

Acercamiento al problema del disruption management

Elias Barba Moral



Supervisor: Juan José Salazar

3 de septiembre de 2017

Resumen

Las aerolíneas tienen que manejar recursos valiosos de la forma más eficiente posible. Por eso cuando se enfrentan a un imprevisto, tienen que estar preparadas para reaccionar de manera rápida. Al conjunto de decisiones que se toman al respecto se les llama 'disruption management'. En este trabajo en primer lugar se presenta el problema de forma general, intentando entender las razones, y maneras eficaces de atajarlo. A continuación se presentan en detalle una serie de soluciones, y finalmente se exponen las conclusiones.

Keywords: Gestión de la disrupción, Aerolínea, Heurístico, Operaciones de vuelo.

Abstract

Airlines have to manage many valuable resources in the most efficient way possible. This is why when a disruption occurs in their plans, they need to be prepared to react in a quick manner. The decisions taken in this area are called the disruption management. In this Master Thesis is first presented the problem in a general manner, trying to understand the reasons, on how to find efficient ways of dealing with it. Then several proposed solutions are review in more detail, and finally conclusions are posed.

Keywords: Disruption Management, Airline, Heuristic, flight operations.

Índice

1. Introducción	4
2. Disruption Management	11
2.1. Repercusiones	11
2.2. Eventos inesperados	11
2.3. Controladores de operaciones	12
2.4. Acercamientos clásicos al problema	14
3. Muestra de soluciones	17
3.1. Soluciones parciales	17
3.1.1. Cancelaciones y retrasos de vuelos	17
3.1.2. Programación de aerolíneas por el cierre temporal de aeropuertos	19
3.2. Soluciones Integrales	19
3.2.1. Recuperación de las operaciones de vuelo: Nuevos enfoques para la recuperación de pasajeros	20
3.3. Heurísticos	20
3.3.1. Aplicación de algoritmos evolutivos multiobjetivo a la gestión de disrupciones	21
3.3.2. Large Neighbourhood Search (LNS) y Simulaciones para la gestión de las disrupciones en la industria aérea	22
3.4. Otros métodos	23
3.4.1. Enfoques para incorporar robustez en la programación de aerolíneas	23
4. Conclusiones	25
5. Referencias	26

1. Introducción

El sector logístico tiene que enfrentarse a un problema: cómo responder al hecho de no poder realizar las operaciones como han sido planeadas. Este problema tiene una especial relevancia en el sector de la aviación civil. A lo largo de la introducción presentaremos algunos conceptos básicos para entender mejor este problema.

El mercado aéreo es uno de los sectores de transporte más importante del mundo. Segn [1], existen aproximadamente 2000 aerolíneas, que poseen 23000 aviones y operan en 3700 aeropuertos. En 2006 se transportaron alrededor de 2000 millones de personas en 28 millones de vuelos. El sector ha crecido cerca de un 5 % anualmente durante los últimos 30 años. El mercado está organizado en compañías aéreas que ofrecen sus servicios al público. Sin embargo, operar un avión requiere una organización especial para que el viaje de todos los pasajeros sea un éxito.

A la hora de planear sus vuelos, generalmente las aerolíneas se organizan del siguiente modo. Definen una serie de aeropuertos principales o ‘hubs’ y de ellos distribuyen los vuelos menores o ‘spokes’. El caso opuesto es el modelo ‘point-to-point’. La figura 1 muestra estos dos modelos.

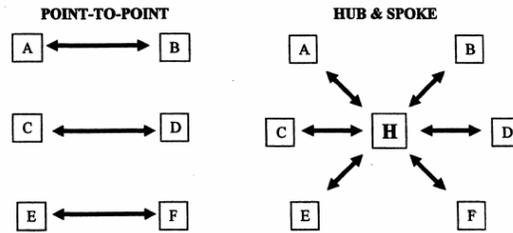


Figura 1: A la izquierda se presenta el modelo ‘point-to-point’, donde cada aeropuerto se conecta de una manera. A la derecha se muestra el modelo ‘hub-n-spoke’ donde todos los aeropuertos están conectados con el aeropuerto principal H , y de esta manera es más fácil y barato transportar a los pasajeros. [2]

Las aerolíneas suelen adoptar una combinación de estos modelos: ofrecen vuelos directos entre destinos donde saben que van a tener clientes, y también ofrecen servicios que requieren conexión. Desde el punto de vista del pasajero, siempre es preferible un vuelo directo, pero por razones de demanda no siempre es posible.

A la hora de planificar el horario de una aerolínea, es necesario decidir el tipo de representación que se va a usar. Existen principalmente 3 tipos de representación según Clausen et. al. [3]:

- Red de conexión: En esta representación hay dos tipos de nodos. Los nodos aeropuerto, que son donde empiezan y acaban las rutas de los aviones, y los nodos vuelo, que representan los diferentes vuelos. De esta manera, cada nodo vuelo debe tener una conexión de entrada y otra de salida. En la figura 3 se muestra un ejemplo, con los vuelos de la figura 2.

A sample schedule for Sample Air with aircraft rotations.

Aircraft	Flight	Origin	Destination	Departure	Arrival	Flight time
AC1	11	OSL	CPH	14:10	15:20	1:10
	12	CPH	AAR	16:00	16:40	0:40
	13	AAR	CPH	17:30	18:10	0:40
	14	CPH	OSL	18:50	20:00	1:10
AC2	21	CPH	WAV	14:30	15:30	1:00
	22	WAV	CPH	15:50	16:50	1:00
	23	CPH	WAV	17:30	18:30	1:00
	24	WAV	CPH	18:50	19:50	1:00
AC3	31	AAR	OSL	15:00	16:20	1:20
	32	OSL	AAR	17:00	18:20	1:20

Figura 2: Horario creado para los ejemplos. Se suponen tres aviones que deben relizar los 10 vuelos mostrados, entre los aeropuerto de Copenhage (CPH), Oslo (OSL), Aarhus (AAR) y Varsovia (WAV). AC corresponde con AirCrafft. [3]

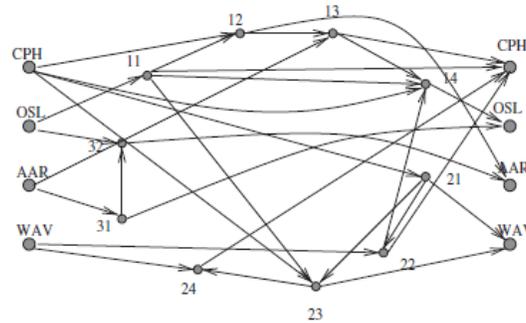


Figura 3: Ejemplo de red de conexión, correspondiente en la figura 2. Los aeropuertos de salida quedan a la izquierda, y los de llegada a la derecha. De cada aeropuerto de salida, salen todos los vuelos que pueden operar desde ese aeropuerto, en caso de disrupción. Por ejemplo, desde Aarhus puede operar el vuelo 31, que es el planeado, pero también si hubiera necesidad y recursos se puede operar el 13. [3]

- Red de línea de tiempo: En esta representación, el eje horizontal representa el tiempo, y el izquierdo la localización de los diferentes aeropuertos. Un avión va por tanto de una localización a otra cuando una conexión cambia de línea horizontal, y si la conexión se mantiene en la misma línea, significa que el avión está parado en el

aeropuerto. En la figura 4 se muestra un ejemplo, usando los mismos datos que para la anterior representación.

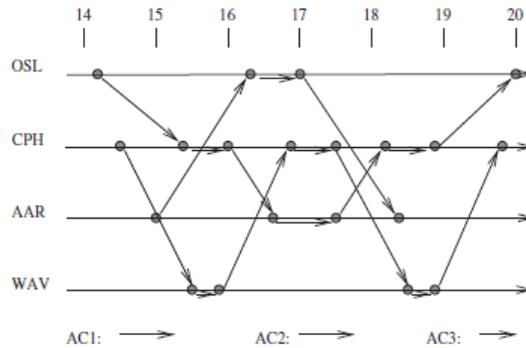


Figura 4: Ejemplo de red de línea de tiempo. Los aeropuertos vienen representados por una línea horizontal, y los vuelos son las flechas que unen dichos aeropuertos. Los vuelos también tiene periodos de espera en los aeropuertos, que son las flechas encima de las líneas horizontales. El eje horizontal representa el tiempo. [3]

- Red de bandas de tiempo: En esta representación, el eje y representa el tiempo, y el eje x los diferentes aeropuertos. Para entender esta representación es preciso definir una disrupción, en este caso usando los mismos datos que los ya provistos anteriormente. En la figura 5 está la explicación completa.

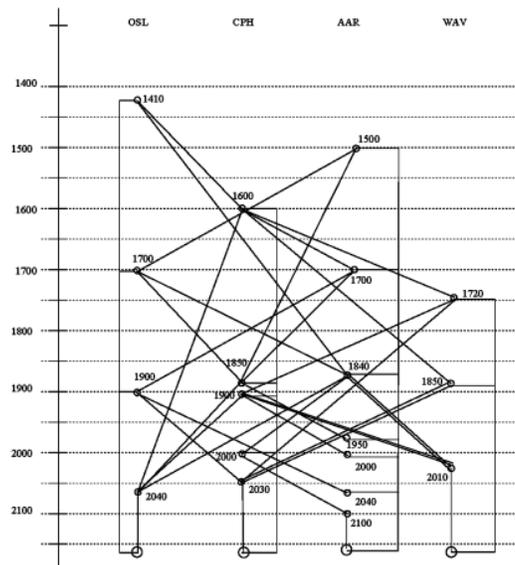


Figura 5: Ejemplo de red de bandas de tiempo. El eje vertical representa el tiempo, mientras que en el eje horizontal encontramos los aeropuertos. En este gráfico se asume que el avión 2 no está disponible de 14:00 a 21:00. Se definen bandas de tiempo de 30 minutos, que es el tiempo que se asume necesario para cambiar los pasajeros de un avión y volver a salir. Con estas definiciones, los vuelos posibles son los que aparecen en la figura. [3]

Antes de que un vuelo salga, una aerolínea ha diseñado previamente un plan que incluye: que tipo de avión usar para cada vuelo, o que tripulación puede operar el vuelo o que rentabilidad tendrá el vuelo por ejemplo. A la hora de diseñar dichos planes hay que tener en cuenta además muchas restricciones, como las restricciones de capacidad del aeropuerto, vacaciones de la tripulación o mantenimiento de los aviones. Estos planes se entregan al centro de operaciones, que se encarga de asegurar que el plan mantiene su funcionamiento. La creación de soluciones no es fácil dada la cantidad de recursos empleados en una aerolínea, y generalmente se resuelven de forma secuencial. Un ejemplo de lo complicado de dicho proceso se encuentra descrito por Salazar en [4].

A pesar del complicado proceso de creación de horarios, no siempre es posible cumplir

con lo planeado. De acuerdo con [5], el 22,4% de las salidas de vuelos dentro de Europa tuvieron un retraso mayor de 15 minutos. Es complicado traducir estas cifras a euros, pero EUROCONTROL [6] estimó el coste por minuto de retraso en 82 euros en vuelos con retrasos mayores de 15 minutos en 2008. Extrapolando los datos, se obtiene una estimación de aproximadamente 7 mil millones de euros en pérdidas. Estas cifras hacen visible el impacto que tienen las interrupciones en el normal funcionamiento de una aerolínea, y es comprensible que se dediquen recursos a intentar minimizar los gastos que esta ocasiona. A la forma de responder a estos imprevistos se llama ‘disruption management’.

De acuerdo con Gershko [7], las causas que han contribuido históricamente a que no se haya avanzado lo suficiente en la resolución del problema de la interrupción han sido:

- **Soft costs:** A la hora de estimar el impacto que tiene un problema de disruption management nos encontramos con dos tipos de gastos: Soft y Hard. Los hard costs son los costes fácilmente calculables en términos económicos como, por ejemplo, los bonos de hotel o comida para los pasajeros que están esperando un vuelo o el coste de operación de las aeronaves. Existen otros gastos mas difíciles de contabilizar, llamados soft, como el tiempo de espera por parte del pasajero o el impacto que tendrá este retraso en la imagen de la compañía.
- **Métrica:** No existe una forma única ni consensuada de medir el impacto de operaciones irregulares.
- **Ancho de banda humana:** Los problemas de disruption causan dificultades en la operación a todos los niveles dentro de una aerolínea. El proceso de conseguir una solución óptima no puede ser encomendado a una persona únicamente, dada la gran cantidad de datos que necesita manejar y nuestras limitaciones como seres humanos para procesar datos. El problema se puede dividir en partes más pequeñas (por modelo de aeronave por ejemplo) y ser resueltas de forma independiente, pero eso no garantiza que las soluciones de los problemas mas pequeños sean compatibles entre

sí, ni que la solución final sea óptima.

- Integración de datos: Otro de los problemas a los que se ha enfrentado la industria es en la dificultad de centralizar los datos necesarios para resolver los problemas.
- Apoyo directivo: Falta de implicación por parte de los directivos de las aerolíneas a la hora de dedicar recursos a la resolución de estos problemas.

Los siguientes capítulos se dedican a los siguientes temas: en el capítulo 2 se hace una descripción en detalle del problema del disruption management, en el capítulo 3 se expone una muestra de métodos desarrollados para tratar varios aspectos del problema, y finalmente en el capítulo 4 se presentan las conclusiones.

2. Disruption Management

El disruption management es un tema muy relevante en el mundo aeronáutico. Una definición básica del concepto sería: conjunto de decisiones tomadas por un controlador de operaciones que, tras un evento inesperado, intenta que este tenga la menor repercusión posible. Vamos a explicar esta definición por partes.

2.1. Repercusiones

Antes de empezar el proceso de toma de decisiones, la aerolínea debe decidir que parte del problema es a la que otorga mayor importancia. Algunos de los posibles objetivos pueden ser minimizar, por ejemplo, el costo económico de la disrupción, volver al horario original lo más rápido posible (recuperación) o minimizar el tiempo de espera de los pasajeros. Estos objetivos no tienen por qué abordarse con la misma solución y, por tanto, nos encontramos con un problema multiobjetivo.

2.2. Eventos inesperados

Los eventos inesperados se pueden clasificar en 5 tipos [8]:

- **Clima:** Las condiciones climáticas pueden crear graves problemas de horario en las aerolíneas. En el sudeste asiático la presencia de los tifones es un ejemplo [9]. Otro ejemplo son los huracanes en la costa sur de Estados Unidos [10] A un nivel más local, en el aeropuerto del norte de Tenerife, Los Rodeos, la aparición de neblina suele causar problemas [11].
- **Volumen de tráfico:** En ocasiones un aeropuerto debe atender un movimiento de aviones mayor a su capacidad, causando retrasos en las salidas de los aviones. Estos retrasos se caracterizan por ser de menor duración, y distribuirse entre todos los

vuelos de dicho aeropuerto [12]. Conjuntamente, las condiciones climáticas y los desórdenes en el volumen de tráfico suponen un 93% de los retrasos de vuelos en los aeropuertos hub. [8]

- Fallos en equipamiento: Otra de los posibles motivos son problemas en el sistema de radar o de comunicaciones, que impiden la navegación de los vuelos [13].
- Pista de despegue: Las reparaciones de emergencia en las pistas de los aeropuertos suponen otra fuente de retrasos en vuelos [14].
- Otros: Todas las otras posibles causas menos habituales de interrupciones pueden ser incluidas en este apartado, por ejemplo accidentes aéreos [15].

2.3. Controladores de operaciones

En la forma general en la que se organizan las aerolíneas, incluyen un departamento que estudia los casos de interrupción. Dichos departamentos suelen llamarse centros de control de operaciones, y a los técnicos que allí trabajan, controladores de operaciones. De acuerdo con [8], dichos centros de operaciones pueden variar en tamaño en función del tamaño de la aerolínea. Para aerolíneas grandes los controladores se dividen en grupos que se encargan de aspectos particulares, como las puertas de embarque asignadas, el catering o el repostaje de combustible. De acuerdo con el mismo artículo, las decisiones que se toman en estos centros de control, son tradicionalmente tomadas por los controladores, basadas en la experiencia de dichos controladores, aunque cada vez más se están ayudando de herramientas informáticas que les generan o sugieren soluciones.

Existen varias decisiones que pueden tomar los controladores de operaciones cuando se produce una interrupción. Las principales son retrasar un vuelo, cancelar un vuelo, hacer un intercambio (swap) entre dos vuelos y hacer transporte de un avión vacío (ferrying). El retraso y la cancelación son decisiones que los pasajeros ven directamente, y por tanto son

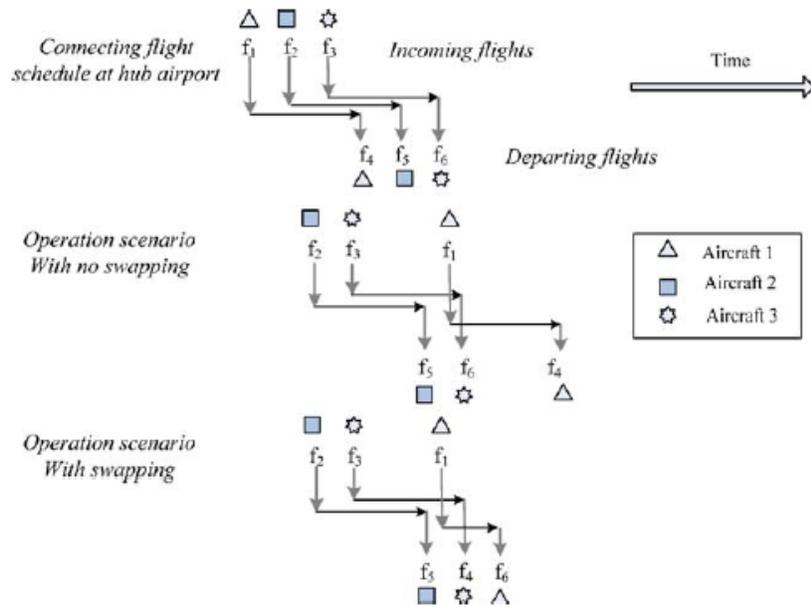


Figura 6: Ejemplo de como funcionan los intercambios. En la parte de arriba aparece el plan original, el avión 1 realiza los vuelos 1 y 4 (f_1 y f_4), el avión 2 realiza los vuelos 2 y 5 (f_2 y f_5) y el avión 3 realiza los vuelos 3 y 6 (f_3 y f_6). En la parte media vemos que se produce una disrupción que afecta al avión 1 y lo retrasa, pero puede ser resuelta de acuerdo con la imagen inferior, donde se cambia el vuelo 4 al avión 3 y el vuelo 6 al avión 1. [16]

más conocidas. La técnica del intercambio consiste, básicamente, en cambiar un recurso (avión o tripulación) de un vuelo a otro. De esta manera si un recurso se retrasa, se puede hacer un cambio con un recurso que esté disponible y así minimizar la espera, como muestra la figura 6.

Finalmente, la técnica del transporte, consiste en que un avión sin pasajeros vuele a un aeropuerto donde sea necesario. Esta técnica supone los mismos gastos que un vuelo normal, pero sin la contraprestación económica que otorgan los pasajeros. Es útil en el caso en que un avión quede parado en un aeropuerto cerrado, teniendo muchos vuelos

programados para ese avión que deberán ser cancelados si no se utiliza el transporte.

2.4. Acercamientos clásicos al problema

De acuerdo con [3], en general, el proceso de toma de decisiones respecto de una disrupción actualmente se toma secuencialmente de la siguiente forma. En primer lugar se trata de crear un horario de recuperación para los aviones, que se consideran el recurso más escaso [17]. Con la tripulación siempre se puede ser más flexible dado que las restricciones que imponen los convenios laborales de los trabajadores son más adaptables que las condiciones que impone un avión. En los primeros modelos también se priorizó la recuperación de los aviones dado que las restricciones aplicadas a la tripulación son más complejas que las de los aviones. Es una práctica generalizada el uso de tripulaciones de reserva en los principales aeropuertos para cubrir estas incidencias. Finalmente se evalúa el impacto en los pasajeros.

De acuerdo con [17], uno de los primeros artículos, en 1984, acerca del tratamiento de las disrupciones en el campo del transporte aéreo es de Teodorovic y Gubernic [18]. En este artículo se minimizan el retraso total de los pasajeros. El modelo propuesto es resuelto usando la técnica de branch and bound, y se omiten algunas restricciones importantes para facilitar la resolución. Posteriormente, Teodorovic y Stojkovic [19], presentaron otro artículo en el que resolvían el problema usando un heurístico, y con el objetivo de minimizar el número de vuelos cancelados y el retraso total de los pasajeros.

En 1996 Yan y Yang [20] fueron los primeros en combinar cancelación, retraso y ferrying. Proponen 4 modelos basados en dichas acciones, resolviéndolos con método de red simplex y relajación lagrangiana, omitiendo las restricciones de mantenimiento de las aeronaves y las restricciones referentes a la tripulación.

En 1997, Arguello et. al. [21] proponen un algoritmo heurístico avaro (greedy) de búsqueda en el vecindario para reconstruir rutas, minimizando los costes por cancelación y

los costes de operación. Junto con Arguello, Bard et. al. [22] intentan resolver el problema con los mismos objetivos, usando una representación de bandas de tiempo. Sin embargo, como en el anterior trabajo, sin considerar mantenimiento ni tripulación.

En el año 2000 Thengvall et. al. [23] presentan extensiones a Arguello [21], penalizando la desviación del horario original en la función objetivo entre otros. En 2003 Rosenberger et. al. [24] plantean un modelo con el objetivo de minimizar el coste de asignar rutas a los aviones y cancelaciones. Eggenberg [25] modela usando partición del conjunto (set-partitioning) [26] y generación de columnas [27]. En este último trabajo se consideran las condiciones de mantenimiento de la aeronaves.

Con respecto a modelos que tratan el problema de las tripulaciones, en el año 2000 Lettovsky et. al. [28] plantean un modelo que permite cancelar vuelos en base al coste que supone que sean operados por una tripulación, buscando el mínimo en una función objetivo que contiene términos que tienen en cuenta si hay cancelaciones de vuelo y transporte.

Para planes con horarios de vuelo fijados sobre los que adaptar una tripulación (es lo usual si primero se resuelve el problema de aviones) en 2007 Medard y Sawhney [29] proponen crear patrones de trabajo y asignarlos a miembros individuales posteriormente (como en la planificación). En 2005 Guo [30] resuelve el problema usando partición de conjunto, minimizando el coste operacional y el coste adicional por tripulaciones en standby (sin estar asignadas a ningún vuelo). En 2005 también Guo et. al. [31] proponen resolver el problema usando un algoritmo genético. En 2006 Nissen y Haase [32] tratan de minimizar el impacto en las tripulaciones, haciendo los cambios mínimos, usando el Branch and Price [33].

Para recuperar tripulaciones retrasando vuelos, en 2004 Abdelghany et. al [34] presentan

una herramienta de decisión que para obtener la solución final va resolviendo una secuencia de problemas de asignación óptimamente, contruyendo la solución.

Respecto a la recuperación de pasajeros, a pesar de ser la parte mas importante del negocio (los que pagan) es primordial resolver anteriormente los otros problemas, dado que sin ellos no hay servicio que ofrecer. En 1997 Lettovsky [35] plantea un modelo, dando prioridades a los pasajeros en función de su origen y destino, una vez los problemas de avión y tripulación han sido satisfechos. En 2006 Bratu y Banhart [16] presenta dos modelos donde se retrasan y cancela vuelos, buscando minimizar entre otros el retraso de los pasajeros. En 2008 Zhang y Hansen [36] introducen el transporte de pasajeros por tierra como alternativa para vuelos cortos. Dicho transporte puede ser al destino o a aeropuertos cercanos. Finalmente en 2010 Eggenberg et. al. [37] presentan un modelo que puede ser usado para aviones, tripulaciones o pasajeros, que reduce los tiempos de espera, pero no en un tiempo suficientemente corto, como se requiere.

Respecto a las soluciones integrales al problema, Lettovsky presenta un modelo con una función objetivo que se enfoca en el máximo ingreso por pasajero, menos el coste de operación de avión y menos el coste de operación de tripulación. En 2006 Bratu y Banhart [16] presentan un modelo que ya he tratado. En 2008 Abdelghany et. al. [38] desarrollan una herramienta muy completa y eficaz, que únicamente no contempla el mantenimiento de los aviones. En 2010 Jafari y Seyed [39] [40] presentan un modelo enfocandose en la rotación de los aviones y el destino final de los pasajeros, pero no considera mantenimiento y límite de tiempo, y además no es efectivo en el corto plazo.

3. Muestra de soluciones

Como se muestra en el capítulo anterior, desde el inicio de la investigación en este campo se han desarrollado muchos modelos para afrontar las disrupciones. En este capítulo presentaremos una serie de ejemplos en más detalle, estructurados en función de sus características.

3.1. Soluciones parciales

Sobre todo en las etapas iniciales de la investigación el problema de la disrupción se trató de atacar por pequeños tramos, más manejables. Algunos ejemplos ya han sido mencionados en el capítulo anterior. Actualmente también se sigue trabajando en encontrar buenas soluciones que resuelvan los problemas parciales, como la recuperación de los aviones, o las tripulaciones por separado. Hay muchos trabajos al respecto [3], pero aquí presentaremos una pequeña muestra:

3.1.1. Cancelaciones y retrasos de vuelos

En 1993 Jarrah et. al. [41] presentan dos modelos para intentar resolver el problema de organizar el horario de una aerolínea después de una disrupción. El objetivo es minimizar los costes económicos. La representación definida para el problema es la de red de conexión, como se puede ver en la figura 7.

El primer modelo tiene como herramienta la posibilidad de retrasar vuelos, y permite el intercambio y transporte. Se define matemáticamente, con sus restricciones, teniendo 4 variables binarias: el vuelo f se mantiene de acuerdo con el plan inicial o no, el vuelo f se reasigna al avión a o no, el vuelo f se asigna a un avión que no tiene plan o que se transporta al aeropuerto de origen del vuelo o no, o si el vuelo f se asigna a un avión que estaba fuera de operación pero es capaz de volver a una determinada hora.

El segundo modelo puede hacer cancelaciones, además de intercambio y transporte. A este

modelo, además de las variables anteriores, se le une una variable que indica si un vuelo se cancela o no.

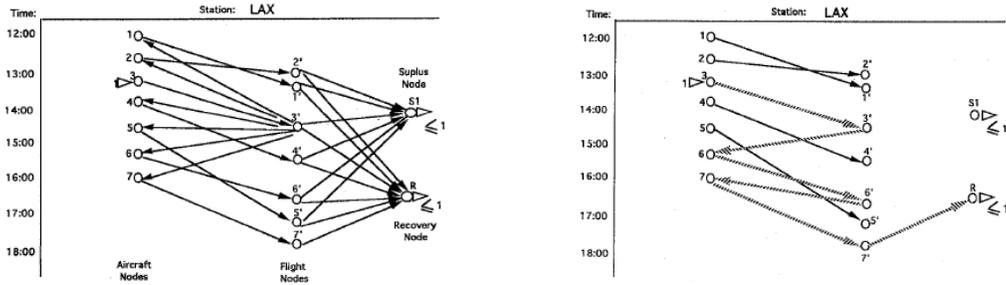


Figura 7: Ejemplo de modelo de red. La figura de la izquierda muestra el diseño de la red. En el eje vertical está la hora y en el eje horizontal, las tres columnas indican los aviones, los vuelos y los puntos de recuperación(Recovery) y de excedente(Surplurs) respectivamente. En este caso el avión 3 tiene que ser reparado, y no estará disponible hasta las 16:30, que es donde está el punto de recuperación. El sentido de las flechas no importa, en principio cualquier vuelo puede ser servido desde el punto de recuperación, de excedente o por los vuelos previamente determinados, a excepción del avión 3, que se encuentra en el punto de recuperación por las causas mencionadas. En la figura de la derecha vemos el ejemplo de una posible solución, donde el vuelo 3' es operado por el avión 6, el vuelo 6' es operado por el avión 7, y el vuelo 7' es operado por el avión 3 desde el punto de recuperación. [41]

Los modelos matemáticos son resueltos usando el algoritmo de Busacker-Gowen [42]. Para el modelo con retrasos, el algoritmo genera en poco tiempo soluciones válidas que reducen el tiempo de desuso de los aviones, y por tanto los retrasos. Funciona especialmente bien para aeropuertos con alta densidad de vuelos. Para el modelo con cancelaciones, el algoritmo también ofrece soluciones rápidamente. Este trabajo está pensado como un posible apoyo para los controladores de vuelo, para ayudarles a agilizar y mejorar el proceso de decisión, y en ninguna manera es una solución completa. Omite detalles como

las revisiones periódicas que deben pasar los aviones en determinados aeropuertos, o la organización de la tripulación.

3.1.2. Programación de aerolíneas por el cierre temporal de aeropuertos

En 1997 Yan y Lin [43] presentaron un modelo para lidiar específicamente con los retrasos sufridos cuando un aeropuerto está cerrado. Esto es una disrupción habitual que puede ser debida tanto a condiciones meteorológicas, como a obras en la pista de un aeropuerto con pista única. El objetivo de este modelo es minimizar el tiempo desde que se produce la disrupción a cuando se vuelve al plan original, y dentro de ese tiempo encontrar la solución más provechosa. La representación usada para describir el problema es la de una red de línea de tiempo.

En este modelo, un avión puede estar volando, en tierra esperando su siguiente servicio, parado por la noche o moviéndose a otro aeropuerto para cubrir una disrupción (ferrying). Se definen tres posibles estrategias a seguir, recomendándose elegir la que mejor se adapte y construir el modelo de acuerdo con las necesidades de la compañía. Las estrategias consisten en retrasar vuelos, cancelación de vuelos de poco valor para destinar esos recursos a vuelos con más valor y moverse a otro aeropuerto.

Para resolver los modelos se usaron dos tipos de algoritmos. El método de red simplex para la estrategia de moverse a otro aeropuerto [44] y el método de relajación lagrangiana con subgradientes [45] para los otros. Se usaron datos de una aerolínea taiwanesa para probar los modelos, y los modelos obtuvieron soluciones con éxito y velocidad, aunque se probaron en pocos casos.

3.2. Soluciones Integrales

Las soluciones integrales son aquellas que intentan incorporar el máximo número de aspectos de la disrupción dentro del modelo. Esto generalmente se traduce en modelos que incluyen la recuperación como mínimo de los aviones y la tripulación. Son soluciones más

amplias, pero al ser problemas de más envergadura suelen generar otra serie de problemas en los tiempos de obtención, que en esta industria son cortos.

3.2.1. Recuperación de las operaciones de vuelo: Nuevos enfoques para la recuperación de pasajeros

En 2006 Bratu y Banhart publicaron dos modelos integrales [16] para la recuperación de aviones, tripulación y pasajeros. El objetivo de los dos modelos que se presentan son minimizar la suma de los costes operacionales y de los pasajeros afectados, y la suma de los costes operacionales y el coste total del retraso de los pasajeros. Se usa una representación de red donde los nodos son aeropuertos y los arcos vuelos.

En este modelo se da la posibilidad de retrasar o cancelar vuelos. También se considera en el modelo a la tripulación y a los pasajeros, aunque no incluye desigualdades para el mantenimiento de los aviones. Para tratar este problema la solución propuesta es comprobar si la solución del algoritmo cumple con las restricciones y en caso contrario ir añadiendo restricciones al modelo hasta conseguir un planning factible.

Posteriormente los modelos se contrastan con datos de tres días con interrupciones usando una herramienta de simulación creada para ello. El modelo con costes de pasajeros retrasados es incapaz de resolver las situaciones en el tiempo requerido, sin embargo el primero si.

3.3. Heurísticos

Dentro de los modelos que se proponen, existe un tipo basado en el uso de heurísticos. Los algoritmos heurísticos son técnicas para intentar acelerar los cálculos en modelos grandes, aunque en general no pueden garantizar una solución óptima. Esto es especialmente útil en

las ocasiones donde no se necesita la mejor solución, sino una que cumpla unas condiciones mínimas. Los heurísticos se pueden aplicar tanto a problemas parciales como a problemas integrales.

3.3.1. Aplicación de algoritmos evolutivos multiobjetivo a la gestión de interrupciones

En 2006 Liu et. al. [46] proponen un modelo para tratar la interrupción basado en una solución generada con un algoritmo genético [47]. Como objetivos tienen minimizar el retraso de los vuelos y el coste de los cambios de avión como respuesta al cierre de un aeropuerto. La representación utilizada es particular, usándose cromosomas. Sin embargo la explicación de lo que representan los cromosomas no es clara.

Una particularidad de los algoritmos genéticos es la búsqueda dentro de poblaciones de soluciones, y no sólo la mejor de un individuo. Este algoritmo genético incluye fases de mezcla por cruce, mutación y divesificación, como muestra la figura 8.

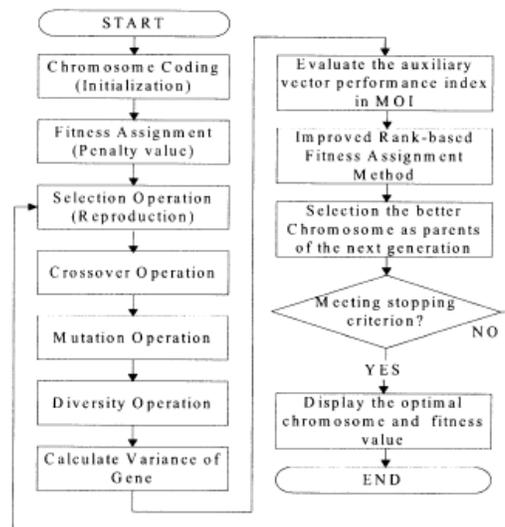


Figura 8: Esquema del algoritmo genético usando por Liu et. al. [46]

El algoritmo se prueba en unos datos facilitados por una compañía aérea de Taiwan,

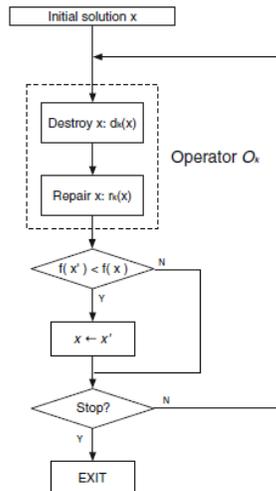


Figura 9: Esquema del heurístico LNS. Después de generar una solución inicial, el heurístico continúa mejorando la solución hasta que una condición de parada se cumpla. Esas mejoras pasan por la destrucción de partes de la solución y una reparación de dicha parte, intentando mejorar la solución anterior. Figura extraída de [5].

haciendo una simulación en un único caso.

3.3.2. Large Neighbourhood Search (LNS) y Simulaciones para la gestión de las interrupciones en la industria aérea

En 2015 Guimarans y Arias y Mújica [5] introducen un modelo para tratar con la interrupción en aviones usando un acercamiento heurístico. El objetivo del modelo es minimizar la suma sobre los diferentes vuelos del retraso que se va acumulando. La representación utilizada para simbolizar los vuelos y aviones es una particular para este problema.

Lo que destaca en este artículo es el uso del heurístico de Large Neighbourhood Search (LNS) [48] [49]. Dicho algoritmo consiste en eliminar partes de una solución, e intentar sustituir dichas partes por otras diferentes que mejoren la anterior solución. En la figura 9 se puede ver un esquema del heurístico.

El modelo se prueba en unos datos simulados, y también en datos reales. Se crean dos modelos, uno para el problema de recuperación de aviones, utilizando la búsqueda en vecindarios grandes, y que resuelve eficientemente el problema; y otro introduciendo retrasos estocásticos, y usando un modelo diferente, que no tiene tanta eficiencia en términos temporales.

3.4. Otros métodos

Para afrontar la disrupción existen técnicas que previenen que, una vez producida la disrupción, se propague. Existen muchas formas de conseguir horarios más robustos, como introducir ‘colchones de tiempo’ o buffer donde recuperar los tiempos perdidos. Esta opción sin embargo no es la más provechosa, ya que incrementa considerablemente el coste de operación. EUROCONTROL estima que añadir un minuto de colchón de tiempo para un Airbus A320 cuesta 49 euros por vuelo [50].

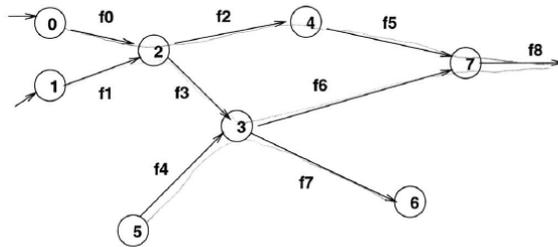
Otra opción es diseñar el horario de forma que en caso de disrupción los vuelos más importantes puedan ser operados por aviones de reserva entre otros.

3.4.1. Enfoques para incorporar robustez en la programación de aerolíneas

En el año 2000 Ageeva [51] publicó su trabajo de fin de máster, en el que se buscaban métodos para evaluar la robustez de los horarios de una aerolínea, y por tanto menos susceptibles a la disrupción. En concreto, en el trabajo se define la robustez como ‘el horario de una aerolínea suficientemente flexible que partes del horario pueden recuperarse en la eventualidad de tener que operar bajo irregularidades’.

Se definen una serie de variables para evaluar la robustez basadas principalmente en el concepto de ‘overlap’. Una coincidencia u ‘overlap’ se produce cuando en un conjunto de vuelos a realizar, existen varias formas diferentes de realizarlos, y por tanto, en caso de producirse alguna limitación extraordinaria, ofrecer formas fáciles de recuperación. En la figura 10 se presenta un ejemplo.

Flight Network



Possible Sequences

- $s_0 :$ $f_0 \rightarrow f_2 \rightarrow f_5 \rightarrow f_8$
- $s_1 :$ $f_1 \rightarrow f_3 \rightarrow f_6 \rightarrow f_8$
- $s_2 :$ $f_4 \rightarrow f_7$
- $s_3 :$ $f_1 \rightarrow f_3 \rightarrow f_7$
- $s_4 :$ $f_4 \rightarrow f_6 \rightarrow f_8$

Figura 10: En el trabajo [51] se presenta el siguiente ejemplo. A la izquierda se puede ver el sistema. Se propone un sistema con 8 vuelos (f_x) a realizar por 3 aviones (3 puntos iniciales) entre 8 aeropuertos (números en círculos). A la derecha se muestran algunas posibles combinaciones de vuelo (s_0, s_1, s_2 o s_0, s_3, s_4). En el primer caso se diría que hay un overlap en la primera parada de s_0 (o en la primera parada de s_0), en la tercera parada de s_0 (o en la tercera parada de s_1) y en la segunda parada de s_1 (o en la primera parada de s_2)

La idea es que cuantos más ‘overlaps’ haya , más robusto será un horario. El horario más robusto no tiene porqué ser el óptimo en términos económicos, pero es posible que en los casos con más de una solución, se pueda elegir aquella más robusta. El modelo fue probado con una serie de datos, creando mejoras en la robustez de los horarios de hasta el 35 %.

4. Conclusiones

En este trabajo hemos dado una visión general del problema de las interrupciones en el sector de la aviación civil. En primer lugar hemos descrito el problema, con sus causas y sus consecuencias, y posteriormente hemos expuesto una muestra de soluciones extraídas de diversos trabajos.

Podemos afirmar que el problema del ‘disruption management’ es un problema que lleva tiempo intentando ser resuelto, pero sin éxito. Se han desarrollado muchas herramientas que ayudan a los controladores de las compañías aéreas tanto a prevenir las interrupciones en la fase de preparación, como a eliminarlas una vez se han producido. Pero no ha sido posible desarrollar un método completo que obtenga la mejor solución para el problema integral (pasajeros, tripulación y aviones), dada la gran cantidad de variables y restricciones del problema.

Al ser un problema tan complejo se ha decidido separarlo en pequeñas partes y resolverlas independientemente. Este método no garantiza la optimalidad, pero es un comienzo, hasta que puedan desarrollarse soluciones más completas.

Como ejemplos de esto, están los trabajos de Jarrah [41] y Yan [43] quienes utilizan técnicas clásicas. También se han desarrollado trabajos usando heurísticos, como por ejemplo los de Liu [46] y Guimarans [5] más recientemente. También se pueden destacar intentos de atacar el problema completo como el de Bratu [16]. Como demuestra Guimarans [5], actualmente se sigue estudiando el tema, intentando encontrar mejores y más rápidas soluciones.

Es posible que en el futuro, cuando se avance más computacionalmente, sea posible encontrar soluciones más completas que las actuales. Esto permitiría automatizar el proceso de toma de decisiones de forma que las aerolíneas puedan minimizar los gastos producidos por las interrupciones.

5. Referencias

- [1] Eric Henckels. Airline industry overview. http://www.columbia.edu/cu/consultingclub/Resources/Airlines_Eric_Henckels.pdf. Accessed: 2017-9-2.
- [2] Gerald N. Cook and Jeremy Goodwin. Airline Networks: A Comparison of Hub-and-Spoke and Point-to-Point Systems. *Journal of Aviation/Aerospace Education and Research*, 17, September 2013.
- [3] Jens Clausen, Allan Larsen, Jesper Larsen, and Natalia J. Rezanova. Disruption management in the airline industry concepts, models and methods. *Computers and Operations Research*, 37(5):809 – 821, 2010. Disruption Management.
- [4] Juan-José Salazar-González. Approaches to solve the fleet-assignment, aircraft-routing, crew-pairing and crew-rostering problems of a regional carrier. *Omega*, 43(C):71–82, 2014.
- [5] Daniel Guimarans, Pol Arias, and Miguel Mujica Mota. *Large Neighbourhood Search and Simulation for Disruption Management in the Airline Industry*, pages 169–201. Springer International Publishing, Cham, 2015.
- [6] Performance review team. Eurocontrol: Planning for delay: influence of flight scheduling on airline punctuality. , EUROCONTROL, 2010.
- [7] Gershko. Airline disruption management: A complex problem seeking solutions. Technical report, Amadeus, 2015.
- [8] Michael Dudley Delano Clarke. Irregular airline operations: a review of the state-of-the-practice in airline operations control centers. *Journal of Air Transport Management*, 4(2):67 – 76, 1998.

- [9] Typhoon operations - human factor considerations. <http://aviationknowledge.wikidot.com/aviation:typhoon-operations-human-factor-considerations>. Accessed: 2017-8-27.
- [10] Hurricane harvey will have a big impact on flights this weekend here's what to know if you're traveling. <http://www.businessinsider.de/hurricane-harvey-flight-delays-cancellations-waivers-2017-8?r=US&IR=T>. Accessed: 2017-8-27.
- [11] La niebla provoca 11 cancelaciones y 14 desvíos en los rodeos. <http://diariodeavisos.lespanol.com/2017/07/la-niebla-provoca-11-cancelaciones-y-14-desvios-en-los-vuelos-de-los-rodeos/>. Accessed: 2017-8-27.
- [12] Paulos Ashebir Lakew Volodymyr Bilotkach. Causes and effects of air traffic delays: Evidence from aggregated data. http://www.its.uci.edu/~plakew/research/BilotkachLakew_Sep2014.pdf. Accessed: 2017-8-27.
- [13] Amsterdam airport plunged into chaos due to air-traffic control system failure. <http://www.independent.co.uk/travel/news-and-advice/amsterdam-airport-in-chaos-air-traffic-control-system-failure-delays-cancelled-flights.html>. Accessed: 2017-8-27.
- [14] Runway shutdown at suvarnabhumi airport expects to affect all flights. <http://englishnews.thaipbs.or.th/runway-shutdown-suvarnabhumi-airport-expects-affect-flights/1>. Accessed: 2017-8-27.
- [15] El avión de spanair despegó con retraso por un problema técnico. https://elpais.com/diario/2008/08/21/espana/1219269601_850215.html. Accessed: 2017-8-27.

- [16] Stephane Bratu and Cynthia Barnhart. Flight operations recovery: New approaches considering passenger recovery. *Journal of Scheduling*, 9(3):279–298, Jun 2006.
- [17] Meilong Le, Congcong Wu, Chenxu Zhan, and Lihong Sun. Airline recovery optimization research: 30 years’ march of mathematical programming: A classification and literature review. In *Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE)*, pages 113–117, Dec 2011.
- [18] Dusan Teodorovic and Slobodan Guberinic. Optimal dispatching strategy on an airline network after a schedule perturbation. *European Journal of Operational Research*, 15(2):178 – 182, 1984.
- [19] Dusan Teodorovic and Goran Stojkovic. Model for operational daily airline scheduling. *Transportation Planning and Technology*, 14(4):273–285, 1990.
- [20] Shangyao Yan and Dah-Hwei Yang. A decision support framework for handling schedule perturbation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 30(6):405 – 419, 1996.
- [21] Michael F. Argüello, Jonathan F. Bard, and Gang Yu. A grasp for aircraft routing in response to groundings and delays. *Journal of Combinatorial Optimization*, 1(3):211–228, Oct 1997.
- [22] Jonathan F. Bard, Gang Yu, and Michael F. Argüello. Optimizing aircraft routings in response to groundings and delays. *IIE Transactions*, 33(10):931–947, Oct 2001.
- [23] Benjamin G. Thengvall, Jonathan F. Bard, and Gang Yu. Balancing user preferences for aircraft schedule recovery during irregular operations. *IIE Transactions*, 32(3):181–193, Mar 2000.

- [24] Jay M. Rosenberger, Ellis L. Johnson, and George L. Nemhauser. Rerouting aircraft for airline recovery. *Transportation Science*, 37(4):408–421, 2003.
- [25] Niklaus Eggenberg, Michel Bierlaire, and Matteo Salani. A column generation algorithm for disrupted airline schedules. *TRANSP-OR*, 2007.
- [26] R. S. Garfinkel and G. L. Nemhauser. The set-partitioning problem: Set covering with equality constraints. *Operations Research*, 17(5):848–856, October 1969.
- [27] L. R. Ford and D. R. Fulkerson. A suggested computation for maximal multi-commodity network flows. *Management Science*, 50(12 supplement):1778–1780, 1958.
- [28] Ladislav Lettovský, Ellis L. Johnson, and George L. Nemhauser. Airline crew recovery. *Transportation Science*, 34(4):337–348, 2000.
- [29] Claude P. Medard and Nidhi Sawhney. Airline crew scheduling from planning to operations. *European Journal of Operational Research*, 183(3):1013 – 1027, 2007.
- [30] Yufeng Guo. *A Decision Support Framework for the Airline Crew Schedule Disruption Management with Strategy Mapping*, pages 158–165. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [31] Yufeng Guo, Leena Suhl, and Markus P. Thiel. Solving the airline crew recovery problem by a genetic algorithm with local improvement. *Operational Research*, 5(2):241, May 2005.
- [32] Rüdiger Nissen and Knut Haase. Duty-period-based network model for crew rescheduling in european airlines. *Journal of Scheduling*, 9(3):255–278, Jun 2006.
- [33] Dominique Feillet. A tutorial on column generation and branch-and-price for vehicle routing problems. *4OR*, 8(4):407–424, Dec 2010.

- [34] Ahmed Abdelghany, Goutham Ekollu, Ram Narasimhan, and Khaled Abdelghany. A proactive crew recovery decision support tool for commercial airlines during irregular operations. *Annals of Operations Research*, 127(1):309–331, Mar 2004.
- [35] Ladislav Lettovsky. Airline operations recovery: An optimization approach. *PhD Dissertation*, 12 1997.
- [36] Yu Zhang and Mark Hansen. Real-time intermodal substitution: Strategy for airline recovery from schedule perturbation and for mitigation of airport congestion. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2052:90–99, 2008.
- [37] Niklaus Eggenberg, Matteo Salani, and Michel Bierlaire. Constraint-specific recovery network for solving airline recovery problems. *Computers and Operations Research*, 37(6):1014 – 1026, 2010.
- [38] Khaled F. Abdelghany, Ahmed F. Abdelghany, and Goutham Ekollu. An integrated decision support tool for airlines schedule recovery during irregular operations. *European Journal of Operational Research*, 185(2):825 – 848, 2008.
- [39] Niloofar Jafari and Seyed Hessameddin Zegordi. Simultaneous recovery model for aircraft and passengers. *Journal of the Franklin Institute*, 348(7):1638 – 1655, 2011. Special issue on Modeling, Simulation and Applied Optimization.
- [40] Niloofar Jafari and Seyed Hessameddin Zegordi. The airline perturbation problem: considering disrupted passengers. *Transportation Planning and Technology*, 33(2):203–220, 2010.
- [41] Ahmad I. Z. Jarrah, Gang Yu, Nirup Krishnamurthy, and Ananda Rakshit. A decision support framework for airline flight cancellations and delays. *Transportation Science*, 27(3):266–280, 1993.

- [42] Paul J. Busacker, Robert G. ; Gowen. A procedure for determining a family of minimum-cost network flow patterns. *Operation Research Office*, 1960.
- [43] Shangyao Yan and Chung-Gee Lin. Airline scheduling for the temporary closure of airports. *Transportation Science*, 31(1):72–82, 1997.
- [44] Jeff L. Kennington and Richard V. Helgason. *Algorithms for Network Programming*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1980.
- [45] Marshall L. Fisher. The lagrangian relaxation method for solving integer programming problems. *Management Science*, 50(12.supplement):1861–1871, 2004.
- [46] Tung-Kuan Liu, Chi-Ruey Jeng, Yu-Ting Liu, and Jia-Ying Tzeng. Applications of multi-objective evolutionary algorithm to airline disruption management. *2006 IEEE international conference on systems, man and cybernetics*, 5:4130 – 4135, 11 2006.
- [47] David E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1st edition, 1989.
- [48] Paul Shaw. Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. In *Proceedings of the 4th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, CP '98*, pages 417–431, London, UK, UK, 1998. Springer-Verlag.
- [49] David Pisinger and Stefan Røpke. *Large Neighborhood Search*, pages 399–420. Springer, 2 edition, 2010.
- [50] Performance review team. Eurocontrol: Report on punctuality drivers at major european airports. , EUROCONTROL, 2005.
- [51] Yana Ageeva. Approaches to incorporating robustness into airline scheduling. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/37308>, 08 2000.