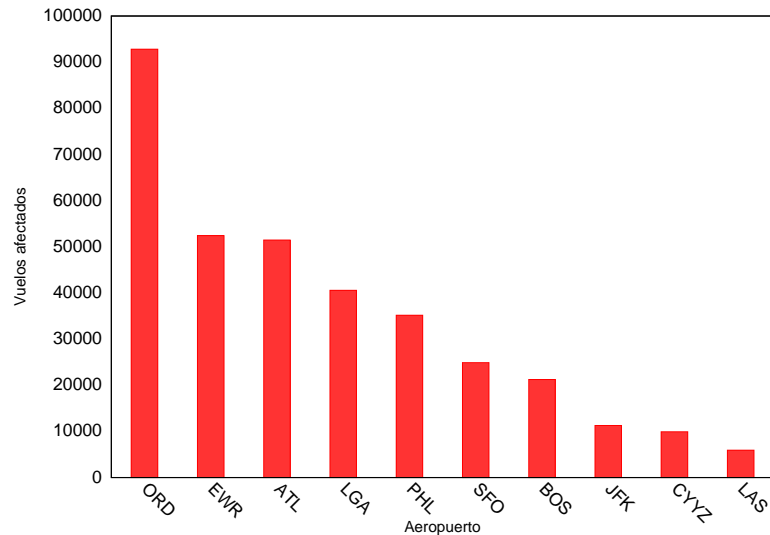


Figura 2.4: Vuelos afectados por aeropuerto

La duración de la reducción de capacidad causante de los GDPs se puede obtener mediante  $\text{GDP end time} - \text{GDP start time}$ . En este caso, se obtendría la duración teórica por la que originalmente estaría pensado el GDP. Esta duración es de media de 8 horas y 52 minutos. No obstante, esta duración suele ser conservativa y en la vida real no se suele cumplir, es decir, los GDPs suelen terminar antes de lo que se había previsto. La media en 2006 fue que los GDPs terminaron 2 horas y 28 minutos antes de lo previsto.

Sin embargo, cada aeropuerto tiene sus propias particularidades, así como comportamientos estacionales o por horas de un mismo día. Por ese motivo, el análisis realizado en el párrafo anterior es poco representativo. Con la intención de realizar un estudio más profundo de lo que está pasando se realizará una clasificación de los GDPs mediante el algoritmo K-means. El procedimiento que se ha seguido, así como los resultados obtenidos se explican a continuación.

## 2.2. Grupos de GDPs mediante algoritmo K-means

Con la intención de caracterizar los GDPs, se han clasificado todos los GDPs sucedidos en cada aeropuerto en grupos de características similares. Las variables que se han usado como criterio de agrupación son el GDP report time, el GDP start time, el GDP end time y el GDP actual end time. Dicha clasificación se ha realizado mediante el algoritmo K-means (véase el Apéndice C para más información).

Con el código que se ha empleado, los GDPs de cada aeropuerto se han podido clasificar en un mínimo de un cluster, cuando en ese aeropuerto sólo ha habido un único GDP, hasta un máximo de 8 grupos. Para determinar el número óptimo de clusters se ha usado el coeficiente de silhouette con la intención de que los GDPs pertenecientes a un mismo grupo sean lo más parecidos entre sí, pero también lo más distintos a los objetos pertenecientes a otros clusters. Este coeficiente tiene valores entre el -1 y el 1, siendo la clasificación mejor cuando esté más próximo a 1. Para obtener información ampliada sobre el coeficiente de silhouette se puede consultar el Apéndice C.

Después de realizar la clasificación para todos los GDPS y para todos los aeropuertos se han obtenido los resultados que se muestran en la tabla 2.4. En esta tabla se muestran los datos correspondientes a los 16 aeropuertos con más GDPS. Véase el Apéndice B, tabla B.4, para ver los datos completos. Hay que tener en cuenta que los aeropuertos con un único GDP se clasifican de forma perfecta en un único cluster, es decir, se le asignará el valor de 1 como coeficiente de silhouette.

Tabla 2.4: Número de clusters y coeficiente de silhouette de cada aeropuerto

Aeropuerto	Número de clusters	Coeficiente de Silhouette
EWR	3	0,35
SFO	3	0,70
ORD	3	0,45
LGA	2	0,48
PHL	2	0,48
BOS	2	0,66
ATL	3	0,51
CYYZ	4	0,37
JFK	3	0,41
CYYC	3	0,66
LAS	8	0,53
MDW	2	0,53
TEB	2	0,49
LAX	2	0,77
RSW	8	0,61
FLL	8	0,81

En este trabajo el análisis y la posterior simulación de GDPS se realizara para el caso de Newark, NJ (EWR). Los datos obtenidos del clustering de todos los aeropuertos puede consultarse en el CD adjunto.

### 2.2.1. Análisis del clustering en Newark

En este caso, el número de clústers óptimo para la clasificación ha sido 3. Con esta clasificación se ha obtenido un coeficiente silhouette de 0,35. Este dato nos indica que la clasificación es suficiente, aunque no muy buena. Para graficar los centroides de cada cluster se ha usado el gdp report time, el gdp start time y el gdp actual end time. Se ha excluido el gdp actual end time con la intención de reducir el problema a tres dimensiones para que pueda ser comprensible. El resultado es la figura 2.5. No obstante, para realizar los cálculos y la clasificación se han usado las cuatro dimensiones. Vemos que los GDPS son todos bastante similares, lo que significa que los clusters que se han generado no estan muy alejados entre sí. Por este motivo, el coeficiente de silhouette no es muy elevado.

Cada uno de los tres centroides obtenidos describe al conjunto de GDPS que contiene el propio cluster. Los centroides obtenidos, en hora local, y el número de GDPS que contiene cada cluster se detallan en la tabla 2.5.

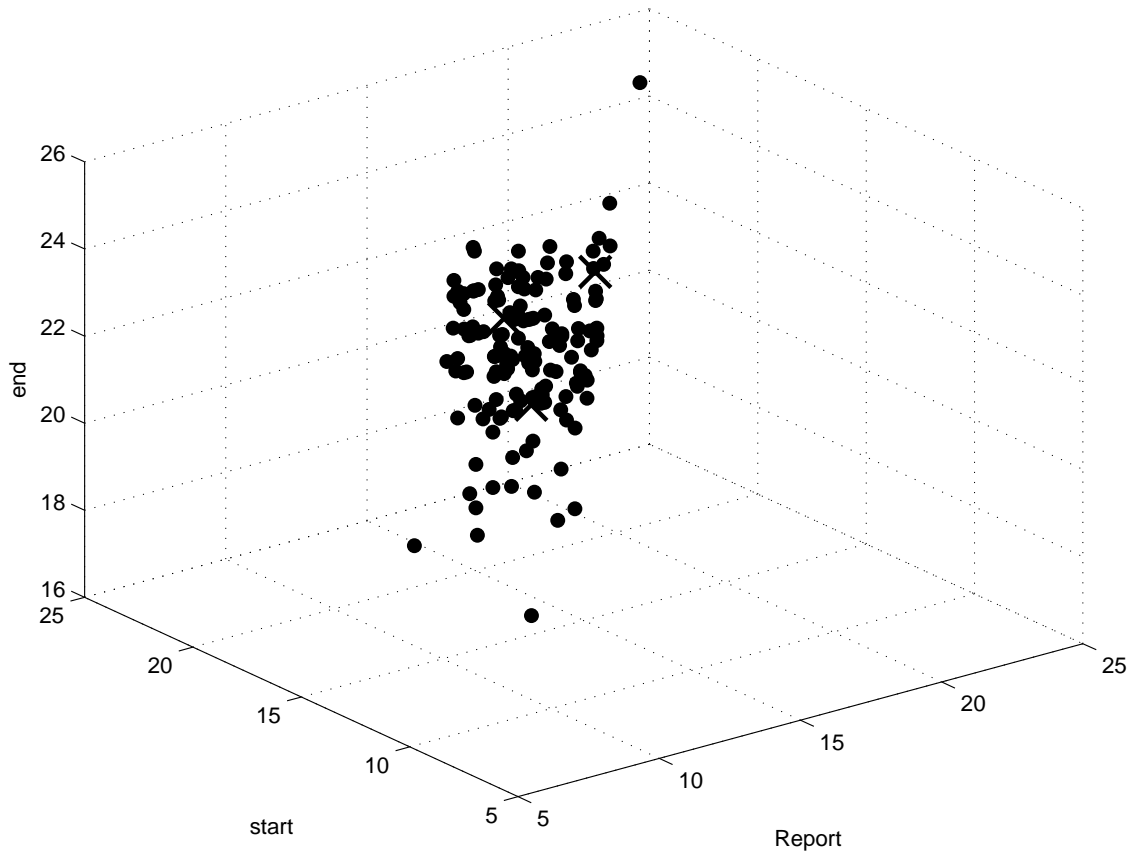


Figura 2.5: Centroides de los clusters

Tabla 2.5: Centroides de los clusters de EWR

	GDP report time	GDP start time	GDP end time	GDP actual end time	Número GDPs
Cluster 1	10:20	12:36	00:18	22:58	68
Cluster 2	16:53	16:55	23:14	21:20	16
Cluster 3	11:59	13:30	21:49	19:59	64

### 2.3. Ejemplo real de CDM

Se ha comentado anteriormente cuál es el funcionamiento normal de un GDP. Ahora se va a analizar que ocurre exactamente en realidad. Se ha elegido un GDP ocurrido en Philadelphia (PHL) con fecha 2006-08-27. Los datos generales de este GDP, en hora local, son:

- GDP report time: 14:42
- GDP start time: 16:00
- GDP end time: 19:59
- GDP actual end time: 19:59
- Causa: Weather

- Minutos de retraso: 3174
- Vuelos afectados: 200

En este caso, el GDP finaliza en la hora prevista ya que el GDP end time y el GDP actual end time coinciden.

Para realizar los gráficos del GDP de los que se hablará a continuación, sólo se han tenido en cuenta aquellos vuelos de los que se tienen los datos para cada caso. Esto significa que la suma total de vuelos en cada análisis no tiene por que ser igual al total, pues existen vuelos con datos no completos.

El número de aviones retrasados en función de los minutos de retraso asignados inicialmente producidos por el presente GDP se puede observar en la figura 2.6. Para realizar este cálculo, a la primera CTD que se le asigna a cada vuelo se le ha restado la ETD que tenía antes de que se publicara el GDP.

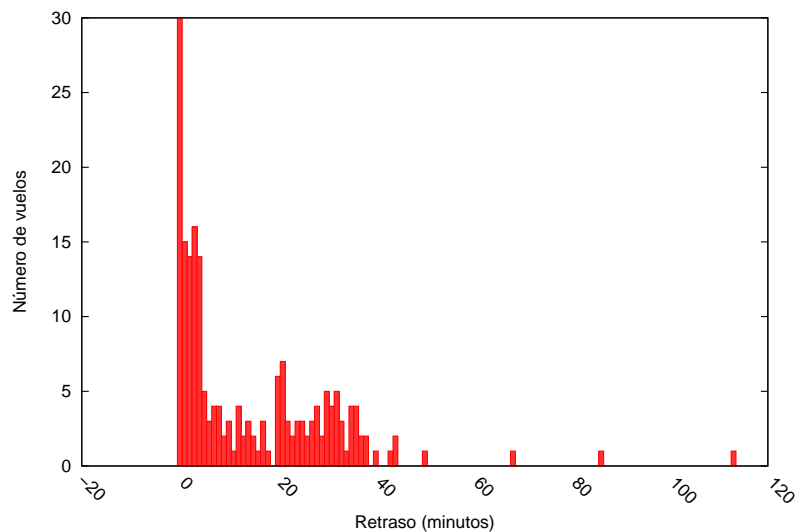


Figura 2.6: Histograma de los minutos asignados inicialmente

Sin embargo, entre que se publica el GDP hasta que los vuelos despegan, se envían múltiples mensajes con la intención de readaptar las nuevas CTDs a las mejores condiciones. Así pues, se puede calcular el retraso final en el despegue si a la última CTD se le resta la última ETD antes del despegue. Teniendo en cuenta los aviones que no se cancelan y los que la compañía no retrasa por motivos ajenos al GDP, el mismo gráfico pero con los datos reales se presenta en la figura 2.7.

Se aprecia como el número de vuelos retrasados con más minutos disminuye debido a la CDM. El intercambio de mensajes entre el ATFM y las aerolíneas permite obtener una distribución mucho mejor de las CTDs, permitiendo el mismo efecto, pero con menor perjuicio para las aerolíneas.

Para ejemplificar esto último se van a mostrar tres vuelos. El primero cumplió el GDP de forma prevista, el segundo tomó una sustitución por parte de la compañía y el tercero se canceló.

Los distintos mensajes en referencia al vuelo normal se muestran en la tabla 2.6. Los tiempos están en UTC. Así pues, el GDP report time será 18:42. Hasta que no hay un

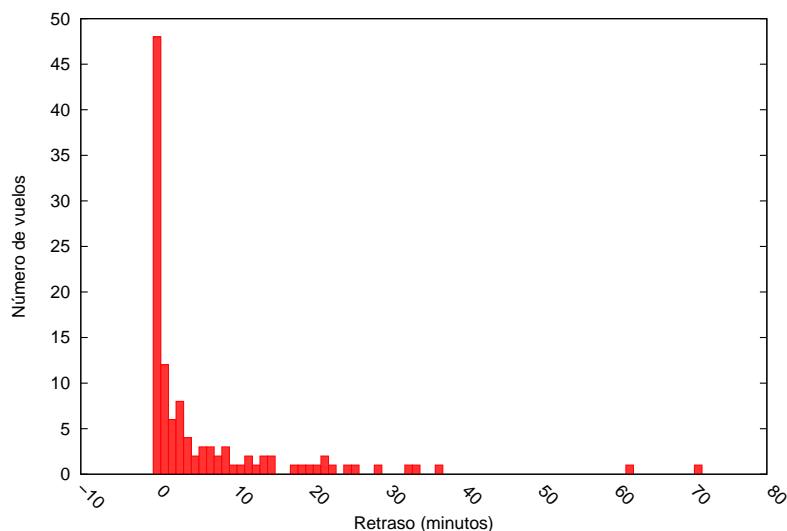


Figura 2.7: Histograma de los minutos de retraso finalmente realizados

mensaje posterior al tiempo de publicación, la CTD y la OCTD no existen, pues el GDP tampoco existe. A partir de este momento, a este vuelo se le asigna una CTD, inicialmente 21:51. El valor de esta primera CTD se guardará en OCTD. En BETD se ha guardado el valor de ETD antes del report time. Finalmente, el vuelo despegue a las 21:53, dos minutos después del CTD.

Tabla 2.6: Mensajes ADL de un vuelo normal

ADL TIME	ACID	TYPE	ALD	CX	ETD	CTD	ARTD	BETD	OCTD
21:00	NWA690	null	N	N	21:12	00:00	00:00	21:12	00:00
21:05	NWA690	null	N	N	21:16	00:00	00:00	21:16	00:00
18:44	NWA690	GDP	N	N	21:51	21:51	00:00	21:16	21:51
19:15	NWA690	GDP	N	N	21:51	21:51	00:00	21:16	21:51
20:20	NWA690	GDP	Y	N	21:51	21:51	00:00	21:16	21:51
20:50	NWA690	GDP	Y	N	21:51	21:51	00:00	21:16	21:51
21:45	NWA690	GDP	Y	N	22:02	21:51	00:00	21:16	21:51
21:55	NWA690	GDP	Y	N	21:53	21:51	21:53	21:16	21:51
22:00	NWA690	GDP	Y	N	21:53	21:51	21:53	21:16	21:51
22:05	NWA690	GDP	Y	N	21:53	21:51	21:53	21:16	21:51
22:06	NWA690	GDP	Y	N	21:53	21:51	21:53	21:16	21:51
22:10	NWA690	GDP	Y	N	21:53	21:51	21:53	21:16	21:51
22:15	NWA690	GDP	Y	N	21:53	21:51	21:53	21:16	21:51
22:30	NWA690	GDP	Y	N	21:53	21:51	21:53	21:16	21:51
23:47	NWA690	GDP	Y	N	21:53	21:51	21:53	21:16	21:51

ADL TIME: Instante del mensaje – ACID: Identificador del vuelo – TYPE: Tipo de cambio

ALD: Airline Delay – CX: Cancelación del vuelo – ETD: Estimated Time of Departure

ARTD: Actual Runway Time of Departure – BETD: Base Estimated Departure Time

OCTD: Original Control Time of Departure

Tabla 2.7: Mensajes ADL de un vuelo con sustitución

ADL TIME	ACID	TYPE	ALD	CX	ETD	CTD	ARTD	BETD	OCTD
19:35	USA12	null	N	N	19:43	00:00	00:00	19:43	00:00
15:40	USA12	null	N	N	19:49	00:00	00:00	19:49	00:00
18:30	USA12	null	N	N	19:49	00:00	00:00	19:49	00:00
18:44	USA12	GDP	N	N	20:20	20:20	00:00	19:49	20:20
18:55	USA12	SUB	N	N	19:59	19:59	00:00	19:49	20:20
19:28	USA12	SUB	N	N	19:59	19:59	00:00	19:49	20:20
19:55	USA12	SUB	N	N	19:54	19:59	19:54	19:49	20:20
20:10	USA12	SUB	N	N	19:54	19:59	19:54	19:49	20:20
20:20	USA12	SUB	N	N	19:54	19:59	19:54	19:49	20:20
20:20	USA12	SUB	N	N	19:54	19:59	19:54	19:49	20:20
20:25	USA12	SUB	N	N	19:54	19:59	19:54	19:49	20:20
20:35	USA12	SUB	N	N	19:54	19:59	19:54	19:49	20:20
20:50	USA12	SUB	N	N	19:54	19:59	19:54	19:49	20:20
20:55	USA12	SUB	N	N	19:54	19:59	19:54	19:49	20:20
21:05	USA12	SUB	N	N	19:54	19:59	19:54	19:49	20:20

Tabla 2.8: Mensajes ADL de un vuelo con cancelación

ADL TIME	ACID	TYPE	ALD	CX	ETD	CTD	ARTD	BETD	OCTD
20:05	RPA3316	null	N	N	20:10	00:00	00:00	20:10	00:00
16:10	RPA3316	null	N	N	20:15	00:00	00:00	20:15	00:00
18:44	RPA3316	GDP	N	N	20:19	20:19	00:00	20:15	20:19
18:50	RPA3316	GDP	N	N	20:19	20:19	00:00	20:15	20:19
19:00	RPA3316	SUB	N	N	20:15	20:15	00:00	20:15	20:19
20:20	RPA3316	SUB	N	N	20:20	20:15	00:00	20:15	20:19
20:25	RPA3316	SUB	N	N	20:25	20:15	00:00	20:15	20:19
20:30	RPA3316	SUB	N	N	20:29	20:15	00:00	20:15	20:19
20:35	RPA3316	SUB	N	N	20:34	20:15	00:00	20:15	20:19
20:40	RPA3316	SUB	Y	N	22:10	20:15	00:00	20:15	20:19
20:55	RPA3316	SUB	Y	Y	21:10	21:10	00:00	20:15	20:19
21:00	RPA3316	SUB	Y	Y	21:19	21:19	00:00	20:15	20:19
23:47	RPA3316	SUB	Y	Y	22:49	21:19	00:00	20:15	20:19

Los mensajes de un vuelo con sustituciones se pueden ver en la tabla 2.7. Cuando se publica el GDP, a este vuelo se le asigna una CTD a las 20:20. La compañía no está conforme y ve mejor para sus intereses cambiar este vuelo por otro propio que sale antes. Así pues, el vuelo se cambia por otro con una CTD a las 19:59. Finalmente el vuelo sale a las 19:54. Gracias a la sustitución ha podido salir 26 minutos antes de lo que le obligaban y sólo cinco minutos después de lo que tenía previsto.

Por último, los mensajes de un vuelo cancelado se muestran en la tabla 2.8. En este caso, vemos que se produce una primera sustitución para pasar de una CTD a las 20:19 a una a las 20:15. A las 20:40 la aerolínea comunica que este vuelo irá con retraso. Por ese motivo, se vuelve a sustituir y se pasa a una CTD a las 21:10, pero finalmente el vuelo se

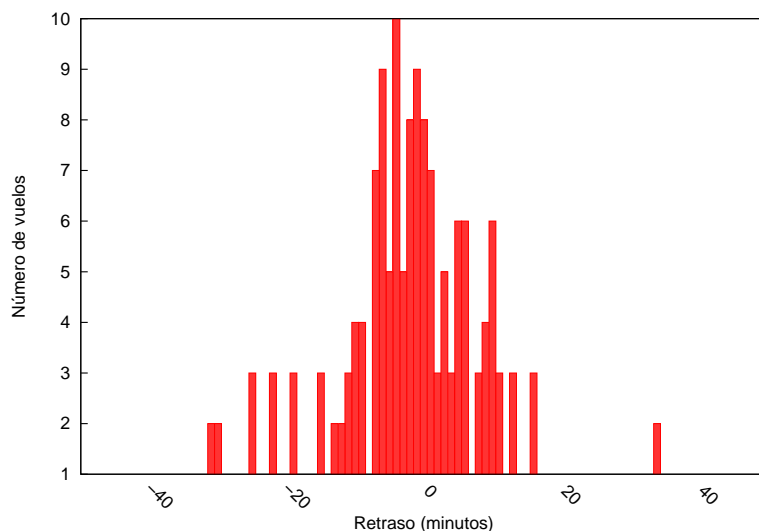


Figura 2.8: Número vuelos en función de la diferencia entre la CTA y la ARTA

cancela.

Hay que añadir que la CTD es un tiempo regulado y de obligado cumplimiento. No obstante, la CTA no es obligatoria. Esto significa que las aerolíneas pueden respetar la CTD y una vez un vuelo haya despegado, puede acelerar con la intención de recuperar el retraso que se ha hecho en tierra. Para realizar la comprobación de que esto ocurre se ha restado la CTA menos la ARTA (Actual Runway Time of Arrival), que es la hora en que realmente el vuelo aterrizó. Si el vuelo cumplió adecuadamente la restricción esta resta será igual a 0, pues el vuelo habrá aterrizado justo en el slot que le corresponde según la CTA. En el caso en que la aerolínea haya optado por acelerar, el vuelo llegará antes y la resta será positiva. El resultado de estos cálculos se representa en la figura 2.8.

Si realizamos la media de esta resta, se observa que los vuelos llegan 3,8 minutos de media después de la CTA. Esto significa que el valor medio respetaría el slot asignado por los organismos de control. Sin embargo, en la propia figura 2.8, se observan algunos vuelos que llegan bastante antes o después de su hora asignada. Ambos casos son perjudiciales para el GDP, pues la demanda prevista vuelve a cambiar.

Otras gráficas de este GDP y de todos los demás pueden consultarse en el CD adjunto de este trabajo.

# CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN CON SPEED REDUCTION

En este capítulo se va a generar un escenario con los datos de tráfico hacia EWR del 24 y 25 de Agosto de 2006 del Enhanced Traffic Management System (ETMS). El objetivo es aplicar GDPs con los datos de los centroides de los grupos obtenidos con el algoritmo K-means (ver tabla 2.5). Con estos escenarios podremos simular qué beneficios podremos obtener con la estrategia de Speed Reduction. El procedimiento que se ha seguido, así como el código usado para realizar las simulaciones, se ha tomado de la referencia [5].

Para obtener las performances de crucero se ha usado la base de datos del Airbus PEP Suite. Como sólo se dispone de las performance de Airbus, todos los aviones se han clasificado en siete categorías distintas: A300, A310, A320, A321, A330 y A340. La clasificación se ha realizado de tal forma que todos los aviones pertenecientes a una misma categoría tienen performances similares.

Se ha aplicado la estrategia de Speed Reduction a todos los vuelos, aunque hay dos excepciones:

1. Vuelos que al inicio de la simulación ya estaban volando.
2. Modelos de avión que no se han podido clasificar dentro de las categorías disponibles.

A estas excepciones, no se les ha aplicado Speed Reduction, pero sí se han simulado. En caso contrario, la demanda que se simularía no sería correcta. En ambos casos, si algún vuelo tiene asignado un retraso, lo realizará totalmente en tierra, como en el escenario de un GDP convencional. Los vuelos que inicialmente ya están volando mantendrán su tipo de avión original pues están exentos del GDP y sus performances no son necesarias.

El Cost Index que se ha usado en las simulaciones es de 60 Kg/min, excepto para las categorías A330 y A340, donde se ha seleccionado un Cost Index de 120 Kg/min. Estos valores son representativos de una operación normal [12]. Para estimar el payload, se ha usado un 80% del factor de carga en las categorías A320 y A319; mientras que para las categorías con aviones de largo recorrido se ha usado un 80% del total del payload [15].

Además, el máximo retraso que puede ser recuperado mediante la estrategia de Speed Reduction se ha calculado asumiendo que en el instante de cancelación, los vuelos que estaban en tierra despegan inmediatamente y los que ya estaban volando cambian su velocidad de  $V_{eq}$  a  $V_0$  instantáneamente.

## 3.1. Algoritmo

El algoritmo es el siguiente:

1. Clasificar los tipos de avión dentro de una familia Airbus cuando sea posible.

- Determinar las distancias de vuelo desde el aeropuerto de origen hasta el de destino. Hay que tener en cuenta que la distancia entre dos aeropuertos puede ser distinta en función de la ruta que se haya usado. Para tener esto en cuenta, se han usado los planes de vuelo definidos en el fichero de tráfico original.
- Usando el programa Airbus PEP Suite con los CI y payloads definidos anteriormente, se calculan los parámetros nominales de cada vuelo: peso inicial, niveles de vuelo, velocidades y climb steps si es necesario. La figura 3.1 describe como se obtienen los parámetros nominales de cada vuelo:



Figura 3.1: Generación del tráfico nominal (Fuente: [5])

- El tráfico inicial se simula dos veces, tal y como se muestra en la figura 3.2. En la primera simulación, la velocidad y los niveles de vuelo se mantienen en sus valores nominales. El resultado de esta primera simulación a  $V_0$  es la demanda inicial del aeropuerto de destino. En la segunda simulación, la velocidad de los vuelos se reduce hasta  $V_{eq}$ . Esta simulación nos da la demanda del aeropuerto si todos los vuelos volaran en su velocidad equivalente. Comparando las horas de llegada de las dos simulaciones, es posible calcular el máximo retraso en el aire que puede absorber cada vuelo sin perjudicar su consumo de combustible.

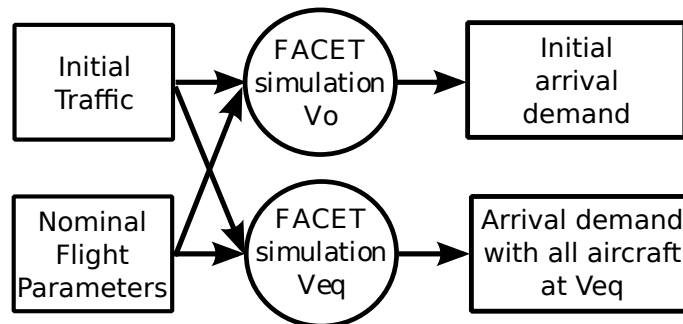


Figura 3.2: Generación de la demanda (Fuente: [5])

El programa FACET utiliza la base de datos BADA para calcular las performances de los diferentes aviones y la usa para controlar la velocidad de las aeronaves durante el vuelo. No obstante, en el caso de estas simulaciones, sólo se usa esta base de datos para el ascenso y el descenso. Cuando empieza la fase de crucero, el nivel de vuelo, la velocidad y el peso se inicializan con los datos proporcionados por el programa Airbus PEP Suit. En el caso de la simulación con los parámetros nominales, estos parámetros se mantienen constantes y se actualizan cuando hay cambios de altitud en el plan de vuelo. En cada iteración se calcula el flujo de combustible según los datos de Airbus y se actualiza el peso. Este proceso se describe en la figura 3.3(a). En el caso de la simulación con SR (ver figura 3.3(b)), en cada iteración se recalcula el peso y la velocidad equivalente. Si en el plan de vuelo hay un cambio de altitud, este también se simulará.

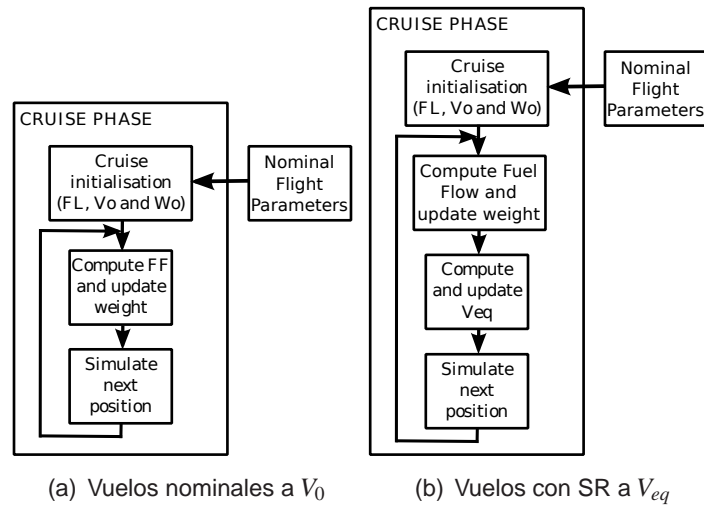


Figura 3.3: Diagrama de las simulaciones (Fuente: [5])

5. Cuando se aplica el GDP para que la demanda esté por debajo de la capacidad se establece qué retraso se asigna a cada vuelo. Como sabemos el máximo retraso en vuelo que podemos tener volando en  $V_{eq}$ , es posible dividir el retraso asignado entre retraso en tierra y retraso en aire. Este proceso se representa en la figura 3.4:

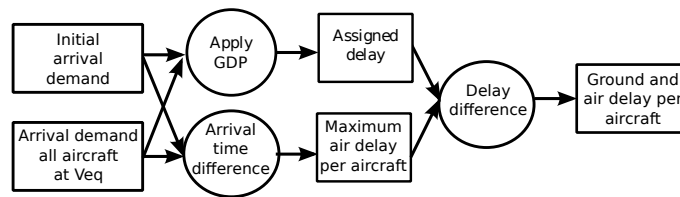


Figura 3.4: Generación del retraso (Fuente: [5])

6. El GDP se cancela antes de su hora prevista y parte del retraso puede ser recuperado.

### 3.2. Consideraciones básicas de las simulaciones

Para realizar la simulación de los GDPs en EWR, se ha considerado que la capacidad nominal del aeropuerto es de 40 vuelos por hora, tal y como se propone en [16].

El aeropuerto de Newark tiene tres pistas tal y como se puede apreciar en la figura 3.5. Se puede ver que hay dos pistas paralelas y una cruzada, necesaria para acomodar grandes demandas. Esta pista no se puede usar cuando hay nubes bajas por debajo de los 2.500 pies o la visibilidad es menor de 5 millas. Cuando esta situación ocurre, la pista queda inoperativa y normalmente se lleva a cabo un GDP. Entonces la capacidad suele reducirse a entre 28 y 32 vuelos por hora [17]. En el caso de estas simulaciones, se ha tenido en cuenta una capacidad reducida de 30 vuelos por hora.

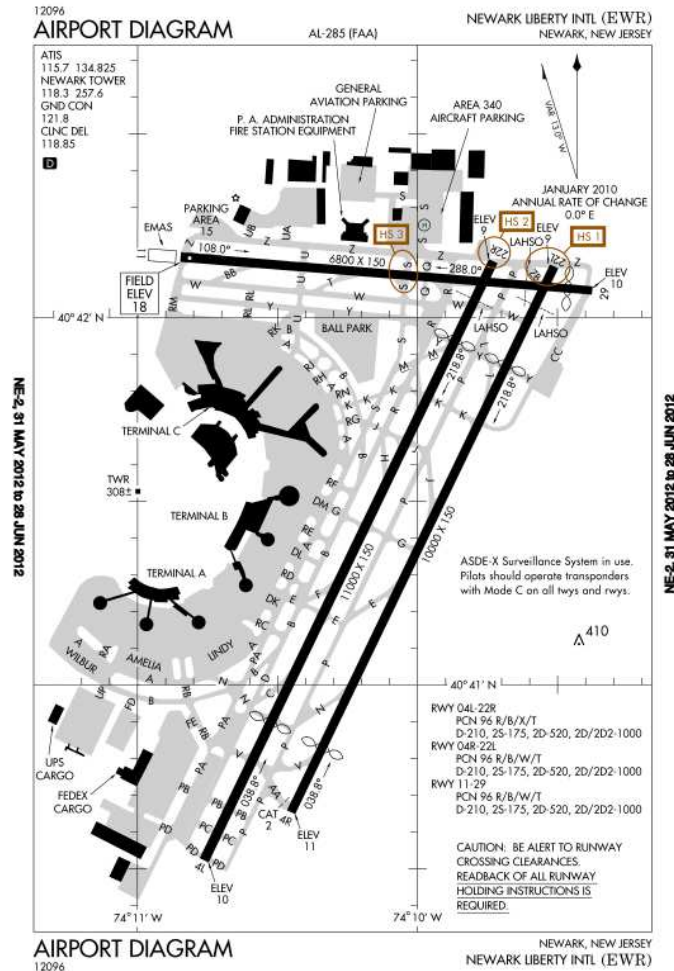


Figura 3.5: Diagrama del aeropuerto EWR (Fuente: [18])

### 3.3. Resultados

En la tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos en los tres GDPs que se han simulado. La tabla presenta el número de vuelos a los que se les ha asignado retraso, el retraso total del GDP, el máximo retraso que se le ha asignado a un vuelo y el retraso medio asignado a un avión.

Tabla 3.1: Resultados de los GDPs simulados

	Número de vuelos asignados	Retraso total asignado (min)	Retraso máximo asignado (min)	Retraso medio asignado (min)
Cluster 1	402	55364	217	137,72
Cluster 2	102	9605	115	94,17
Cluster 3	179	20569	182	114,91

Como se ha dicho anteriormente, cuando se aplica la estrategia de reducción de velocidad, parte del retraso asignado se realiza en tierra y otra parte en el aire, volando a la velocidad equivalente. En la tabla 3.2 se muestra la división que se ha producido entre

el retraso en tierra y el retraso en aire. Se observa que el porcentaje de retraso que se puede asumir en el aire es del 5 % en el primer cluster, del 4 % en el segundo cluster y del 5 % en el tercero.

Tabla 3.2: División entre retraso en tierra y retraso en el aire

	Retraso en tierra (min)	Retraso en el aire (min)	% de retraso en tierra	% de retraso en el aire
Cluster 1	52590	2774	94,99%	5,01%
Cluster 2	9219	386	95,98%	4,02%
Cluster 3	19529	1040	94,94%	5,06%

En el caso de que a un vuelo particular se le haya asignado un retraso menor que el máximo retraso que éste puede realizar volando a  $V_{eq}$ , se ha calculado una nueva velocidad, comprendida entre  $V_{eq}$  y  $V_0$ . La intención de este cambio es que cumpla con la CTA. En este caso, todo el retraso se hará en el aire y el vuelo ahorrará combustible respecto a la situación nominal. En el caso de las simulaciones realizadas, 13 vuelos se han visto en esta situación, y todos ellos pertenecen al cluster número 1.

### 3.3.1. Resultados de la cancelación prematura del GDP

En esta sección se quiere representar la cantidad de retraso que se puede recuperar en el caso de que el GDP se cancele antes de lo previsto. Este cálculo se ha realizado para los tres escenarios equivalentes a los tres clusters. Los resultados obtenidos están representados en la figura 3.6. La curva roja indica la cantidad de retraso que han acumulado todos los vuelos. La curva negra representa la cantidad de retraso que se recuperaría si el GDP se cancelase justo en ese instante.

En el escenario nominal o baseline, donde todo el retraso se realiza en tierra, el retraso que se puede recuperar no es más que el retraso que aún queda por realizar. Un vuelo podrá recuperar todo el retraso que tiene asignado si el momento de cancelación es anterior a la ETD. Si la cancelación se produce después de la ETD pero antes de la CTD, el retraso que se puede recuperar se puede calcular restando el momento de cancelación a la CTD. En cambio, si el momento de cancelación se produce después de la CTD, es decir cuando el vuelo ya ha despegado, ese vuelo no podrá recuperar retraso alguno.

En el caso que se aplique la estrategia de reducción de velocidad se puede recuperar retraso incluso después de haber despegado. El retraso que puede ser recuperado es el tiempo que un vuelo gana cuando pasa de  $V_{eq}$  a  $V_0$ , pues el tiempo de crucero se reduce. Este tiempo extra que se puede recuperar mediante la estrategia de reducción de velocidad está representada por la curva de color verde.

Al principio del GDP, aún no se ha realizado ningún retraso. Por ese motivo, si se cancela el GDP en este momento se recuperará todo el retraso que hay asignado. A medida que el tiempo pasa, el retraso se va acumulando y existe menos retraso que se pueda recuperar. El beneficio que puede aportar la aplicación de la estrategia de reducción de velocidad depende del momento en que el GDP se cancele. Si el GDP no se cancela, no se produce ninguna recuperación de retraso. Sólo cambiará dónde se haya realizado el retraso, o en tierra o en el aire.

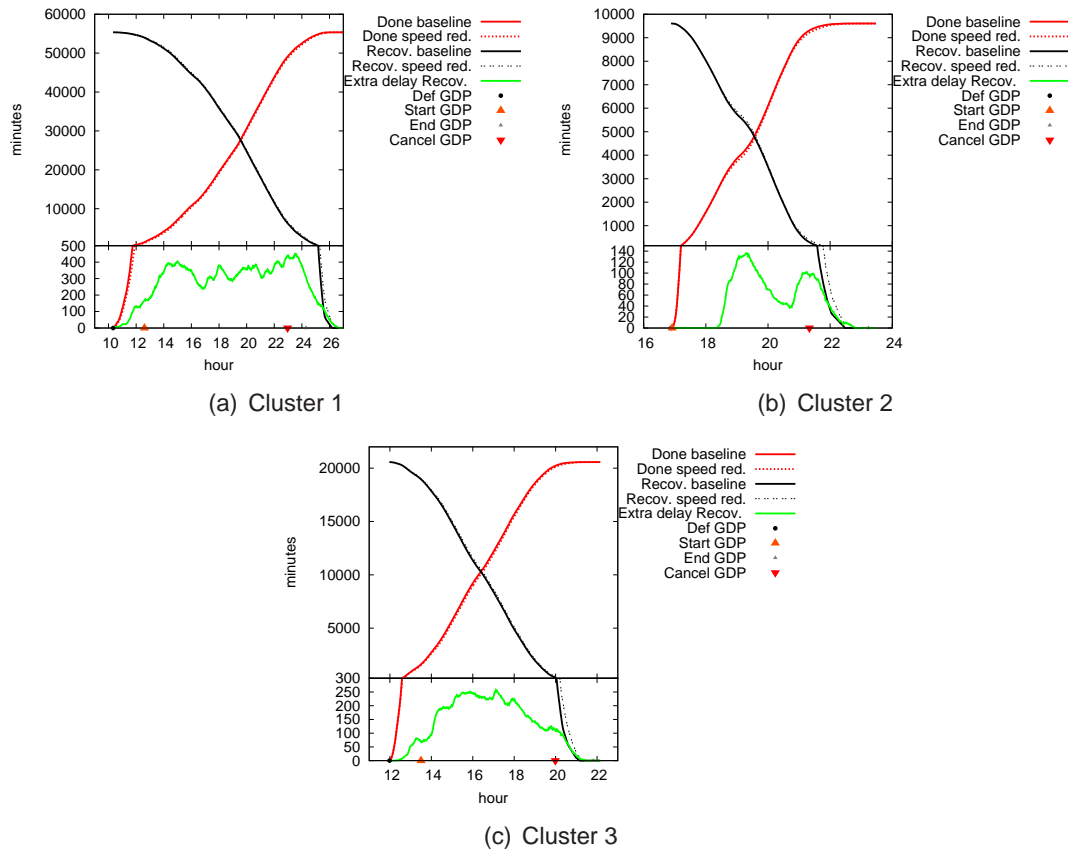


Figura 3.6: Retraso realizado y recuperado con o sin retraso en el aire

En la figura 3.7 se grafica la curva verde de la figura 3.6 que representa el retraso que se puede recuperar, el número de vuelos que hay volando en cada momento y los despegues extra que puede haber usando speed reduction. Se observa una relación entre los minutos de retraso que pueden ser recuperados y el número de vuelos que están volando a velocidad equivalente en el momento de la cancelación.

En la tabla 3.3 se muestra el número máximo de aviones volando simultáneamente en su velocidad equivalente, el número máximo de despegues extra que puede haber y el retraso máximo que puede ser recuperado.

Tabla 3.3: Valores máximos obtenidos en las simulaciones

	Máximo número de vuelos simultáneos con speed reduction	Máximo número de despegues	Máximo retraso recuperado (min)
Cluster 1	68	9	451
Cluster 2	33	8	136
Cluster 3	43	9	257

El retraso extra máximo que puede ser recuperado usando la estrategia de reducción de velocidad es de 451 minutos para el cluster 1, 136 minutos para el cluster 2 y 179 minutos para el cluster 3. Aunque estos valores parecen muy distintos, ya se ha comprobado que el número máximo de minutos de retraso que se pueden recuperar está muy relacionado con el número de aviones que simultáneamente estén volando con speed reduction. En este caso, podemos aproximar teniendo en cuenta que el momento de máxima recupera-

ción de retraso es el momento con máximo número de vuelos realizando speed reduction, pues se ha comprobado que los dos acontecimientos se producen prácticamente en el mismo instante. Entonces, si normalizamos estos datos, es decir, si dividimos el número de minutos de retraso extra máximo que puede ser recuperado entre el número de aviones máximo que están volando a speed reduction, observamos que el número de minutos extra que se puede recuperar por avión es muy similar en los tres escenarios. En el escenario correspondiente al cluster 1 tenemos una recuperación de retraso máxima de 6,63 minutos por vuelo. En el escenario del cluster 2 tenemos 4,12 minutos por vuelo y en el escenario del cluster 3 hay una recuperación máxima de 5,98 minutos por avión. Se observa que con estos valores normalizados, la estrategia de reducción de velocidad ofrece una ventaja uniforme en los tres escenarios.

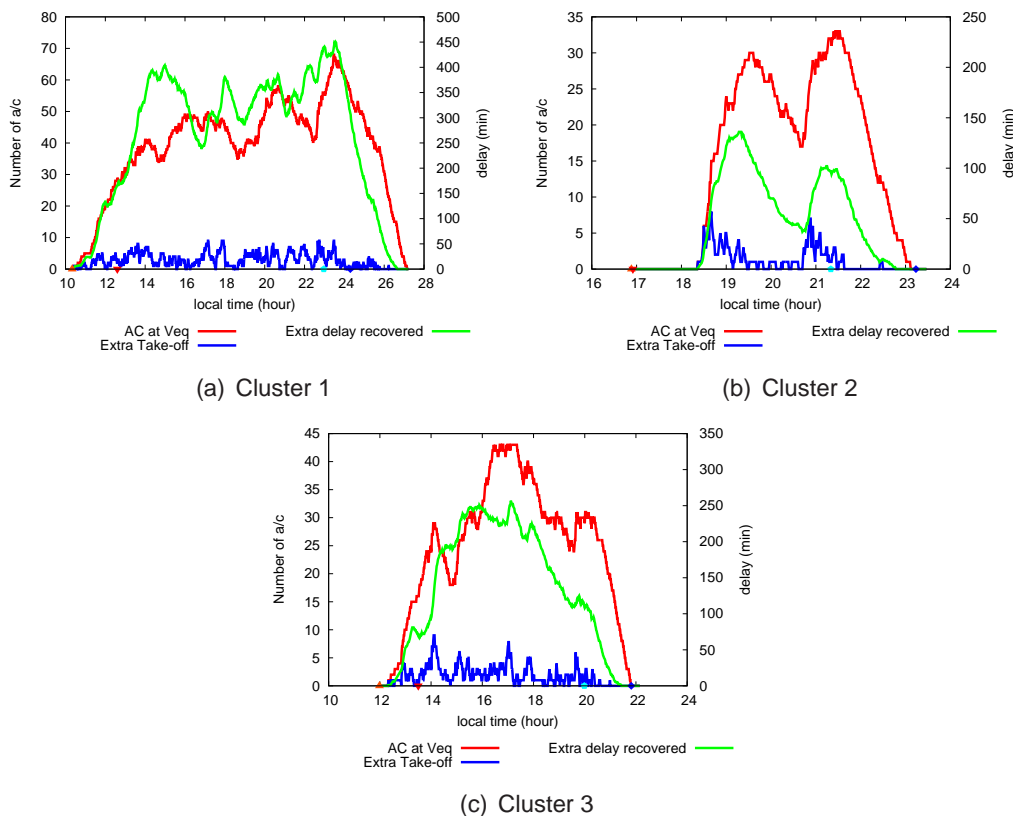


Figura 3.7: Retraso extra recuperado, vuelos volando a  $V_{eq}$  y despegues extra

### 3.3.2. Resultados en el actual end time de los centroides

Hasta el momento, se han analizado los resultados globales de las simulaciones. En esta sección se quieren analizar los resultados obtenidos de realizar las simulaciones obedeciendo todos los datos de los centroides, es decir, que el GDP se cancele en el actual end time correspondiente. Los resultados correspondientes a este estudio pueden verse en la tabla 3.4.

En el escenario del cluster 1 se han recuperado 439 minutos. Esto significa que aplicando la estrategia de reducción de velocidad se ha recuperado un 7% más de retraso. En el escenario del cluster 2 se han recuperado 97 minutos, que son un 33% más que en

Tabla 3.4: Resultados de las simulaciones en el actual end time

	Aviones volando a SRed	Retraso recuperado sin SR (min)	Retraso recuperado con SRed (min)	Retraso extra recuperado (min)	% de retraso extra recuperado respecto a sin SRed
Cluster 1	56	6.249	6.688	439	7,03%
Cluster 2	32	297	394	97	32,66%
Cluster 3	30	352	462	110	31,25%

el caso sin speed reduction. Los resultados del escenario del cluster 3 son parecidos a los del cluster 2. Se han recuperado 110 minutos correspondientes a un 31% más de recuperación de retraso.

Todo este retraso lo han recuperado los vuelos que estaban volando en ese justo instante a su velocidad equivalente. Si dividimos el número de minutos extra que se han recuperado entre el número de vuelos que estaban volando determinaremos el retraso que se ha recuperado por avión. En el escenario del cluster 1 se obtiene una recuperación de 7,84 minutos por vuelo. En el escenario del cluster 2 se tienen 3,03 minutos por vuelo y en el escenario del cluster 3 se recuperan 3,67 minutos por vuelo.

Si multiplicamos los minutos extra recuperados con la estrategia de reducción de velocidad por el número de GDPs de cada cluster (ver tabla 2.5) podemos tener una aproximación del número de minutos de retrasos que se podrían recuperar en el transcurso de un año. Para el caso del cluster 1 se obtiene un total de minutos extra recuperados de 29.852, para el cluster 2 es de 1.552 y para el cluster 3 es de 7.040.

Con todos estos resultados se puede comprobar que la estrategia de reducción de velocidad genera una posibilidad de recuperar retraso que se convierte en una realidad en el caso de que le GDP se cancele antes de lo previsto.

### 3.3.3. Efecto de la estrategia de reducción de velocidad en el global de ATM

Una de las consecuencias inmediatas que conlleva reducir la velocidad de los aviones es que hay más aviones volando simultáneamente. En la figura 3.7 se representa el número de vuelos que están volando a  $V_{eq}$  en cada momento y el número de despegues extra en comparación con la situación nominal. Como se ve en esas figuras, el número de vuelos que hay volando a  $V_{eq}$  varía durante el GDP. No obstante el número de vuelos que están volando no es un dato representativo de cuántos vuelos de más hay volando en un instante, ya que un vuelo con speed reduction o sin ella puede estar volando en el mismo instante en las dos situaciones. En realidad, si tenemos en cuenta los despegues extra que se tienen con speed reduction vemos que no superan los diez en ningún momento. Por este motivo, se puede decir que el uso de la estrategia de reducción de velocidad no influye lo suficiente como para alterar significativamente el número de vuelos que tienen que ser controlados por los centros de ATC.

# CONCLUSIONES

En este trabajo se ha visto como la creciente demanda en el transporte aéreo está provocando una saturación de las infraestructuras aeronáuticas. Teniendo en cuenta que las previsiones de crecimiento de la demanda se prolongan en el tiempo, es necesario realizar medidas para equiparar la demanda y la capacidad. En este trabajo se ha analizado ampliamente el concepto de Ground Delay Program (GDP) y su mejora con la Collaborative Decision Making (CDM).

Un primer resultado que se ha obtenido, analizando el histórico de datos de los GDP de Estados Unidos en 2006, es que el 90% de los GDPs tuvieron lugar en únicamente 16 aeropuertos, siendo el aeropuerto de Newark (EWR) el que acumuló más regulaciones. Respecto a las causas de los GDPs, después de haberlas clasificado en cinco categorías, se ha detectado que en el 74% de los casos son causados por condiciones meteorológicas adversas. Cuando se han analizado los retrasos que ha habido en cada aeropuerto, se ha observado que, en este caso, el 90% del total de minutos se repartieron en sólo 10 aeropuertos, con Chicago (ORD) como aeropuerto con más retrasos. El siguiente estudio realizado fue el de número de vuelos afectados por aeropuerto. El 90% de los vuelos afectados tienen como destino sólo 10 aeropuertos, siendo, nuevamente, Chicago (ORD) el aeropuerto con más vuelos afectados.

Se ha observado una relación entre el número de vuelos afectados y el número de retrasos. No obstante, la mayoría de los aeropuertos con mayor número de retrasos y vuelos afectados también ocupan un nivel elevado en la lista de aeropuertos con mayor número de GDPs.

En este trabajo, se ha puesto más atención en el caso de Newark (EWR) donde se han obtenido tres clusters analizando los tiempos característicos de sus GDPs. Los centroides de estos clusters se han usado para simular y analizar los efectos de aplicar la estrategia de reducción de velocidad. Hay que destacar que los GDPs de EWR son de tarde y bastante similares entre sí. Por ese motivo, los clusters encontrados son bastante próximos entre sí.

El efecto que puede tener la estrategia de reducción de velocidad tiene que ver con el momento en que se cancele el GDP y, sobretodo, en cuántos aviones estén volando a velocidad equivalente en el instante de cancelación. El mejor escenario posible sería que el GDP se cancelase en un momento donde hubiera muchos vuelos realizando reducción de velocidad. Si el GDP no se cancela durante el transcurso de un vuelo, el retraso y el consumo de éste son idénticos a los que se tendrían sin aplicar la reducción de velocidad. Los resultados obtenidos de la simulación dicen que entre un 4 y un 5% de retraso se puede absorber en el aire. Si se simulan los GDPs con los datos de los centroides y se cancelan en el actual end time correspondiente, se obtiene que con la estrategia de reducción de velocidad se puede recuperar un 7% más de retraso en el caso del cluster 1, un 33% en el cluster 2 y un 31% en el cluster 3.

Como efectos adversos de la estrategia de speed reduction puede destacarse que como consecuencia de que los aviones vuelan más lento habrá más de ellos volando simultáneamente, pudiendo incrementar la carga de trabajo de los centros ATC. Las simulaciones han proporcionado el dato de que el número de vuelos extra no es muy elevado, por lo que la aplicación de la estrategia de reducción de velocidad tiene sentido y utilidad.

Para futuras investigaciones se propone la creación de un escenario que tenga en cuenta todos los aeropuertos de Estados Unidos para poder comprobar con certeza si los pocos efectos adversos que tiene la reducción de velocidad pueden combinarse entre distintos GDPs simultáneos y producir efectos peores a los iniciales.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] George L. Donohue, Russell D. Shaver, and Eric Edwards. *Terminal Chaos. Why U.S. Air Travel is Broken and How to Fix It*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008. [5](#)
- [2] Luis Delgado and Xavier Prats. En route speed reduction concept for absorbing air traffic flow management delays. *Journal of Aircraft*, 49(1):214–224, January 2012. [5](#), [15](#), [17](#), [18](#)
- [3] FAA web. Aerospace Forecasts FY 2012-2032. [5](#)
- [4] Luis Delgado and Xavier Prats. Simulation of airborne atfm delay and delay recovery by cruise speed reduction. In *Proceedings of the First SESAR Innovation Days, 29th*, Toulouse, France, Nov 2011. SESAR. [5](#), [8](#)
- [5] Luis Delgado, Xavier Prats, and Banavar Sridhar. Cruise speed reduction for ground delay program. Unpublished document. Submitted to the Journal of Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 2012. [5](#), [16](#), [18](#), [19](#), [33](#), [34](#), [35](#)
- [6] Jing Xiong. *Revealed Preference of Airlines' Behavior under Air Traffic Management Initiatives*. PhD thesis, University of California, Berkeley, 2010. [7](#), [12](#), [13](#)
- [7] S. Carlier, I. de Lépinay, J.-C. Husatche, and F. Jelinek. Environmental impact of air traffic flow management delays. In *Proceedings of the 7th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2007)*, Barcelona, Spain, 2007. [8](#)
- [8] Bengi Manley and Lance Sherry. Analysis of performance and equity in ground delay programs. *Journal of Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(6):910–920, December 2010. [8](#), [9](#), [10](#)
- [9] Eurocontrol. *General & CFMU Systems Basis CFMU Handbook*, 2012. [8](#)
- [10] Charles N. Glover and Michael O. Ball. Stochastic optimization models for ground delay program planning with equity-efficiency tradeoffs. *Journal of Transportation Research, Emerging Technologies(C)*:1–7, February 2012. [11](#)
- [11] Robert Hoffman, William Hall, Michael Ball, Amedeo Odoni, and Michael Wambans. Collaborative decision making in air traffic flow management. [12](#), [13](#)
- [12] Airbus. *Getting to grips with the cost index*, 1998. [17](#), [33](#)
- [13] A. Cook, G. Tannera, V. Williams, and G. Meise. Dynamic cost indexing. In *Proceedings of the 6th EUROCONTROL Innovative Research Workshops & Exhibition*, pages 4–6, Paris, France, December 2007. [17](#)
- [14] Xavier Prats and Mark Hansen. Green delay programs, absorbing atfm delay by flying at minimum fuel speed. In *Proceedings of the Ninth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, Berlin, Germany, 2011. [18](#)

- [15] ELFAA - European Low Fares Association Memers, "Members' statistics", Tech. rep., 2008. [33](#)
- [16] Yi Cao, Sivakumar Rathinam, and Dengfeng Sun. A rescheduling method for conflict-free continuous descent approach. In *Proceedings of the AIAA Guidance Navigation and Control Conference*, Portland, OR, 2011. [35](#)
- [17] Ralph Tamburro and Dean Snell. New york city area airspace overview. In *Proceedings of the NBAA 64th Annual Meeting & Convention*, Las Vegas, NV, 2011. [35](#)
- [18] Faa web site: <http://aeronav.faa.gov/d-tpp/1206/00285ad.pdf>. [36](#)
- [19] Andrea Villagra. Metaheurísticas aplicadas a clustering. Master's thesis, Universidad Nacional de San Luis, Argentina, 2010. [65](#)
- [20] MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multi-variate observations. In Lucien Lecam and Jerzy Neyman, editors, *Proceedings of the 5th Berkeley Symp. Math. Statist, Prob*, pages 281–297. University of California, 1968. [65](#)
- [21] Kardi Teknomo. *K-Means Clustering Tutorial*, 2007. [65](#)
- [22] Rousseeuw P. J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20(?):53–65, 1987. [68](#)

# APÉNDICES



# APÉNDICE A. PARÁMETROS GDP

En la base de datos de la FAA de donde se han obtenido los datos para realizar las estadísticas, había un conjunto de flags que describían distintos parámetros de los GDP y de los vuelos. Estos flags y qué significa se listan a continuación.

## A.1. GDP parameters

- GDP ID. Unique GDP identifier.
- AIRPORT. 3 or 4 letter airport identifier.
- FSM DATE. Date of the FSM historical file in which this ADL would be included; a date of 1/1/6 means the ADL update time is between 1/1/6 8:00 and 1/2/6 7:59.
- GDP REASON. Reason for the GDP stated on the coversheet.
- GDP DATA TIME. Time in which the initial GDP was filed.
- GDP REPORT TIME. Report time of the initial GDP
- GDP START TIME. Start time when the GDP goes into effect.
- GDP END TIME. The planned end time for the GDP.
- GDP PURGE REFLECT TIME. ADL time in which the purge of the GDP was reflected.
- GDP CS CANCEL TIME. The GDP cancellation time entered on the ATCSCC coversheet.
- CANCEL CS REASON. Reason for the cancellation of the program as stated on the ATCSCC coversheet.
- GDP ACTUAL END TIME. Actual end time of the GDP (either the time the GDP was purged or the GDP end time).
- NUM EVENTS. Total number of events (AFP, GDP, GS, Compression, and Blankets) associated with this initiative.
- NUM GDP EVENTS. Total number of GDP events associated with this GDP.
- NUM COMPRESSIONS. Total number of compression events associated with this GDP.
- NUM BLANKETS. Total number of blanket events associated with this initiative.
- NUM GS. Total number of GS events associated with this initiative.
- NUM CS RECORDS. Number of coversheet records associated with the initiative.
- ACTIVE. Active flag.

- STATUS. Current status of the GDP. Possible values:  
P=proposed (no actual GDP issued),  
A=active (GDP currently in affect),  
R=ran to completion,  
T=terminated.

## A.2. Flight parameters

- FID ADL ID. Unique identifier for one flight's information from a single airport ADL.
- FID. Unique flight identifier.
- DEP ADL ID. Unique ADL identifier (for the ADL in which this flight was in the departure flight data).
- ARR ADL ID. Unique ADL identifier (for the ADL in which this flight was in the arrival flight data).
- AC. Air carrier; this is the first 3 letters of the ACID.
- AC NUMBER. Flight number; this is characters 4-7 of the ACID.
- DEST. Destination Airport (AKA.arrival airport) [CDM Field 27] - Lcc[c]. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- ACENTR. Arrival Center - LLL. ARTCC of the destination airport. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- ORIG. Origin (departure) airport. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- DCENTR. Departure Center - LLL . ARTCC of the origin airport. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- DFIX. Departure fix as determined by ETMS modeling prior to the receipt of a flight plan. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- EDFT. Estimated departure fix time as estimated by CDM. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- DP. Departure Procedure - LLL[LL]d. The name of the Departure Procedure (DP) taken from the historical, early intent, or NAS flight plan. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- DTRSN. Departure procedure transition fix from the historical, early intent, or NAS flight plan. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.

- AFIX. Arrival fix as determined by ETMS modeling. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- EAFT. Estimated arrival fix time as estimated by CDM. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- STAR. Standard terminal arrival route from the historical, early intent, or NAS flight plan. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- STRSN. The STAR transition fix from the historical, early intent, or NAS flight plan. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- USR. User Category - L. One character indicating the category of user operating the flight. The available values are:
  - C - Air Carrier.
  - F - Freight/Cargo Carrier.
  - G - General Aviation.
  - M - Military.
  - T - Air Taxi.
  - O - Other.
- TYPE. Aircraft Type [CDM Field 03] - Lcc[c]. Rules of precedence for setting this field, in decreasing order of priority are:
  - Value received from NAS.
  - Value received from CDM Participant.
  - Value received from OAG.
 Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- CTG. Aircraft Category - L . One character indicating:
  - J - Jets.
  - P - Props.
  - T - Turbo.
 Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- CLS. Aircraft Weight Class - L. One character indicating:
  - H - Heavy.
  - L - Large.
  - S - Small.
 Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.

- ETD PREFIX. Prefix for the ETD which indicates the data source upon which the estimate is based. Possible values:

S = based solely on OAG data,

N = an early intent flight plan has been processed for this flight,

P = a NAS flight plan has been processed for this flight,

L = the airline has provided time estimates on a CDM message,

T = the airline sent an OUT time but the flight has not yet taken off,

E = the flight is active and the time has been extrapolated from an active NAS message other than a DZ,

A = the flight is active and the time is from a NAS activation message (DZ) or an airline-provided OFF time.

- ETD Estimated Time of Departure from the Origin Airport- Lddddd. The ETD is a concatenation of two fields, the prefix and the actual ETD time. The prefix indicates the status of the flight and its source data; that is, it is a combination of what data ETMS has processed for the flight and what state the flight is in (e.g., scheduled, taxied, active). The ETD is the best, estimated runway departure time considering all data sources. The prefix also gives clues to how the ETD was modeled; however, one must be careful in interpreting the ETD modeling. The prefixes are explained below, both in terms of flight status and ETD computation. They are listed in increasing order of priority. ETMS shows the highest priority prefix; for example, if ETMS shows a "P" prefix for a flight, it may also have received "S" and "N" data. "S" Prefix (Scheduled). Status: ETMS has processed only OAG schedule data for this flight. There has been no CDM or NAS message to corroborate that the flight will operate as indicated. The flight may be controlled but is not airborne.

ETD Computation: If the flight is controlled, ETMS sets the ETD to the controlled departure time (CTD). If the flight is not controlled, ETMS models the ETD as the scheduled departure time (SGTD) from OAG plus a historical ground time estimate. ETMS applies "time-out" logic, as described below. "N" Prefix (eEarly iNtent). Status: ETMS has processed an early-intent flight plan for this flight. ETMS may have also processed OAG schedule data. There has been no other CDM message or NAS message for the flight. The flight may be controlled but is not airborne.

ETD Computation: If the flight is controlled, ETMS sets the ETD to the CTD. If the flight is not controlled, ETMS models the ETD as the departure time from the early-intent flight plan plus a historical ground time estimate. ETMS applies "time-out" logic, as described below. "P" Prefix (Proposed) Status: ETMS has received a flight plan from the NAS for the flight. There may also have been OAG schedule data or an early intent message. There have been no CDM messages. The flight may be controlled but is not airborne.

ETD Computation: If the flight is controlled, ETMS sets the ETD to the CTD. If the flight is not controlled, ETMS models the ETD as the departure time from the flight plan (P-time, PGTD) plus a historical ground time estimate. ETMS applies "time-out" logic, as described below. "L" Prefix (airLine time). Status: ETMS has processed a CDM message for the flight. ETMS may also have processed OAG schedule data,

an early-intent flight plan, and/or a NAS flight plan for the flight. The flight may be controlled but is not airborne.

ETD Computation: If the flight is controlled and the CTD is later than the LRTD and LGTD, ETMS sets the ETD to the CTD. If the CDM message contained a runway departure time estimate (LRTD) and the flight is not controlled or the CTD is earlier than the LRTD, ETMS sets the ETD to the user-provided time (LRTD). If the CDM message contained only a gate time departure estimate (LGTD) and the flight is not controlled or the LGTD is later than the CTD, ETMS models the ETD as the gate departure time plus a historical ground time estimate. ETMS applies "time-out" logic, as described below. "T" Prefix (Taxied). Status: ETMS has received a CDM message from the user with an OUT time. This indicates that the flight has pushed off the gate and is in "Taxi" status.

ETD Computation: ETMS does not use the OUT time in the ETD modeling. Since the "T" prefix indicates that ETMS has processed CDM messages for the flight, the ETD modeling is the same as for the "L" prefix. The rules are repeated here for clarity. If the flight is controlled and the CTD is later than the LRTD and LGTD, ETMS sets the ETD to the CTD. If the CDM message contained a runway departure time estimate (LRTD) and the flight is not controlled or the CTD is earlier than the LRTD, ETMS sets the ETD to the user-provided time (LRTD). If the CDM message contained only a gate time departure estimate (LGTD) and the flight is not controlled or the LGTD is later than the CTD, ETMS models the ETD as the gate departure time plus a historical ground time estimate. ETMS applies "time-out" logic, as described below. "E" Prefix (Estimated). Status: ETMS has received an active NAS message for the flight, but did not get a NAS activation message (DZ) or CDM message with OFF time. The active message is most commonly a track update (TZ), but may also be a flight plan (FZ), amendment (AF), or boundary crossing (UZ). Flight is active or completed.

ETD Computation: ETMS estimates the actual departure time from the active NAS message by modeling backwards from the position and time on the message. "A" Prefix (Actual). Status: ETMS has received a NAS activation message or a CDM message with an OFF time. Flight is active or completed.

ETD Computation: ETMS uses the actual departure time from a NAS DZ message or from a CDM-participant provided OFF time. If both are available, ETMS uses the NAS DZ time. "Time-out" Logic. If at any time a flight's departure time goes more than 5-minutes in the past and the flight is not active, ETMS adds five minutes to the ETD. ETMS does not change the prefix in this case. Thus, for any flight with a prefix of S, N, P, L, or T, the ETD may include additional "time-out" delay that ETMS has added to keep the flight current. The amount of time-out delay is shown in the field LTOD (item 79). ETMS will eventually cancel flights when the "time-out" delay gets too large (see TO field). Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.

- ETA PREFIX. Prefix for the ETA which indicates the data source upon which the estimate is based. Possible values:

E = estimated by ETMS modeling,

L = airline provided,

C = estimated by ETMS modeling but the flight is controlled,

A = from a NAS termination (AZ) message.

- ETA. Estimated time of arrival. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- ARTD. Actual Runway Time of Departure (AGTD in ETMS) - dddddd. Name changed as previous name was misleading (it is a runway time not a gate time). ARTD is the time from a NAS DZ message. If no DZ has been received, this field is blank. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- ARTA. Actual Runway Time of Arrival (AGTA in ETMS) - dddddd. Name changed as previous name was misleading (it is a runway time not a gate time). ARTA is the time from a NAS AZ message. If no AZ has been received, this field is blank. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- SGTD. Scheduled Gate Time of Departure - dddddd. Gate departure time from OAG. Null if no OAG data available for the flight. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- SGTA. Scheduled Gate Time of Arrival - dddddd. Gate arrival time from OAG. Null if no OAG data available for the flight. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- IGTD. Initial Gate Time of Departure [CDM Field A1] - dddddd. Used to save the initial gate departure time of the flight. Useful for flight data matching. IGTD is set as follows: When a flight is first created, if it is created from OAG data, CDM Participant data (from CDM message), or flight plan data, the IGTD is set to the gate departure time from that source. It will thereafter never be changed. If a flight is created from an "active" message (e.g., departure message, airborne flight plan, etc.), the IGTD is set to null. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- IGTA. Initial Gate Time of Arrival - dddddd. Used to save the original gate arrival time of the flight. Useful for flight data matching. IGTA is set as follows: When a flight is first created, if it is created from OAG data, CDM Participant data (from CDM message), or flight plan data, the IGTA is set to the gate arrival time from that source. It will thereafter never be changed. If a flight is created from an "active" message (e.g., departure message, airborne flight plan, etc.), the IGTA is set to null. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- PGTD. Proposed Gate Time of Departure - dddddd. Departure time from NAS flight plan. Null if no flight plan has been received for the flight. If multiple flight plans have been processed, shows the P time from the last one. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- PGTA. Proposed Gate Time of Arrival - dddddd. Arrival time from NAS. Generally this is initially set from the flight plan, and then updated when DZs and UZs are processed. Null if no NAS arrival time has been received for the flight. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.

- PETE. Filed ETE - dddd. The PETE field was created because the PGTD and PGTA pair do not preserve the ETE filed by the flight operator on the flight plan. PETE is set in the following manner: If a NAS flight plan has been received for this flight with an ETE field, PETE is set to the latest such value. Otherwise the value is null. PETE is in units of minutes. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- LRTD. Airline runway time of departure provided in a CDM message, if sent. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- LRTA. Airline runway time of arrival provided in a CDM message, if sent. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- LGTD. Airline gate time of departure provided in a CDM message, if sent. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- LGTA. Airline gate time of arrival provided in a CDM message, if sent. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- ERTD. Earliest runway time of departure that the airline would like to have assigned to this flight in a ground delay program; if the airline has sent this field in a CDM FC or FM message, then the most recent such time is contained in this field, otherwise, the value is null. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- ERTA. Earliest runway time of arrival that the airline would like to have assigned to this flight in a ground delay program; if the airline has sent this field in a CDM FC or FM message, then the most recent such time is contained in this field, otherwise, the value is null. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- OUT TIME. Time at which a flight pushed out from the gate as reported by the airline via the last corresponding CDM message. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- OFF TIME. Time at which a flight lifts off from the runway as reported by the airline via the last corresponding CDM message. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- ON TIME. Time at which a flight touches down on the runway as reported by the airline via the last corresponding CDM message. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- IN TIME. Time at which a flight entered the gate as reported by the airline via the last corresponding CDM message. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- OETD. Original Estimate Departure Time - OETD is set in the following manner: Whenever an ETD is updated from an FS, FC, FM, or FZ, as long as the flight is not controlled or active, the OETD is set to the new ETD. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.

- OETA. Original Estimate Arrival Time. OETA will be set in the following manner: Whenever the ETA is updated from an FS, FC, FM, or FZ, as long as the flight is not controlled or active, the OETA will be updated to the ETA. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- BETD. Base estimated departure time (OGTD in ETMS) used to save the ETD at the time a ground delay program is issued or the flight departs; can be used to compute the amount of departure delay that can be attributed to a GDP; it includes any modeled time-out delay. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- BETA. Base estimated arrival time (OGTA in ETMS) used to save the ETA at the time a ground delay program is issued or the flight departs; can be used to compute the amount of arrival delay that can be attributed to a GDP; it includes any modeled time-out delay. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- OCTD. Original Control Time of Departure. OCTD preserves the first controlled departure time (CTD, a.k.a. EDCT) for a flight. OCTD is set in the following manner: If an EDCT is received for a flight and the flight is not already controlled, the OCTD is set to the EDCT time. If an EDCT is received for a flight and the flight is already controlled, the OCTD is not changed. If an EDCT purge is received for a flight and the flight is not active or completed, the OCTD is cleared. If a flight is not currently controlled, nor was it controlled when it departed, the value of OCTD is null. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- OCTA. Original control time of arrival which preserves the first controlled arrival time (CTA) for a flight. It is set in the following manner: If an EDCT is received for a flight and the flight is not already controlled, the OCTA is set to the CTA. If an EDCT is received for a flight and the flight is already controlled, the OCTA is not changed. If an EDCT purge is received for a flight and the flight is not active or completed, the OCTA is cleared. If a flight is not currently controlled, nor was it controlled when it departed, the value of OCTA is null. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- CTD. Controlled time of departure (EDCT). Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- CTA. Controlled time of arrival. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- ASLOT. Arrival Slot [CDM Field A2] - Lcc[c].ddddddL for GDP Slots / FCAcc.dddddL for AFP Slots. When a TMI is issued, each controlled flight is assigned an arrival slot. The ASLOT is the flight's slot for the control element defined by the CTL ELEM field. Slots for AFPs can be easily identified since the first three characters will always be FCA. The ASLOT field is set as follows: If an EDCT is received for a flight, the ASLOT is assigned to the value from the message. If an EDCT purge is received for a flight and the flight is not active or completed, the ALSOT is cleared. If a flight is not currently controlled, nor was it controlled when it departed, the value of ASLOT is null. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.

- ASLOT SUFFIX. Post fix of the ASLOT.
- CTL ELEM. Controlling element; if a flight is controlled (i.e. has a CTD or CTA), this indicates the constrained NAS element for which a program or ground stop was run. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- CTL TYPE. Control Type - LL[LL]. If a flight is controlled (i.e., has a CTD and CTA), CTL TYPE indicates the specific source of the current CTD/CTA. The possible sources along with an indication of what program type they are applicable to:
  - ABRG - control times were assigned when creating a bridge for Adaptive Compression performed automatically by the ETMS (AFP and GDP).
  - ADPT - control time assigned by the ETMS adaptive compression process (AFP and GDP).
  - AFP - control times were assigned as part of an AFP-Initial or AFP-Revision (AFP).
  - BLKT - control times were assigned as part of a GDP Blanket (+/-) (GDP).
  - COMP - control times were assigned as part of a AFP-Compression or GDP-Compression (AFP and GDP).
  - DAS - control time assigned from a DAS delay to a pop-up flight (AFP and GDP).
  - ECR - control time assigned by a slot credit substitution message submitted by an Authorized FAA user (AFP and GDP).
  - GAAP - control times are from an unassigned slot being assigned to a pop-up flight (AFP and GDP).
  - GDP - control times were assigned as part of an GDP-Initial or GDP-Revision (GDP).
  - GS - control times were assigned as part of a GDP-Ground Stop (GDP).
  - RCTL - a DAS control time assigned to a flight that was at some point controlled by a GDP or AFP, which was then purged or dropped out and was re-controlled as a pop-up in another AFP. As opposed to other pop-ups, RCTL flights retains full substitution rights (AFP).
  - SBRG - control times were assigned when creating a bridge for an SCS or ECR request (AFP and GDP).
  - SCS - control times assigned by a slot credit substitution message submitted by a NAS User (AFP and GDP).
  - SUB - control times assigned by a conventional user substitution message (AFP and GDP).
  - UPD - control time or UX cancel status from an ETMS "EDCT UPDATE" command made by an Authorized FAA user (AFP and GDP).

Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- CTL EXMPT. Flag indicating if the flight was exempt in the latest GDP issued which included this flight. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.

- SL HOLD. Slot hold flag; if a flight is controlled (i.e. has CTD or CTA), the SL HOLD flag indicates whether the slot associated with this flight is being held, or would be held, by the airline for the next compression. The compression algorithm will not automatically fill slots that are held. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.

- DV REC. Diversion Recovery Flag - c. Indicates that the flight is a recovery of a flight that was previously diverted. A diversion recovery inherits data from the original flight to ensure that it is given the same degree of priority that the original flight would have received in any GDP that has been or may be run.

G - Diversion recovery segment of a flight where the destination of the original flight was changed while that flight was still proposed.

A - Diversion recovery segment of a flight where the destination of the original flight was changed after the original flight was active. (NOTE: The DVREC field simply indicates the flight is a result of a change of destination; it is not an indicator that the flight is eligible for any priority due to diversion recovery status).

Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.

- UX CNX. Flag indicating whether the flight is currently cancelled due to an EDCT UPDATE cancel, which may be used by a traffic manager to cancel a flight that is part of a GDP. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- FX CNX. Flag indicating the flight is FX canceled used by an airline to notify the FAA. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- RZ CNX. Flag indicating an RZ canceled flight that was canceled by a NAS flight plan message. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- RS CNX. Flag indicating a RS canceled flight and that was canceled by an internal ETMS RS message generated when a specialist takes an OAG flight out of the database. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- TO CNX. Flag indicating that the flight was time out canceled by ETMS because no activation message has been received within a certain time of the predicted departure time. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- DV CNX. Diversion canceled flag indicating the flight is currently canceled and was diverted to an alternative destination received from either a NAS flight plan or a CDM FM (flight modify) message. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- RM CNX. Flag indicating a remove canceled flight and that has been manually removed by an FAA traffic management specialist. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.

- ALD. Flag indicating the flight is airline delayed by a CDM message (last non-null value). Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- GDP. Flag indicating the flight is GDP delayed and that an EDCT has been applied to the flight. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- DAS. Flag indicating that an FA delay has been applied to the flight. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- GSD. Flag indicating the flight is ground stop delayed. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- TOD. Flag indicating that ETMS has timeout delayed this flight due to the fact that it has not yet departed and is at least past estimated departure time. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- CTL ALM. Unique alarm identifier.
- CDM MBR. Flag indicating whether this flight belongs to a CDM participant carrier and is eligible for the full benefits of compression Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- MAJOR. Flag indicating the airline is a major carrier; for CDM members, it indicates the carrier has substitution for the flight Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- GCD. Great circle distance in nautical miles, between the origin and the destination. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- LTOD. Length of time out delay in minutes if TOD=Y. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- NRP. Flag indicating a National Route Program flight and that the flight plan has been processed with the keyword "NRP" in field 11. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- LFG. Flag indicating a lifeguard of MEDVAC flight and that the flight plan has been processed with the keyword L-LIFEGUARD in field 11. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- III. Flag indicating that the flight is capable of utilizing CAT2 landing minimums and the flight plan has been processed with the keyword CATIII in field 11. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- ATV. Flag indicating that the flight plan has been processed with the keyword "ALTRV" in field 11. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- SWP. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.

- DVT. Flag indicating that the flight plan has been processed with the keyword "DVRSN" in field 11. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- ADC. Flag indicating that the flight plan has been processed with the keyword "ADCUS" in field 11. Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- UPT. UPT flag.
- FCA. Flag indicating a flow constrained area flight and that the flight plan has been processed with the keyword "FCA" in field 11 Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- WXR. Flag indicating a severe weather reroute flight and that the flight plan has been processed with the keyword "WXRTE" in field 11 Date Source - ADL Flight List. Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- CTL EVENT ID. Unique identifier for the initiative event that is controlling the flight at the current time; this does not include any events this flight was caught in after the flight departed.
- ADL TIME. ADL Time of the update.
- DEPARTURE FLAG. Indicates that the flight has departed.
- ACID. NAS Aircraft Identifier (AKA. flight identifier, call sign) [CDM Field 02] - Lc[cccc]. The flight identifier as it is displayed by ETMS. The ACID is populated from OAG data, CDM message, or NAS message. If ETMS has received NAS data on the flight the ACID will appear exactly as it appears in the NAS; that is, it will include any extra leading zeros. The ACID is used for display purposes in all products utilizing the ADL. The ACID may change during the lifecycle of a flight in ETMS; specifically, leading zeros may be introduced into the flight number portion of a commercial flight identifier. Date Source - ADL Flight List Definition Source - ADL / FSM Broadcast File Data Format.
- DATA START DATE. The FSM date of the first ADL received for a flight.
- AFP. AFP indicator.
- SUB. A Subbable (SUB) Flight Flag indicating whether any NAS user has substitution rights for a flight will added.

## APÉNDICE B. TABLAS COMPLETAS DE ANÁLISIS DE GDPS

Tabla B.1: Número de GDPS por aeropuerto

Aeropuerto	Número de GDP	Porcentaje parcial	Porcentaje acumulativo
EWR	148	14,07	14,07
SFO	131	12,45	26,52
ORD	120	11,41	37,93
LGA	107	10,17	48,10
PHL	98	9,32	57,41
BOS	76	7,22	64,64
ATL	64	6,08	70,72
CYYZ	45	4,28	75,00
JFK	40	3,80	78,80
CYYC	29	2,76	81,56
LAS	19	1,81	83,36
MDW	19	1,81	85,17
TEB	18	1,71	86,88
LAX	16	1,52	88,40
RSW	12	1,14	89,54
FLL	10	0,95	90,49
IAH	10	0,95	91,44
CLE	9	0,86	92,30
SEA	7	0,67	92,97
PBI	6	0,57	93,54
PHX	5	0,48	94,01
CLT	4	0,38	94,39
CYUL	4	0,38	94,77
DAB	4	0,38	95,15
DCA	4	0,38	95,53
CYVR	3	0,29	95,82
DEN	3	0,29	96,10
DFW	3	0,29	96,39
DTW	3	0,29	96,67
HPN	3	0,29	96,96
PTK	3	0,29	97,24
SDF	3	0,29	97,53
APF	2	0,19	97,72
CYHZ	2	0,19	97,91
DAY	2	0,19	98,10
IAD	2	0,19	98,29
LWB	2	0,19	98,48
MEM	2	0,19	98,67
MSP	2	0,19	98,86

ORL	2	0,19	99,05
YIP	2	0,19	99,24
ASN	1	0,10	99,33
BWI	1	0,10	99,43
CVG	1	0,10	99,52
CYYT	1	0,10	99,62
ISM	1	0,10	99,71
PDX	1	0,10	99,81
SLC	1	0,10	99,90
UNV	1	0,10	100,00

Tabla B.2: Minutos de retraso por aeropuerto

<b>Aeropuerto</b>	<b>Retraso (min)</b>	<b>Porcentaje parcial</b>	<b>Porcentaje acumulativo</b>
ORD	4.533.341	25,14	25,14
EWR	2.591.987	14,37	39,51
LGA	2.286.558	12,68	52,18
ATL	1.969.485	10,92	63,10
PHL	1.823.049	10,11	73,21
BOS	1.077.669	5,98	79,19
SFO	855.438	4,74	83,93
JFK	590.186	3,27	87,20
DEN	370.615	2,05	89,26
DFW	288.037	1,60	90,85
CYYZ	185.519	1,03	91,88
LAS	181.953	1,01	92,89
LAX	173.414	0,96	93,85
TEB	152.282	0,84	94,70
IAH	123.936	0,69	95,38
MDW	121.108	0,67	96,06
CYYC	89.875	0,50	96,55
MSP	77.106	0,43	96,98
PBI	61.606	0,34	97,32
SEA	52.255	0,29	97,61
DCA	44.824	0,25	97,86
CLE	43.273	0,24	98,10
FLL	38.481	0,21	98,32
IAD	37.860	0,21	98,53
CLT	35.426	0,20	98,72
DTW	34.691	0,19	98,91
PHX	31.967	0,18	99,09
HPN	30.029	0,17	99,26
RSW	25.211	0,14	99,40
PTK	17.902	0,10	99,50

DAB	17.830	0,10	99,60
SDF	14.501	0,08	99,68
MEM	10.376	0,06	99,73
CYUL	10.270	0,06	99,79
PDX	7.598	0,04	99,83
APF	6.151	0,03	99,87
SLC	5.030	0,03	99,89
ORL	4.747	0,03	99,92
ISM	3.287	0,02	99,94
CVG	3.245	0,02	99,96
CYVR	2.576	0,01	99,97
BWI	2.548	0,01	99,99
LWB	925	0,01	99,99
UNV	691	0,00	99,99
ASN	500	0,00	100,00
YIP	303	0,00	100,00
CYHZ	111	0,00	100,00
CYYT	34	0,00	100,00
DAY	20	0,00	100,00

Tabla B.3: Vuelos afectados por aeropuerto

<b>Aeropuerto</b>	<b>Vuelos</b>	<b>Porcentaje parcial</b>	<b>Porcentaje acumulativo</b>
ORD	92.816	24,24	24,24
EWR	52.424	13,69	37,92
ATL	51.456	13,44	51,36
LGA	40.565	10,59	61,95
PHL	35.157	9,18	71,13
SFO	24.896	6,50	77,63
BOS	21.234	5,54	83,18
JFK	11.270	2,94	86,12
CYYZ	9.912	2,59	88,71
LAS	5.928	1,55	90,26
LAX	5.012	1,31	91,57
CYYC	4.004	1,05	92,61
IAH	3.353	0,88	93,49
MDW	3.276	0,86	94,34
TEB	2.480	0,65	94,99
FLL	2.127	0,56	95,54
DFW	2.000	0,52	96,07
DEN	1.811	0,47	96,54
SEA	1.437	0,38	96,92
PBI	1.391	0,36	97,28
CLE	1.387	0,36	97,64

PHX	1.080	0,28	97,92
DTW	977	0,26	98,18
RSW	949	0,25	98,43
MSP	913	0,24	98,66
CLT	857	0,22	98,89
IAD	573	0,15	99,04
HPN	481	0,13	99,16
DCA	478	0,12	99,29
CYUL	378	0,10	99,39
CYVR	328	0,09	99,47
SDF	312	0,08	99,55
DAB	291	0,08	99,63
MEM	289	0,08	99,71
ORL	181	0,05	99,75
BWI	146	0,04	99,79
SLC	139	0,04	99,83
PTK	136	0,04	99,86
PDX	133	0,03	99,90
APF	97	0,03	99,92
CVG	96	0,03	99,95
ASN	57	0,01	99,96
YIP	43	0,01	99,97
LWB	25	0,01	99,98
DAY	23	0,01	99,99
ISM	23	0,01	99,99
CYHZ	14	0,00	100,00
UNV	13	0,00	100,00
CYYT	4	0,00	100,00

Tabla B.4: Número de clusters y coeficiente de silhouette de todos los aeropuertos

<b>Aeropuerto</b>	<b>Número de clusters</b>	<b>Coeficiente de Silhouette</b>
APF	2	1,00
ASN	1	1,00
ATL	3	0,51
BOS	2	0,66
BWI	1	0,00
CLE	8	0,92
CLT	4	1,00
CVG	1	1,00
CYHZ	2	1,00
CYUL	4	1,00
CYVR	3	1,00

CYYC	3	0,66
CYYT	1	1,00
CYYZ	4	0,37
DAB	4	1,00
DAY	2	1,00
DCA	4	1,00
DEN	3	1,00
DFW	3	1,00
DTW	3	1,00
EWR	3	0,35
FLL	8	0,81
HPN	3	1,00
IAD	2	1,00
IAH	8	0,70
ISM	1	1,00
JFK	3	0,41
LAS	8	0,53
LAX	2	0,77
LGA	2	0,48
LWB	2	1,00
MDW	2	0,53
MEM	2	1,00
MSP	2	1,00
ORD	3	0,45
ORL	2	1,00
PBI	6	1,00
PDX	1	1,00
PHL	2	0,48
PHX	5	1,00
PTK	3	1,00
RSW	8	0,61
SDF	3	1,00
SEA	7	1,00
SFO	3	0,70
SLC	1	1,00
TEB	2	0,49
UNV	1	1,00
YIP	2	1,00



# APÉNDICE C. CLUSTERING

Se conoce como clustering el proceso de agrupar un conjunto de objetos abstractos o físicos en clases similares. Pero también hay que definir el concepto de cluster. Un cluster es una colección de datos que son parecidos entre ellos y diferentes a los datos pertenecientes a otros clusters [19].

Hay muchas técnicas de clustering, pero la que se ha usado en este documento, y por lo tanto la que se va a explicar a continuación, es la que se denomina algoritmo K-means. Gran parte de la siguiente información se ha obtenido en [19], donde la información aquí mostrada está ámpliamente extendida.

## C.1. Algoritmo K-means

El algoritmo K-means fue propuesto por MacQueen en el año 1968 [20]. Este algoritmo toma el parámetro de entrada k y particiona el conjunto de n datos en los k clusters de tal manera que la similitud entre los objetos de un mismo cluster es elevada mientras que la similitud entre objetos pertenecientes a clusters distintos es baja. Dicha similitud se mide en relación al valor medio de los objetos en el cluster, lo que puede ser visto como si fuera su centro de gravedad. El algoritmo funciona como se explica a continuación. En primer lugar, selecciona aleatoriamente k objetos haciendo que éstos representen el centro del cluster (centroide). Cada uno de los objetos restantes se va asignando al cluster que sea más similar basándose en la distancia del objeto a la media del cluster. Entonces calcula la nueva media de cada cluster y el proceso sigue iterando hasta que se consigue la convergencia, es decir, se minimiza el error cuadrático medio. Todo el proceso se describe gráficamente en la figura C.1.

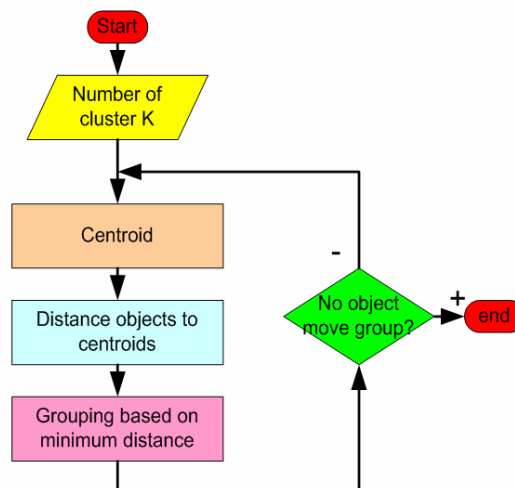


Figura C.1: Esquema algoritmo K-means (Fuente: [21])

De lo anterior se pueden obtener tres consideraciones:

- El algoritmo funciona mediante la distancia entre los puntos.
- Hay que evaluar la corrección de los clusters una vez se hayan obtenido.

- Hay que saber el número de clusters de antemano.

En las siguientes secciones se intentará enfatizar estos puntos.

### C.1.1. Medidas de distancia

La medida de distancia es un aspecto clave en este caso, pues la semejanza entre objetos a la hora de definir un cluster se establece al medir la distancia entre ellos. Hay gran variedad de medidas de distancias y a continuación se van a explicar algunas.

La medida de distancia más popular y la que se ha utilizado en este trabajo es la distancia Euclídea. Esta se define en C.1:

$$d(i, j) = \sqrt{|x_{i1} - x_{j1}|^2 + |x_{i2} - x_{j2}|^2 + \dots + |x_{ip} - x_{jp}|^2} \quad (\text{C.1})$$

donde  $i$  y  $j$  son dos objetos de dimension  $p$ .

Otra métrica ampliamente utilizada es la distancia Manhattan, definida por:

$$d(i, j) = |x_{i1} - x_{j1}| + |x_{i2} - x_{j2}| + \dots + |x_{ip} - x_{jp}| \quad (\text{C.2})$$

Tanto la distancia Euclídea como la distancia Manhattan satisfacen los siguientes requisitos matemáticos para la función de distancia:

- La distancia es un número no negativo:

$$d(i, j) \geq 0 \quad (\text{C.3})$$

- La distancia de un objeto al mismo es cero:

$$d(i, j) = 0 \quad (\text{C.4})$$

- La distancia es una función simétrica:

$$d(i, j) = d(j, i) \quad (\text{C.5})$$

- Ir directamente desde un punto  $i$  hasta un punto  $j$  nunca es más largo que pasando por un punto intermedio  $h$ :

$$d(i, j) \leq d(i, h) + d(h, j) \quad (\text{C.6})$$

Finalmente, tenemos la distancia Mikowski, que es una generalización de las distancias Manhattan y Euclídea. Se define por:

$$d(i, j) = (|x_{i1} - x_{j1}|^q + |x_{i2} - x_{j2}|^q + \dots + |x_{ip} - x_{jp}|^q)^{1/q} \quad (\text{C.7})$$

donde  $q$  es un entero positivo. Representa la distancia Manhattan cuando  $q=1$  y la Euclídea cuando  $q=2$ .

### C.1.2. Calidad de los clusters

Como se ha visto, el número de clusters es un parámetro de entrada del algoritmo k-means. Esto hace que sea necesario encontrar el número de clusters óptimo, pues la calidad de los clusters cambiará en función de este número. Existen diferentes pasos que hay que hacer para tener una buena clasificación de los datos en clusters:

1. Determinar si existe en los datos una estructura no aleatoria.
2. Determinar el número de clusters correcto.
3. Evaluar si los resultados de un cluster se adecúan a los datos sin tener referencia de información externa.
4. Comparar los resultados de un análisis con resultados externos conocidos.
5. Determinar dos conjuntos de clusters para determinar cuál es el mejor.

Los ítems 1,2 y 3 no utilizan información externa, son técnicas no-supervisadas, mientras que el ítem 4 requiere información externa. El ítem 5 puede realizarse de ambas formas, supervisada o no-supervisada.

En el caso de este trabajo sólo hemos podemos realizar métodos no-supervisados para garantizar la elección de un conjunto de clusters de calidad, pues no se disponía de información externa de apoyo. A continuación, se describirán más ampliamente los métodos de evaluación no-supervisada de clusters.

Las medidas no-supervisadas de la validez de un cluster a menudo se dividen en dos clases: medida de cohesión de los clusters (compacto, apretado), que determina lo cercanos que están los objetos dentro del cluster, y la medida de separación (aislamiento), que determina lo distinto y bien separado que está un cluster con respecto a los otros. Las medidas no-supervisadas a menudo se llaman índices internos debido a que usan sólo información presente en el conjunto de datos.

La cohesión de un cluster puede definirse como la suma de proximidades con respecto al centroide del cluster. Este valor, llamdo también distancia Intra-Cluster se expresa mediante la ecuación C.8:

$$IntraC = \frac{\sum_{i=1}^k (\sum_{x,t \in C_i} dist(x,t) / m_i)}{K} \quad (C.8)$$

donde  $C_i$  representa el cluster  $i$ ,  $K$  es la cantidad de clusters y  $m_i$  es la cantidad de elementos pertenecientes al cluster  $i$ .

La separación del cluster puede definirse como la suma de las distancias respecto a los centroides ajenos. Este valor también se puede llamar distancia Inter-Cluster y se expresa en la ecuación C.9:

$$InterC = \frac{\sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K dist(c_i, c_j)}{\sum_{i=1}^{K-1} i} \quad (C.9)$$

donde  $c_i$  representa el centroide del cluster  $i$ , y  $c_j$  representa el centroide del cluster  $j$  y  $K$  es la cantidad de clusters.

Como ya se ha comentado, estos factores se analizan mediante índices. Hay gran cantidad de ellos y éstos nos permiten optimizar el algoritmo encontrando el número de clusters óptimo para nuestro conjunto de datos. En este apéndice sólo se explicará el índice de Silhouette, pues es el que se ha utilizado en el documento.

### C.1.3. Índice de Silhouette

Este índice combina cohesión y separación. Para calcular el índice o coeficiente de Silhouette para un punto individual hay que seguir los siguientes pasos [22]:

- Para el  $i$ -ésimo objeto, calcular su distancia promedio a todos los otros objetos en su propio cluster (este valor se denota  $a_i$ ).
- Para el  $i$ -ésimo objeto y todo cluster que no contenga el objeto  $i$ , calcular la distancia promedio a todos los objetos de un cluster dado. Encontrar el mínimo de los valores con respecto a todos los clusters (este valor se denota  $b_i$ ).
- Para el  $i$ -ésimo objeto, el coeficiente Silhouette se calcula como:

$$s_i = \frac{b_i - a_i}{\max(a_i, b_i)} \quad (\text{C.10})$$

donde  $S_i$  tiene un valor entre el -1 y 1. No es deseable un valor negativo debido a que corresponde a un caso en el que  $a_i$ , la distancia promedio de los puntos en el cluster, es mayor que  $b_i$ , la menor distancia promedio a los puntos en otro cluster. Se espera que el coeficiente silhouette tenga un valor positivo ( $a_i < b_i$ ), y que  $a_i$  que esté lo más cercano a 0 posible, ya que el coeficiente asume su máximo valor de 1 cuando  $a_i = 0$ .

Para poder entender de forma más clara la salida de esta función, se hace uso de la C.2 donde se muestran los valores de Silhouette de objetos que pertenecen a diferentes clusters, es decir que los objetos que pertenecen a un mismo cluster, aparecen juntos formando un bloque. El valor de Silhouette para cada objeto muestra cuanto se parece un objeto al resto de los objetos de su propio cluster y a su vez comparado con los objetos de los otros clusters, tomando valores dentro del rango -1 y 1. Cuando un valor de Silhouette es cercano a 1, se puede intuir que ese objeto ha sido asignado al cluster apropiado. Por el contrario, cuando ese valor es cercano a -1, se puede decir que ese objeto ha sido asignado a un cluster incorrecto.

Se puede calcular el coeficiente Silhouette promedio de un cluster simplemente tomando el promedio de los coeficientes silhouette de los puntos que pertenecen al cluster. Una medida global de la bondad de un clustering se puede obtener calculando el coeficiente silhouette promedio de todos los puntos.

Para cualquier partición  $U$ , el valor de Silhouette Global  $GS_U$  puede usarse como un índice de validez efectivo para  $U$ . La expresión C.11 puede usarse para estimar el número de clusters para  $U$ . En este caso la partición con el máximo  $GS_U$  se toma como partición óptima.

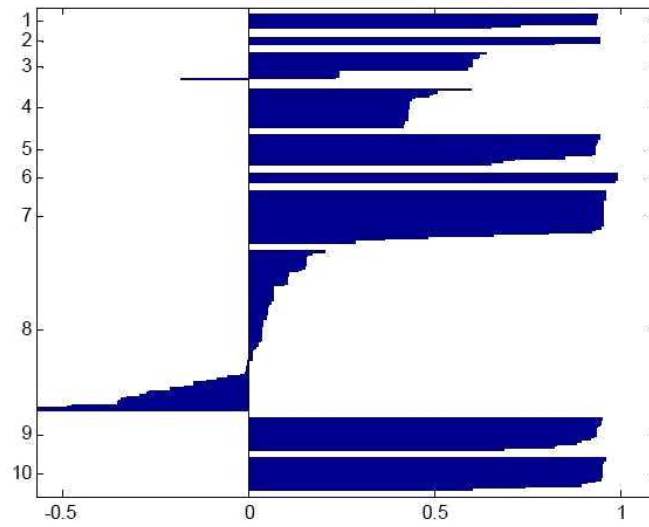


Figura C.2: Ejemplo de índices Silhouette para 10 clusters

$$GS_u = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^c S_j \quad (\text{C.11})$$