

**Diseño de un algoritmo de generación de columnas para la programación de tripulación en
logística aeroportuaria.****Camila Lucía Rodríguez Gélvez, Nathalia Andrea Gutiérrez Herrera****Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Industrial****Director:****Javier Eduardo Arias Osorio
Magister en Administración****Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas
Escuela de Estudios Industriales y Empresariales
Bucaramanga
2018**

DEDICATORIA

*A mis padres, Cata, Leo, Juan y Mary.
Por siempre creer en mí.*

A Susana, así de sencillo.

Nathalia Andrea Gutiérrez

*A Dios, a mi padre Q.E.P.D y a mi madre.
Los motores de mi vida.*

Camila Lucía Rodríguez Gélvez

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por su formación, esfuerzo y dedicación. A Ana, por ser la palabra sabia, el abrazo preciso y mi fan número uno. A Camila, por ser más mi amiga que mi compañera de proyecto, por perderse tantas reuniones familiares y siempre encontrarme en el medio; y a todas aquellas personas que hicieron esto posible.

Al profesor Javier Eduardo Arias Osorio por toda la orientación y siempre confiar en nuestro trabajo. A Daniel Orlando Martínez y a Julio Camacho por brindarnos su conocimiento y colaboración.

Nathalia Andrea Gutiérrez

A mis padres por su formación, acompañamiento y apoyo, a mi tía Esther por ser mi polo a tierra siempre, a mi hermana Sandra por apoyarme todo el tiempo, a mi compañera de proyecto, amiga y cómplice en este sueño Nathalia, a mis mejores amigos Isa y Victor por siempre alentarme a continuar y no dejarme caer ante las adversidades, a Julio por su gran apoyo e incondicionalidad y a las personas que en el transcurso de la carrera dejaron una huella en mí.

A el profesor Javier Eduardo Arias Osorio por ser nuestro guía, al profesor Daniel Orlando Martínez por su asesoría y orientación, a nuestros compañeros del grupo OPALO por los conocimientos brindados.

Camila Lucía Rodríguez Gélvez

Tabla de contenido

Introducción.....	16
1 Planteamiento del Problema	19
2 Justificación del Problema.....	20
3 Objetivos.....	22
3.1 Objetivo general	22
3.2 Objetivos Específicos.....	22
4 Revisión de Literatura.	23
4.1 Revisión Literaria.....	23
5 Análisis preliminar de la literatura.	29
6 Marco de Antecedentes	38
7 Marco teórico.....	42
7.1 Logística.	42
7.2 Logística Aeroportuaria.....	43
7.3 Programación de Flota.	44
7.4 Programación de la Tripulación.	44
7.5 Emparejamiento de las Tripulaciones	45
7.6 Optimización matemática.....	46
7.6.1 Algoritmo de Generación de columnas.....	46
7.6.2 Problema Maestro Restringido Inicial.....	49

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

7.6.3	Problema Auxiliar (Pricing Problem).	49
7.6.4	Descomposición de Dantzig-Wolfe.	50
7.6.5	Método de Ramificación y Acotamiento (Branch and Bound).	51
7.6.6	Método de la Gran M.	53
8	Terminología	54
8.1	Vuelo o trayecto de vuelo (Leg):.....	54
8.2	Turno o periodo de servicio de vuelo (Duty):	54
8.3	Emparejamiento o Par (Pairing):.....	54
8.4	Tiempo de vuelo (Flying Time):	55
8.5	Tiempo fuera de la base (Elapsed Time):.....	55
8.6	Tiempo de servicio (Service Time):.....	55
8.7	Tiempo muerto (Deadhead):	55
8.8	Tiempo de descanso (Rest time):	55
8.9	Hora Bloque (Block Time):.....	56
8.10	Tripulación (Crew):	56
8.10.1	Tripulación de Vuelo:.....	56
8.10.2	Otros Tripulantes.....	56
8.11	Base de tripulación (Crew Base):	56
8.12	Sector:.....	56
8.13	Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC):	57

9	Formulación y desarrollo del algoritmo	57
9.1	Obtención de datos	59
9.2	Descomposición de Dantzig-Wolfe.	61
9.3	Generación de la columna inicial	61
9.4	Problema maestro.....	62
9.5	Subproblema.....	63
9.6	Reemplazar columnas	74
9.7	Branch and Bound.....	74
9.8	Solución del problema de emparejamiento de la tripulación	75
9.9	Asignación de la tripulación.....	75
9.10	Evaluación de desempeño del algoritmo desarrollado	75
	Conclusiones.....	82
	Recomendaciones	83
	<u>Referencias Bibliográficas</u>	84

Lista de tablas

Tabla 1: Cumplimientos de objetivos del proyecto.	18
Tabla 2: Resultados de búsqueda en las bases de datos consultadas	23
Tabla 3: Tiempos computacionales resultantes	81

Lista de figuras

Figura 1: Comparación del tamaño de la flota de algunas aerolíneas en el 2013.....	17
Figura 2: Número de publicaciones por autor.....	26
Figura 3: Producción literaria por país.....	27
Figura 4: Nube de palabras con mayor frecuencia en los artículos consultados..	28
Figura 5: Interés en el término "Crew Scheduling" a lo largo del tiempo.....	28
Figura 6: Problema de Programación de la Tripulación.....	32
Figura 7: Etapas de planeación de la programación aérea.....	33
Figura 8: Componentes del problema de emparejamiento de la tripulación.	46
Figura 9: Marco general del método de generación de columnas.	47
Figura 10: Algoritmo de solución del problema de programación de la tripulación.....	58
Figura 11: Estructura general de un emparejamiento.	77
Figura 12 Información de vuelos parte 1	78
Figura 13 Información de vuelos parte 2	79
Figura 14 Emparejamientos encontrados por el algoritmo	80

Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en el CD)

Apéndice A: Código de programación del problema maestro en GAMS.

Apéndice B: Código de programación del subproblema en GAMS.

Apéndice C: Algoritmo de Generación de Columnas en MATLAB.

Apéndice D: Soluciones del algoritmo desarrollado.

Apéndice E: Artículo publicable.

Resumen

TÍTULO: DISEÑO DE UN ALGORITMO DE GENERACIÓN DE COLUMNAS PARA LA PROGRAMACIÓN DE TRIPULACIÓN EN LOGÍSTICA AEROPORTUARIA.*

AUTORES: CAMILA LUCÍA RODRÍGUEZ GÉLVEZ, NATHALIA ANDREA GUTIÉRREZ HERRERA.†

PALABRAS CLAVE: PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN, GENERACIÓN DE COLUMNAS, EMPAREJAMIENTO DE LA TRIPULACIÓN, DESCOMPOSICIÓN DANTZIG-WOLFE

DESCRIPCIÓN

El problema de la programación de la tripulación en la logística aeroportuaria se aborda a partir de la necesidad que tienen las aerolíneas de reducir sus costos operativos para poder tener un margen de ganancia considerable y a la vez ser capaces de ofrecer a sus usuarios precios razonables por el servicio que prestan. A nivel mundial, el problema ha sido abordado por países como E.U, Francia, Canadá y otros que cuentan con aerolíneas de gran tamaño y quienes durante varios años han realizado grandes esfuerzos por encontrar el método de optimización que más se ajuste a sus necesidades. Este documento presenta el diseño de un algoritmo que resuelva el problema de programación de la tripulación enfocado en la etapa de emparejamiento de la tripulación, considerando únicamente la operación doméstica y sujeto a los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia. El objetivo es observar el funcionamiento de un algoritmo fundamentado en la técnica de generación de columnas a partir de la relajación de integridad de la descomposición de Danzig-Wolfe y usando como entorno de programación Matlab y GAMS de forma simultánea para instancias cercanas al entorno actual de la realidad colombiana, comprobando que este permite llegar a soluciones óptimas en un tiempo adecuado para un escenario con un horizonte de planeación que puede ser semanal o mensual. Se considera la logística aeroportuaria como un posible nuevo campo de investigación de problemas de optimización.

* Trabajo de grado

† Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Ma, Javier Eduardo Arias Osorio

Abstract

TITLE: ALGORITHM DESIGN USING COLUMN GENERATION FOR THE CREW SCHEDULING PROBLEM IN AIRPORT LOGISTICS.*

AUTHORS: CAMILA LUCÍA RODRÍGUEZ GÉLVEZ, NATHALIA ANDREA GUTIÉRREZ HERRERA.†

KEYWORDS: CREW SCHEDULING PROBLEM, COLUMN GENERATION, CREW PAIRING, DANTZIG-WOLFE DECOMPOSITION.

DESCRIPTION:

The crew scheduling problem in the airport logistics field is addressed from the need that the airlines have to reduce their operational cost in order to have a considerable margin of profit and at the same time, be able to offer their customers reasonable prices for the service they provide. Worldwide, the problem has been studied by countries such as U.S, France, Canada and other ones that have large airlines in need of an efficient planning due to the increasing competition and whom for many years have made great efforts to find the optimization method that best suits their needs. This document presents the design of an algorithm that solves the crew scheduling problem focusing on the crew pairing stage, considering only the domestic operation and subject to the Colombian Aeronautical Regulations. The goal is to observe the performance of the algorithm based on the column generation technique using the integrity relaxation from the Danzig-Wolfe decomposition, using simultaneously Matlab and GAMS programming environments tested in an instance close to the current Colombian airline's reality, evaluating that the methodology allows the model to reach optimal solutions in acceptable computational times for a scenario with a planning horizon that can be either weekly or monthly. Airport logistics is considered as a possible new field of research in optimization problems.

* Bachelor Thesis

† Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Ma. Javier Eduardo Arias Osorio

Introducción

Las aerolíneas usan numerosos recursos para proveer servicios de transportes a sus pasajeros, dichos servicios se caracterizan por tener altos costos operativos, fuertes regulaciones y un difícil proceso de planeación; de la administración eficiente de los mismos depende la supervivencia o fin de estas, es por esto que la logística aeroportuaria ha despertado el interés de muchos catedráticos e investigadores a través de los años, sin embargo, el término en general incluye una gran variedad de subproblemas que han comenzado a ser estudiados de forma individual debido a la complejidad que posee cada uno.

Este es el caso de la programación de la tripulación o “Crew Scheduling” que es el proceso de identificar secuencias de vuelo disponibles y asignar el personal responsable por la cabina de mando y sus asistentes a dichas secuencias (Bazargan, 2016). Normalmente, este proceso se realiza una vez la asignación de las diferentes flotillas a las distintas rutas con las que cuenta la aerolínea ha sido realizada. Los costos de personal incluyen salarios, beneficios y gastos, representando el segundo mayor costo para las empresas (después del combustible). Sin embargo, estos no son los únicos costos ocasionados por los pilotos y asistentes de vuelo en los que puede incurrir una aerolínea, en ocasiones pueden presentarse retrasos o cancelaciones de rutas que generan gastos adicionales por mantener al personal fuera de su ciudad de residencia (taxis, parqueaderos, comidas, hoteles, pasaje de vuelta, entre otros). Sin embargo, a diferencia de los costos por combustibles, una gran parte de los ocasionados por la tripulación son controlables mediante la optimización de distintas variables que se pueden traducir en millones de pesos.

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

La complejidad del problema que comprende la programación de la tripulación para asignar a las flotas aéreas depende del entorno en que se estudie, por ejemplo, para el caso de Estados Unidos y Europa existen aerolíneas de gran tamaño que tienen a su disposición una gran cantidad de personal que distribuir entre las diferentes rutas que manejan a nivel nacional e internacional, mientras que en Latinoamérica la situación cambia, las mayoría de las aerolíneas se asemejan a los modelos de bajo costo que cuentan con uno o dos tipos de flotillas compuestas por aeronaves de tamaño mediano simplificando un poco el proceso de planeación para dichas empresas.

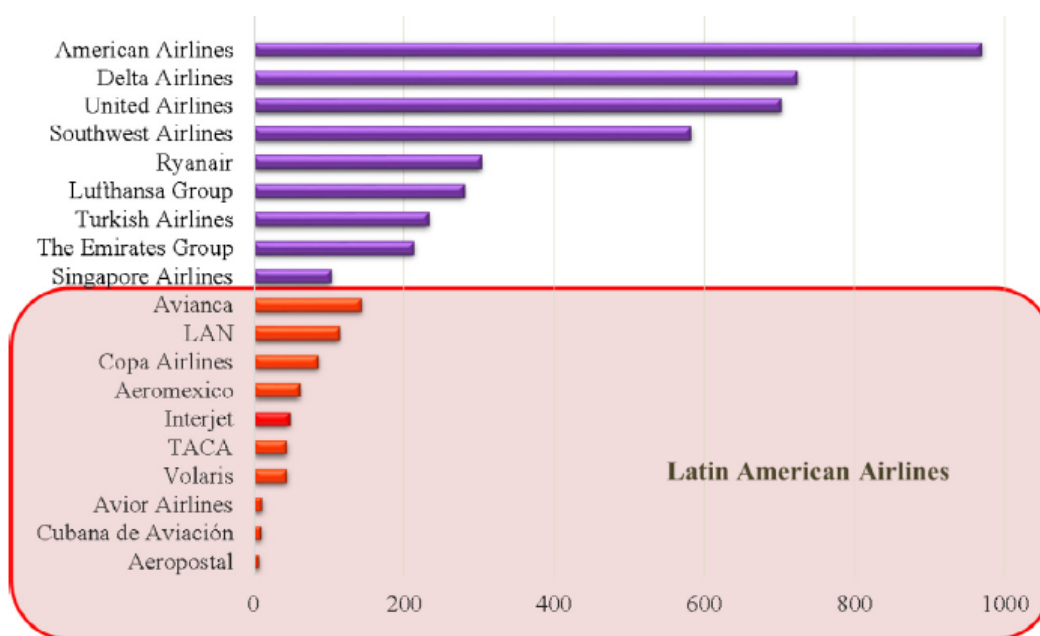


Figura 1: Comparación del tamaño de la flota de algunas aerolíneas en el 2013. Adaptado de (Díaz-Ramírez, Huertas, & Trigos, 2014).

Con el desarrollo de este proyecto se pretende realizar un primer acercamiento a la logística aeroportuaria como una amplia rama de investigación compuesta de problemas complejos que en conjunto permiten que las diferentes aerolíneas puedan llevar a cabo sus operaciones aéreas. En nuestro caso puntual y debido a la importancia que el problema de programación de la tripulación tiene, se trabajó subdividiéndolo en dos partes: el emparejamiento de la tripulación y la asignación

del personal. Nosotras, específicamente escogimos el primer sub-problema, teniendo en cuenta que a pesar de que ambos se complementan, si se le da solución al primero, se puede realizar la asignación de personal de forma más sencilla.

Tabla 1:

Cumplimientos de objetivos del proyecto.

OBJETIVO	CUMPLIMIENTO
Realizar una revisión literaria para identificar los modelos de optimización y técnicas aplicadas al problema de programación de flota en logística aeroportuaria.	Capítulo 4
Desarrollar el algoritmo necesario para la comprobación de la técnica de generación de columnas en lenguaje Matlab.	Capítulo 7, Apéndice C
Evaluar el desempeño de la técnica de generación de columnas frente a instancias existentes en la literatura o datos sintéticos.	Capítulo 8, Apéndice D
Elaborar un artículo publicable en el cual se consolide los principales resultados obtenidos a partir de la investigación.	Apéndice E

1 Planteamiento del Problema

En la actualidad, las aerolíneas afrontan problemas de interrupciones en la planificación de sus vuelos debido a eventos inesperados como cambios en el clima, problemas mecánicos en su flota y tripulación no disponible, entre otros, los cuales pueden ocasionar retrasos en los vuelos o cancelaciones que repercuten en clientes insatisfechos y pérdidas económicas para las aerolíneas.

La programación de la tripulación (Crew Scheduling), resulta ser uno de los tópicos más costosos y extensos que enmarca la logística aeroportuaria (Norin, Granberg, Yuan, & Varbrand, 2012). Esta programación, consiste en obtener el mínimo costo por asignación del capital humano a cargo de una ruta aérea y está sujeto a variables como ubicación, turno de trabajo, habilidades requeridas, años de experiencia, disponibilidad de aeronaves, entre otros requerimientos que definen la complejidad del problema, siendo muy frecuente dentro de la logística aeroportuaria su presencia y aportando significativamente al aumento en los costos de operación.

A nivel mundial esta temática ha sido abordada desde diferentes perspectivas, dentro de las cuales se destacan la división de la problemática en asignaciones individuales, o de forma opuesta, la conformación de pares para crear bloques de personas que se asignan a determinado tipo de aeronave; adicionalmente, se han utilizado diferentes métodos de solución como la programación lineal (Gao, Johnson, & Smith, 2009), algoritmos genéticos (Souai & Teghem, 2009), de generación de columnas (Kasirzadeh, Saddoune, & Soumis, 2015), algoritmo de descomposición Dantzig-Wolfe (Maenhout & Vanhoucke, 2010), algoritmos meméticos (Burke, y otros, 2010), entre otros.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, el problema de la programación de tripulación ha recibido atención considerable de parte de la academia y la industria, quienes buscan los métodos más efectivos de solución que le permitan no sólo optimizar sus recursos, sino de igual forma una rápida respuesta ante las distintas dificultades que se puedan presentar en un día laboral para mantener un nivel de servicio satisfactorio ante los ojos de sus usuarios.

2 Justificación del Problema

Como se ha expuesto hasta ahora, alrededor del mundo existen aerolíneas que gran tamaño que cuentan con una gran cantidad de recursos para llevar acabo su operación diaria (aeronaves, tripulantes, etc). Han sido estas aerolíneas las pioneras en unir esfuerzos con instituciones educativas para investigar los distintos problemas que encierran la logística aeroportuaria y tratar de reducir los elevados costos operaciones que no les permite ofrecer precios cómodos a sus pasajeros.

Todo aquel conocimiento resultante de años de investigación se ha venido desarrollando en países como Estados Unidos, Canadá y Francia; en Latinoamérica hasta el momento no se cuenta con aerolíneas que estén a la par de las de estos países, en especial en Colombia, donde la aerolínea más grande que opera se cataloga como una de tamaño medio y aunque la importancia del problema de programación de tripulación a nivel internacional es alta, es poca la evidencia encontrada en la literatura de la solución de dicho problema para América Latina.

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

Por este motivo, es de gran importancia realizar estudios que permitan abrir el camino para ahondar en una línea de investigación tan robusta como lo es la logística aeroportuaria, de tal forma que a futuro los investigadores tengan el conocimiento necesario que les permita desarrollar soluciones a las diferentes aerolíneas no sólo para la disminución de costos, sino para dar respuesta de forma eficaz a eventos inesperados en su programación habitual, sobre todo en un entorno tan volátil como el colombiano, en dónde es común que se presenten retrasos o cancelaciones en los vuelos debido al clima, fallas inesperadas en las aeronaves, entre otros.

Este primer acercamiento a la optimización en términos de programación de tripulación, busca poner a prueba un algoritmo matemático planteado dentro del marco legal y regulatorio vigente del entorno colombiano para poder analizar su comportamiento y la viabilidad de su aplicación en términos prácticos.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Diseñar un algoritmo para resolver el problema de programación de tripulación en logística aeroportuaria a partir del modelo de generación de columnas.

3.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión literaria para identificar los modelos de optimización y técnicas aplicadas al problema de programación de flota en logística aeroportuaria.
- Desarrollar el algoritmo necesario para la comprobación de la técnica de generación de columnas en lenguaje Matlab
- Evaluar el desempeño de la técnica de generación de columnas frente a instancias existentes en la literatura o datos sintéticos.
- Elaborar un artículo publicable en el cual se consolide los principales resultados obtenidos a partir de la investigación

4 Revisión de Literatura.

4.1 Revisión Literaria

Un análisis bibliométrico consiste en clasificar y medir las producciones científicas en áreas de las ciencias, la cantidad de trabajos publicados, la colaboración de autores, los centros de investigación y los países e instituciones; para analizar el impacto de los trabajos de investigación, así como también de la información proporcionada por los resultados de dicho proceso, esto con el propósito de brindar información de las tendencias de los documentos, referencias bibliográficas y la actualidad de los mismos (Escorcía Otalora, 2008). En este sentido, se presentan los resultados obtenidos en las diferentes bases de datos consultadas (Web of Science, Scopus, Science Direct y Google Scholar) referentes al tema de estudio, haciendo énfasis en los principales autores, países, términos relevantes y frecuencia con la que el tema fue consultado.

En la Tabla 2: se muestran las diferentes ecuaciones utilizadas para la búsqueda de artículos en las cuatro bases de datos mencionadas anteriormente, se observa que el número de resultados varía respecto a la cantidad de términos utilizados en cada ecuación.

Tabla 2:

Resultados de búsqueda en las bases de datos consultadas

No.	Base de Datos	Ecuación de Búsqueda	No. De Resultados	Ventana de Tiempo
1	Google Scholar	((("Crew Scheduling") AND (Airport NEAR logistics) AND optimization AND (model OR method)))	253	2010 a 2017

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

No.	Base de Datos	Ecuación de Búsqueda	No. De Resultados	Ventana de Tiempo
		((("Crew Scheduling") AND (Airport NEAR logistics) AND optimization AND (model OR method)))	496	Todos los años
		("Crew Scheduling" AND airline AND optimization)	2610	2010 a 2017
2	Web of Science	TS = (Crew Scheduling AND airline AND optimization)	38	2010 a 2017
		TI= Crew Scheduling AND TS= (Optimization OR method)	39	2010 a 2017
		TI= crew scheduling AND TS= Optimization	30	2010 a 2017
		ALL ("Crew Scheduling" AND airline AND optimization)	583	2010 a 2017
3	Scopus	ALL ("Crew Scheduling" AND airport AND optimization AND (model OR method))	122	2010 a 2017
		ALL (crew AND scheduling AND optimization OR method)	2599	2010 a 2017

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

No.	Base de Datos	Ecuación de Búsqueda	No. De Resultados	Ventana de Tiempo
4	Science	("Crew Scheduling") AND (Airport NEAR logistics) AND optimization AND (model OR method))	18	Todos los años
	Direct	("Crew Scheduling" AND airline AND optimization)	161	2010 a 2017
		("Crew Scheduling" AND optimization)	2504	2010 a 2017

Datos tomados de: Web of Science, Scopus, Science Direct y Google Scholar.

En materia de los principales autores, se encontró que quince autores aparecen en más de uno de los trabajos usados en la revisión de literatura como se evidencia en la Figura 2, sin embargo, de este grupo se destacan tres, quienes presentan la mayor frecuencia de aparición en los mismos y a su vez, cuentan con un alto número de publicaciones realizadas en materia de logística aeroportuaria.

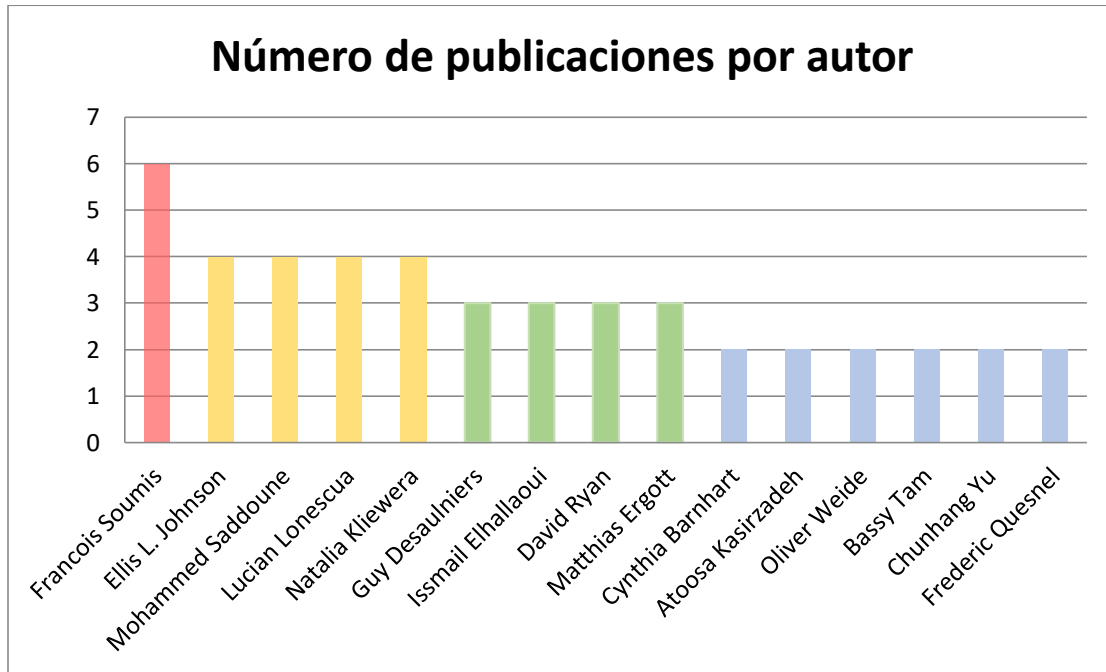


Figura 2: Número de publicaciones por autor.

Se evidencia que Francois Soumis, Ellis L. Johnson y Mohammed Saddoune son los autores que han abordado con mayor frecuencia el tema con 6, 4 y 4 publicaciones respectivamente, en adición a esto, se realizó una consulta del número de documentos que han publicado sobre el tema de logística aeroportuaria y se encontró que cuentan con 29, 30 y 10 artículos cada uno; Francois Soumis es un catedrático del departamento de matemáticas e Ingeniería Industrial del Politécnico de Montreal (Canadá), ganador del premio “Canada Research Chair in Large Transportation Network Optimization (LTNO)” y desde el 2012 ha sido referente de publicaciones con 4,226 citas.

Por otra parte, Ellis Johnson profesor emérito perteneciente a la Escuela de Ingeniería Industrial y de Sistemas H. Milton Stewart del Instituto Tecnológico de Atlanta (Georgia), ganador de varios premios por su constante investigación en temas de optimización matemática y sus publicaciones

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

han alcanzado un total de 4.210 citas. Finalmente, Mohammed Saddoune, profesor de matemáticas de la Escuela Politécnica de Montreal, su campo de estudio son las ciencias de la computación, su trabajo ha sido citado en 43 ocasiones.

En cuanto a los países líderes en el tema de programación de la tripulación, se encontró que Canadá y Estados Unidos encabezan la lista cada uno con nueve artículos dentro de los seleccionados para la revisión de literatura, le sigue Alemania con siete publicaciones y Bélgica con cuatro, el resto de países cuentan con tres o menos trabajos tenidos en cuenta para esta investigación, como se evidencia en la Figura 3 presentada a continuación.

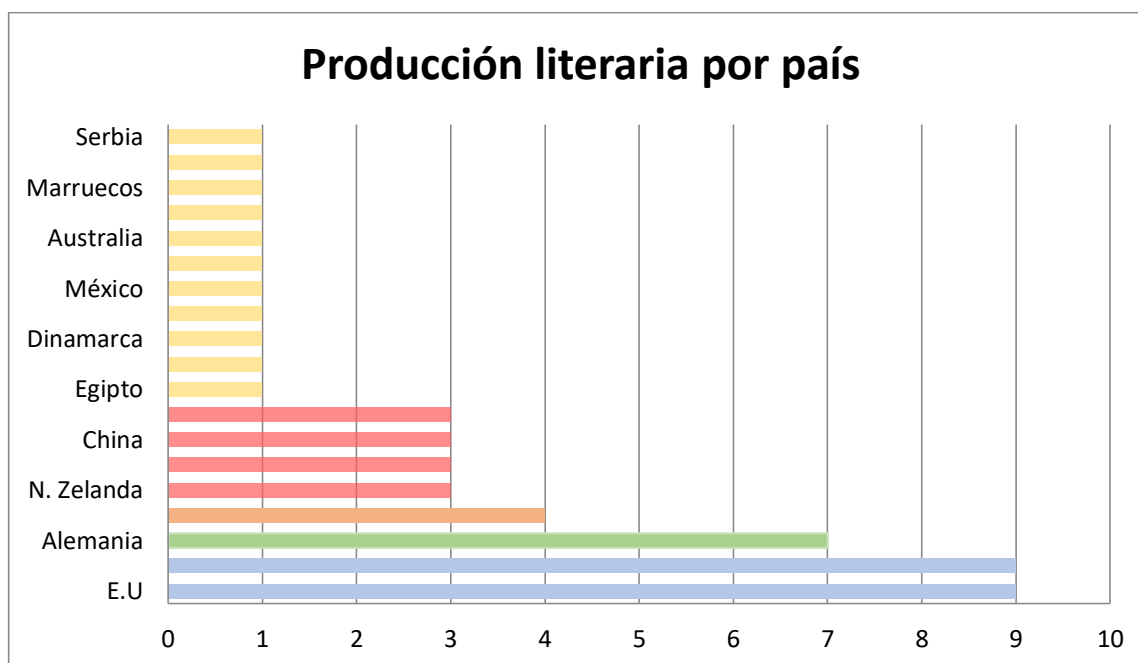


Figura 3: Producción literaria por país.

Finalmente, con la ayuda del software NVivo y la herramienta Google Trends se analizaron dos parámetros distintos; en primera instancia, los términos de mayor repetición dentro de la literatura consultada, generando una representación gráfica de las palabras claves presentes en estos (Ver

Figura 4) y como segunda medida, se verificó la popularidad en materia de búsqueda web a nivel mundial del término “Crew Scheduling” desde el año 2004, obteniendo como resultado que la población mostró un mayor interés en este hacia el 2004 pero después del 2008, dicho interés ha venido decreciendo de forma considerable (Ver Figura 5).

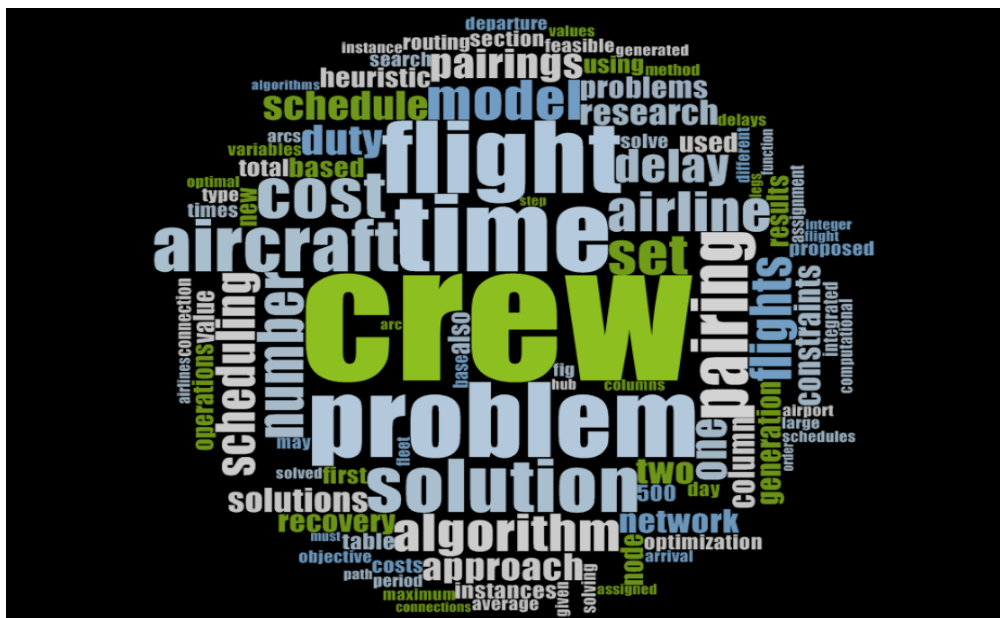


Figura 4: Nube de palabras con mayor frecuencia en los artículos consultados. Nota: Elaborada utilizando el software Nvivo.

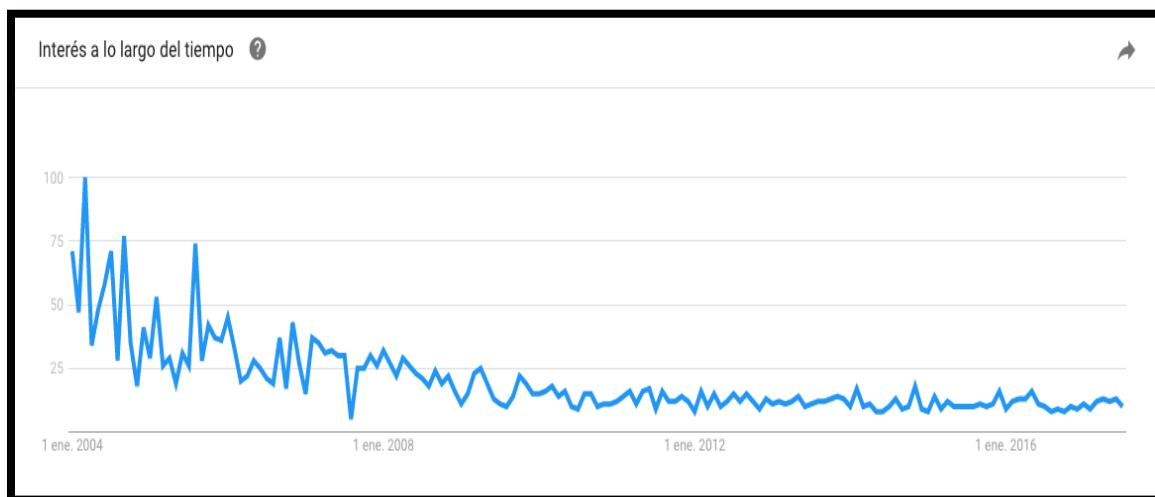


Figura 5: Interés en el término "Crew Scheduling" a lo largo del tiempo. Nota: Elaborada utilizando la herramienta google trends.

5 Análisis preliminar de la literatura.

El término “Crew Scheduling” (Programación de la tripulación) tuvo su auge en la época de los 60’s como un pequeño componente de la logística aeroportuaria que no podía ser resuelto en conjunto debido a su alta complejidad, diferentes artículos datan de esa época hasta la actualidad con una gran variedad en cuanto a métodos de solución y enfoques.

Dicho problema ha sido ampliamente estudiado en los países más desarrollados a nivel mundial, teniendo en cuenta que es en estos donde existen las aerolíneas de mayor tamaño y, por tanto, las más interesadas en optimizar costos, recurso humano y brindar un mejor servicio a sus usuarios, mitigando el efecto de los retrasos y las consecuencias que estos tienen sobre sus clientes.

Según lo exponen Gopalakrishnan & Johnson (2005), la planeación de una aerolínea consta de muchos factores, a diario se necesita programar tripulación, vuelos, mantenimiento, compras de equipos, inventario, entre otros. Cada uno de estos factores requiere de procesos de planeación independientes debido a la complejidad, tiempos y objetivos que puedan llegar a necesitar por separado y que en conjunto soportan la logística aeroportuaria. A lo largo de los últimos años se ha evidenciado un crecimiento exponencial en el tamaño y complejidad de los problemas que involucran las diferentes áreas de la logística en una aerolínea, esto debido a la expansión de las mismas y el aumento en el número de pasajeros que demandan los servicios de transporte aéreo. La programación en una aerolínea consiste en *programación de flota* y programación de la tripulación; la última es considerada la fuente de uno de los mayores costos en los que debe incurrir una aerolínea, adicional al costo por combustible, tanto así que en 1991, American Airlines reportó

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

un gasto de \$1.3 billones de dólares por costos de tripulación; siendo esta una cifra considerable para una aerolínea; es por esto que la asignación efectiva del personal para cubrir determinada ruta de vuelo es un aspecto de vital importancia, pues cualquier porcentaje de ahorro que se pueda lograr en este rubro puede ser una cantidad significativa en términos monetarios.

Las grandes aerolíneas estadounidenses programan más de 2.500 vuelos por día que van a más de 150 destinos y utilizan casi 500 aeronaves; por tanto, se debe asignar personal para la cabina de mando, auxiliares de vuelo y auxiliares de aeronave para operar cada ruta. La gestión de la tripulación consta de cinco etapas de planeación:

Programación de vuelos: Consiste en un horario o calendario que comprende todos los vuelos que deben ser operados, su construcción se basa en la demanda existente del mercado para los diferentes segmentos de vuelo.

Asignación de flota: En esta etapa, los aviones disponibles son asignadas a diferentes rutas de vuelo. Los ingresos provenientes por cada tramo de vuelo (Flight leg) dependen de la demanda del mercado para este y del tamaño que se utilice para cubrir la ruta. El objetivo es maximizar dichas ganancias teniendo en cuenta que los vuelos solo pueden ser cubiertos por los aviones disponibles.

Itinerario de la aeronave: Involucra los vuelos a diferentes destinos, la ruta que debe seguir de tal forma que cumpla con los mantenimientos y recorridos establecidos para esta.

Emparejamiento de la tripulación: Un par o emparejamiento (Pairing) es una secuencia de vuelos que inician y finalizan en una misma base o aeródromo de la tripulación, de tal forma que, en una secuencia, la ciudad de destino coincide con la ciudad de origen del siguiente vuelo. Cada emparejamiento tiene un costo asociado. El objetivo es encontrar un subconjunto de estas parejas

con un costo mínimo y que a su vez cubran todas las rutas programadas exactamente una vez. Al igual que en las etapas previas, hay que tener en cuenta las normas y restricciones.

Alineación o Bidline: En esta etapa se configura el calendario mensual que puede volar determinada tripulación, utilizando el conjunto de pares óptimos generados en la etapa anterior. Se le denomina bidline (bid=puja/oferta, línea= línea) porque los pilotos pueden ofertar para que se le asigne alguna línea de su preferencia con base en la antigüedad y otras consideraciones. Aquí se determina el número exacto de tripulantes que la compañía aérea va a requerir en el mes. Las dos últimas etapas son las que conforman la programación de la tripulación o *crew scheduling*.

En adición, Thiel (2005) en su tesis doctoral, expone los diferentes enfoques que se le dan al problema de asignación tanto en la teoría como en la práctica, es decir, en adición a la asignación de determinados vuelos y/o rutas enfocadas en la reducción de costos, las aerolíneas quieren incrementar el criterio de calidad de vida para su personal (por opuesto que suene al objetivo principal) y esto es mediante la consideración de las preferencias de su personal en el proceso de la programación, esto lleva a tres enfoques principales: *Bidlines* o alineación, alineación personalizada y alineación preferencial (Ver Figura 6).

Bidline o alineación: Es el método preferido en Norte América, en proceso de asignación consiste en primero establecer líneas de trabajo (bidlines) anónimas de tal forma que todos los vuelos sean cubiertos y se operen al menor costo posible. Luego de esto, los empleados pueden indicar sus alineaciones preferidas, las cuales serán aceptadas o rechazadas con base en la antigüedad de los mismos, es decir, las personas con mayor tiempo acumulado trabajando para la aerolínea serán a quienes se les tenga en cuenta primero sus preferencias; de esta forma, es casi

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

imposible para pilotos con poco tiempo de servicio que se les asigne alguna de sus preferencias, tendrán que esperar hasta las últimas instancias del proceso.

Alineación personalizada: En Europa, Australia y Nueva Zelanda, este método también se conoce como *carga justa y equitativa*, consiste en proporcionar equidad en las cargas de trabajo de todos los miembros de la tripulación, método que se opone en gran medida al principio de antigüedad. Por tanto, el sistema acepta o rechaza las preferencias de los pilotos de forma automática (acerca de los horarios preestablecidos) y ensambla la programación óptima, teniendo en cuenta una carga de trabajo equitativa, haciendo que los trabajadores no tengan mayor influencia en lo que les asigna.

Alineación preferencial: Durante los últimos años, un tercer enfoque ha tomado mayor fuerza, también conocido como *alineación personalizada con preferencias*, considera preferencias del personal en cierto nivel durante el proceso de asignación en temas como trabajar con determinados colegas, establecer periodos semanales de descanso, entre otros. En ocasiones, dichas preferencias intervienen con los intereses de otras personas o de la misma empresa; cuando esto ocurre, se resuelve aplicando el principio de antigüedad, de lo contrario, los empleados pueden expresar sus preferencias sin saber hasta qué punto se van a satisfacer en la programación final.

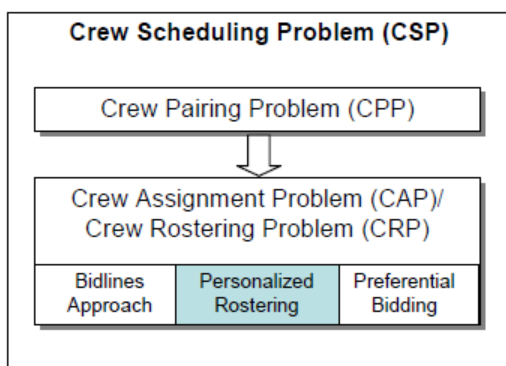


Figura 6: Problema de Programación de la Tripulación. Adaptado de: (Thiel, 2005)

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

A su vez Barnhart et al. (2003), definen el proceso de planeación de las aerolíneas en cuatro etapas, las tres primeras siendo iguales al enfoque expuesto anteriormente por Gopalakrishnan & Johnson (2005) con la pequeña diferencia que agrupa las dos últimas en una sola llamada *Crew Scheduling o Programación de la Tripulación*, como se representa en la Figura 7. Adicional a esto, expone que al momento de asignar las personas que van a hacer parte de la tripulación del avión se deben tener en cuenta dos grupos distintos: los tripulantes de la cabina de mando y los tripulantes de la cabina de pasajeros, puesto que no se programan de igual forma, por ejemplo, los grupos de pilotos y otras personas que están al mando del avión suelen permanecer juntas durante la mayoría de su programación u horario mientras que los auxiliares de vuelo varían con mayor frecuencia y son asignados de forma individual. Otra diferencia consiste en que los tripulantes de la cabina de mando tienen restricciones respecto al tipo de aeronaves que pueden volar, esto depende de su entrenamiento y capacidades.

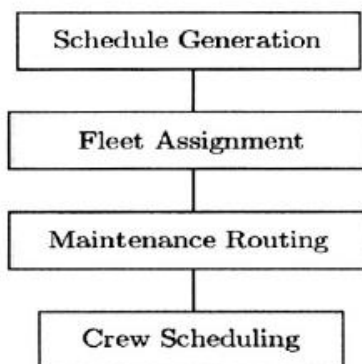


Figura 7: Etapas de planeación de la programación aérea. Adaptado de (Barnhart et al., 2003)

Se destaca inicialmente a Saddoune, Desaulniers, Elhallaoui, & Soumis (2010) quienes proponen un método de Crew Scheduling integrado para evitar dividir el problema en las dos fases usuales (crew pairing y crew assignment) utilizando un método heurístico en que se combina el algoritmo de agrupación directa con el de generación de columnas teniendo en cuenta que los

horarios a programar son de tipo bidline (construidos de forma anónima y luego asignados a los pilotos de acuerdo con sus preferencias y edad). El método de solución fue probado en siete instancias distintas de una aerolínea canadiense con un número de vuelos que iban desde 1011 hasta 1527 y grupo de empleados en un rango de 30 a 300 personas, introduciendo el método de colonias en la agregación bi-dinámica de restricciones para así aumentar la posibilidad de generar columnas complementarias que permitan una reducción en el valor de la función objetivo. Lo anterior arrojó como resultado una reducción significativa no sólo en los costos (siendo 3,37% el mayor porcentaje de ahorro logrado) también en el personal requerido para cumplir con los horarios a asignar (5,54% el mayor ahorro en cuestión de personal), sin embargo, los tiempos computacionales que requiere el modelo pueden ser hasta de 24 horas.

Partiendo del anterior trabajo Kasirzadeh, Saddoune, & Soumis (2015) utilizan el método desarrollado por Saddoune, Desaulniers, Elhallaoui, & Soumis (2010) basado en la generación de columnas, pero esta vez considerando las preferencias del personal, es decir, un modelo de asignación mensual personalizada en el que se asume un número fijo de trabajadores por base de operaciones; dadas las preferencias del piloto y los horarios anónimos previamente construidos, se construyen horarios personalizados que cubren con todas las necesidades laborales de las rutas de vuelo, minimizando el costo total del personal a disposición y satisfaciendo un número mínimo de preferencias (rutas y vacaciones). En vez de considerar las preferencias y minimizar el costo en dos pasos por separados, se combinan ambos factores en una misma función objetivo para lograr una única formulación del problema. En la realización de las pruebas se utilizaron datos reales facilitados por una aerolínea norteamericana que opera flotas de mediana y gran capacidad, con un número de vuelos que van desde los 1013 hasta los 7765, divididos en siete instancias

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

diferentes, las vacaciones fueron distribuidas de forma uniforme durante el mes de la programación, teniendo en cuenta que el mes escogido no cuenta con festivos, para el caso de las preferencias de los pilotos, cada uno seleccionó un porcentaje específico de vuelos de su preferencia y se aseguró que al menos un 20% de los vuelos contenidos en la programación resultante fuera del agrado de los pilotos. Como resultado, los tiempos de computación llegaron hasta los 218 minutos, no se presentaron reducciones en costos o personal, dado que ese no era el objetivo de la optimización, en cambio se obtuvo que en el 29,09% de los casos los vuelos resultantes eran los preferidos.

Por otra parte, Ionescu & Kliewer (2011) cambiaron un poco el enfoque y proponen un modelo estocástico que permite aumentar la flexibilidad de la programación de la tripulación incorporando oportunidades de cambio durante la fase del diseño de la programación, aumentando así la tolerancia frente a los retrasos e incorporando acciones de recuperación de bajo costo para una aerolínea de Europa; este enfoque permite a los pares asignados realizar cambios manteniendo siempre la factibilidad de los mismos. Dicho modelo puede ser resuelto usando el algoritmo de generación de columnas con una extensión que maneje los recursos del modelo de forma explícita. En la primera etapa se construyen los horarios de forma anónima, en una segunda fase miembros concretos del grupo de empleados son asignados a dichos horarios, teniendo como resultado el horario mensual de trabajo llamado “Crew Roster”. Las oportunidades de cambio de vuelo son consideradas solamente para conexiones aéreas que presenten retrasos considerables, dichos retrasos resultantes en hora de salida y aterrizaje son usados como datos de entrada para la fase de diseño de la programación, mientras que las variables de precios son evaluadas por un enfoque dinámico que utiliza el algoritmo de la ruta más corta, el problema principal es resuelto mediante

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

programación lineal, mientras que una extensión llamada “Model Management” es la responsable de evaluar el riesgo entre las conexiones en las rutas y buscar las oportunidades de cambio; dicho modelo fue probado con datos reales de una aerolínea que cuenta con un rango de 396 a 427 vuelos (de mediano tamaño), teniendo en cuenta que el objetivo principal del modelo consiste en la mejora en la puntualidad de operación de los vuelos con una tolerancia de 15 minutos máximo en los retrasos, obteniendo como resultado una mejora del 2% en la puntualidad y una mejora en la eficiencia de los costos en la programación de la tripulación, demostrando así que una mayor flexibilidad conlleva mejores resultados en tiempos de operación y costos de personal, sin embargo, se debe tener en cuenta que los costos marginales por dicha flexibilidad se vuelven demasiado altos si se usan en exceso las oportunidades de cambio.

De esta forma, se observó que en la mayoría de los casos los investigadores usan el algoritmo de generación de columnas, pero en ocasiones realizan una que otra variación, tanto en combinación con otros métodos como en adición de restricciones con el fin de mejorar los resultados que este arroja. Entre los demás enfoques se encuentran la programación entera (Brunner, 2014), el método simplex de programación lineal (Rosat, Quesnel, Elhallaoui, & Soumis, 2017) y métodos de ramificación como Branch and Price (Maenhout & Vanhoucke, 2010) y Branch and Bound (AhmadBeygi, Cohn, & Weir, 2009).

En el marco de los países en vía de desarrollo encontramos que el tema ha sido estudiado muy poco, sin embargo se encuentran trabajos que siguen la misma línea de investigación de muchos de los trabajos pioneros que se desarrollan en los principales países como es el caso de (Zeren & Özkol (2016) se basan también en el algoritmo de generación de columnas para abordar el tema

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

del “Crew Pairing” que como ya se expresó anteriormente, es la primera fase del tema en estudio. En este trabajo tienen como referente una aerolínea Turca y se hace énfasis en variables como: el número de horas de viajes gratis que debe hacer la tripulación debido a retrasos en sus vuelos (Deadhead), el número de horas que están en turno y el número de horas nocturnas que se incurre en gastos de estadía debido a sus horarios. Se encontró que utilizando dicho algoritmo es posible reducir los costos de estas tres variables, e incluso es posible establecer una serie de conexiones nocturnas en las que la tripulación pueda quedarse en sus propias casas y no incurrir en gastos adicionales. Otro enfoque utilizado en la misma aerolínea turca lo proponen Aydemir-Karadag, Dengiz & Bolat (2013) quienes utilizan una combinación de métodos heurístico y exactos, como son el algoritmo híbrido y el “Knowledge based random algorithm” cuyas soluciones son comparadas con el método de generación de columnas para el mismo problema, obteniendo como resultado que estos dos nuevos métodos son efectivos y eficientes tanto en términos de tiempos computacionales como en la calidad de la solución.

Finalmente, en términos de América Latina se tiene como referente el trabajo de Díaz-Ramírez, Huertas y Trigos (2014) quienes decidieron integrar los problemas de determinación de los horarios de vuelos y las rutas que tienen que cumplir las aeronaves (Aircraft maintenance routing problem), así como la programación de tripulación en un solo enfoque para aerolíneas que cuentan con una sola flotilla de aviones, modelo que se asemeja al implementado por las aerolíneas de bajo costo y la mayoría de las existentes en los países sura y centroamericanos. Se presentan tres enfoques distintos: en primera instancia, el problema de horario y rutas fue formulado de tal forma que maximizara las ganancias y simultáneamente cumpliera con la demanda de capacidad requerida por el número de aviones a disposición, su solución se realizó mediante el algoritmo de

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

la ruta más larga con restricciones laterales, en segunda instancia se tiene el problema de programación de la tripulación que busca minimizar los costos ocasionados por retrasos (viajes de la tripulación en calidad de pasajeros y gastos hoteleros para pasar la noche) mientras cumple con las reglas impuestas por los organismos de control así como con las políticas de la compañía, este problema fue resuelto mediante un algoritmo de generación de columnas y finalmente, en tercera instancia se tiene la integración de los dos problemas anteriores cuyo objetivo es encontrar una programación tanto para las aeronaves como para la tripulación que sea mutuamente compatible, factible y que represente el menor costo posible, para esto se utilizó también el algoritmo de generación de columnas y se obtuvo como resultado que el tiempo computacional generado no aumentó en más de una hora en referencia a las dos instancias anteriores y la reducción de costos fue mínima (de 0,4% a 0,6%).

Todo lo anterior permitió identificar como patrones en los métodos de solución más usados para la resolución del problema en estudio a los algoritmos de ramificación, generación de columnas (en ocasiones combinado con otros métodos de forma complementaria), de inteligencia de enjambre, algoritmos genéticos y métodos de programación lineal.

6 Marco de Antecedentes

(Castellanos Muñoz, 2014) desarrolló un trabajo denominado “Estado del arte de los modelos de optimización en la logística aeroportuaria” que busca presentar los términos relacionados con el vasto tema de la logística aeroportuaria, así como presentar las técnicas de optimización para la gestión del flujo de tráfico aéreo en Europa y Estados Unidos, los algoritmos para el tiempo de

vuelta (turn around), modelos de desplazamiento terrestre para optimización del rodaje y en general, técnicas que le permiten a las aerolíneas ahorrar tiempos y costos en el desplazamiento de las aeronaves de un aeropuerto a otro. Para el caso de Latinoamérica sólo se hace referencia al modelo Hub and Spoke, que implica la utilización de un aeropuerto como centro de operaciones para el caso de aquellas rutas en las que la aerolínea no puede operar vuelos directos a diferentes destinos, y cuyo objetivo es gestionar de una forma más eficiente la ocupación de las aeronaves. A pesar de no desglosar el problema de la logística aeroportuaria en sus distintos componentes, se realiza un acercamiento interesante al tema en general y permite tener una clara visión de cómo interactúa el tópico de programación de flota con las diferentes variables que se generan dentro de la logística aeroportuaria.

(Díaz-Ramírez, Huertas, & Trigos, 2014) en su trabajo “Aircraft maintenance, routing, and crew scheduling planning for airlines with a single fleet and a single maintenance and crew base” proponen un enfoque para solucionar el problema de programación del mantenimiento para las aeronaves y así mismo de la tripulación que estará a cargo de estas en las diferentes rutas de vuelo. En el artículo se contemplan aerolíneas con una sola flotilla y un sólo equipo tanto de tripulación como de mantenimiento, este modelo se asemeja a la mayoría de las líneas aéreas existentes en Latinoamérica, así como las denominadas de “bajo costo”. Para el problema de mantenimiento, la formulación se realizó con el objetivo de maximizar los ingresos cumpliendo con la demanda de aeronaves prevista. Por otra parte, el problema de la tripulación se resolvió incorporando una heurística con el fin de obtener una solución inicial factible cuya eficiencia fuera satisfactoria para las aerolíneas y se adaptó un algoritmo para resolver los problemas de precios que surgían al intentar resolver el problema mediante el algoritmo de generación de columnas. Finalmente se

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

integraron ambos problemas y se le dio solución, se realizó la prueba en tres aerolíneas importantes de América Latina y se obtuvo como resultado una pequeña reducción en los costos (0,6%) y tiempos computacionales cortos.

(Gopalakrishnan & Johnson, 2005) en su investigación “Airline Crew Scheduling: State-of-the-Art” presenta de forma muy completa las implicaciones del problema de programación de flota, teniendo en cuenta que es uno de los más complejos que enfrentan las aerolíneas en sus operaciones diarias y de igual forma el que implica mayores costos después del combustible para las aeronaves. Programar la tripulación representa un reto para las grandes aerolíneas debido al tamaño de su flota y la cantidad de personal con el que cuenta, lo que genera una red bastante amplia con diferentes opciones de apareamiento para los recursos con los que se cuenta, adicional a esto se deben considerar las regulaciones de ley que se deben cumplir en cuestiones de carga laboral y bienestar de sus empleados; todo lo anterior representa restricciones al momento de darle solución a dicho problema. Por otra parte, los autores realizan una revisión de los diferentes modelos exactos y heurísticos utilizados para obtener soluciones factibles como es el caso de la programación lineal, *sprint*, el algoritmo de volumen, *branch and cut*, algoritmos de aproximación, *branch and price* y otras formulaciones alternativas, dejando ver los diferentes enfoques que se le pueden dar al problema. No se concluye nada específico, sin embargo, se deja espacio para posterior investigación sobre la posibilidad de integrar la programación de tripulación con la de las aeronaves.

(Flórez, Walteros, Vargas, Medaglia, & Velasco, 2012) en su trabajo “A Mathematical Programming Approach to Airline Crew Pairing Optimization” prueban varios métodos de

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

solución para el problema de emparejamiento de la tripulación en una aerolínea colombiana de tamaño mediano que experimenta un proceso de crecimiento acelerado. Dicha aerolínea trabaja bajo tres condiciones: la primera que un par o emparejamiento debe comenzar y finalizar en la misma base de tripulación; la segunda afirma que ninguno de estos emparejamientos puede exceder el tiempo máximo de vuelo, tiempo máximo de servicio, tiempo mínimo de descanso, número máximo de aterrizajes y la tercera establece que un número máximo de turnos de trabajo y para que un par sea factible, debe satisfacer con las regulaciones mencionadas anteriormente.

La forma en la que esta aerolínea opera facilitó el proceso de solución, pues permitió a los autores dividir el problema original en varios subproblemas; el problema general se dividió teniendo en cuenta criterios como el tipo de aeronave que se opera (teniendo en cuenta que cada miembro de la tripulación está entrenado para operar solamente un tipo de aeronave) y el tipo de tripulación a la que pertenece (cabina de mando o cabina de pasajeros, teniendo en cuenta que diferentes normas aplican para cada caso), esto ayudó a reducir la complejidad del problema en general. En cuanto a los métodos de solución empleados, se utilizó la programación binaria para minimizar el número de tripulaciones requeridas para cubrir todas las rutas dentro del marco regulatorio, también se aplicó un modelo de partición de un conjunto (Set partitioning) que fue resuelto mediante el algoritmo de generación de columnas y cuya solución indicaba cuál de los emparejamientos generados en el problema auxiliar cubrirían todas las rutas con el menor costo posible, en los casos donde la solución a este problema no resultara entera, era necesario aplicar el método de ramificación y acotamiento. Finalmente se realizó el método de cubrimiento total de una red (Set covering) en el cuál el número de pares es minimizado cubriendo todos los vuelos por lo menos una vez, estos modelos fueron probados en programaciones reales provistas por la

aerolínea, con un promedio de 152 vuelos diarios (domésticos e internacionales) y un grupo de empleados de 245 personas. Teniendo en cuenta que la programación se realizaba de forma manual, con instancias que van desde 24 a 297 vuelos, los resultados mostraron considerables ahorros en tiempo de programación, sin contar con que se encontraron soluciones óptimas para los diferentes casos, situación que no se puede asegurar cuando la programación se realiza de forma manual.

(Martínez Quezada, 2014) en su trabajo denominado “Solución del problema CVRP mediante el algoritmo de descomposición de Dantzig-Wolfe” presenta la aplicación de dicho algoritmo de descomposición aplicado al problema de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad, usando Matlab y GAMS de forma simultánea como entorno de programación. A pesar de que no se relaciona directamente con el problema de programación de la tripulación, el problema de ruteo presenta grandes similitudes con nuestro problema en estudio, por tanto, el método de solución resulta de gran interés. El autor encuentra que en ocasiones una formulación de descomposición converge más rápido que una formulación completa, estos métodos o estrategias sirven para disminuir el tiempo computacional y alcanzar la mejor solución en tiempos razonables.

7 Marco teórico

7.1 Logística.

Es un término que hace su primera aparición en el contexto militar y fue evolucionando hasta llegar al concepto contemporáneo que provee la RAE en dónde se define como el “conjunto de medios

y métodos necesarios para llevar a cabo la organización de una empresa, o de un servicio, especialmente de distribución”. (Real Academia Española, 2017).

Desde otro punto de vista, la logística incluye todas las operaciones necesarias para mantener una actividad productiva: desde programación de compras hasta servicio post venta desde el suministro de materias primas, planificación y gestión de la producción, almacenaje, diseño, embalaje, etiquetado, clasificación hasta la distribución física.

La logística busca crear valor para los clientes, proveedores y accionistas de una empresa, está basada en estar atento a todos los detalles que conforman la cadena de suministro como contribución a la agregación de valor del producto o servicio. Bajo el anterior punto de vista, este campo se hace cada vez más importante a la hora de añadir valor permitiendo incursionar en nuevos mercados, reducir costos y generar ventas.

7.2 Logística Aeroportuaria.

La logística aeroportuaria es definida como la planeación y el control de recursos e información, los cuales crean valor para los clientes que utilizan el aeropuerto (Norin, Granberg, Yuan, & Varbrand, 2012).

El papel principal de la logística aeroportuaria es crear aeropuertos que cuenten con sistemas logísticos integrados. Esto significa percibir el aeropuerto de forma integral, como un complejo sistema multisistema. Simultáneamente con el uso de dicha integración, se puede lograr una optimización total de las actividades para poder aspirar a que funcione como un todo armonioso.

Su objetivo es la coordinación y optimización de los procesos aeroportuarios individuales y los servicios conexos que dichos procesos generan, así como la colaboración con otros aeropuertos para lograr la eficiencia máxima de la capacidad de participación de aeropuertos y compañías aéreas mediante el intercambio de información y coordinación dinámica de su interacción que maximice tanto el rendimiento como los beneficios. (Petruš, Korba, & Kolesár, 2016)

7.3 Programación de Flota.

Consiste en la administración y logística de la flota de aviones disponibles en una organización. Es decir, asignar determinada aeronave a alguno de diferentes segmentos de vuelo disponibles en una aerolínea, dependiendo de la demanda de la ruta, las ganancias que esta pueda generar y el tamaño requerido de la aeronave. La asignación de la flota comienza y termina en una base de operaciones de modo que en una secuencia la ciudad de llegada de un segmento de vuelo coincida con la ciudad de partida del siguiente; este proceso tiene como objetivo maximizar los ingresos teniendo en cuenta que todos los segmentos de vuelo sean flexibles usando la flota disponible y satisfaciendo todas las demás limitaciones que se tienen, como el caso de la tripulación de vuelo. (Gopalakrishnan & Johnson, 2005)

7.4 Programación de la Tripulación.

La programación de la tripulación se define como el problema de asignar un grupo de trabajadores (Tripulación) a un conjunto de tareas (Barnhart, y otros, 2003). Típicamente las tripulaciones son intercambiables, a pesar de que algunos casos cada tripulación posea diferentes características que definen las tareas para las que son aptas o no.

El problema de la programación de la tripulación es común en el ámbito de transporte, se puede aplicar a los sistemas transporte ferroviario, buses, transporte de carga, entre otros, todos con el mismo objetivo: cubrir todas las rutas programadas minimizando el costo operacional y cumpliendo con todas las regulaciones laborales y de seguridad impuestas.

En el caso de las aerolíneas, el proceso de programar la tripulación se deriva de una serie de operaciones precedentes como es la generación de horarios, etapa en donde se determina que vuelos serán realizados dentro de un periodo de tiempo definido; después de tener esto claro, se pasa a la asignación de la flota y el mantenimiento, especificando que aeronaves cubrirán las rutas programadas y cuando se le hará mantenimiento a los aviones, para finalmente asignar las tripulaciones anónimas a esas rutas para de esta forma completar el proceso de planeación.

7.5 Emparejamiento de las Tripulaciones

El problema de la programación de la tripulación, debido a su complejidad, se divide en dos subproblemas: el emparejamiento de las tripulaciones y la asignación de la tripulación. Estos problemas son resueltos en orden secuencial, en el emparejamiento de las tripulaciones se selecciona un conjunto de pares o emparejamientos, de tal forma que cada vuelo sea cubierto y los costos sean minimizados, mientras que en la asignación de la tripulación se asigna el personal basado en sus capacidades, experiencia, entre otros factores.

El emparejamiento de la tripulación es una secuencia de rutas o vuelos que comienzan y finalizan en la misma base (aeropuerto) siempre y cuando sea posible y teniendo en cuenta que

siempre debe satisfacerse todas las regulaciones y restricciones para la operación aérea. El periodo de tiempo que comprende dicho emparejamiento puede variar dependiendo de la aerolínea, el tipo de vuelo (doméstico o internacional) y los itinerarios previamente establecidos, el problema puede estudiarse como diario, semanal o mensual, entre más tiempo comprenda, mayor será su dificultad.

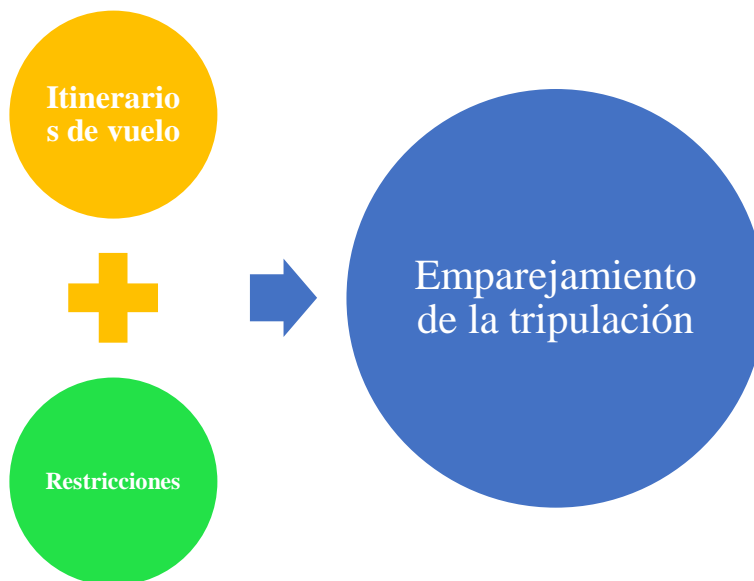


Figura 8: Componentes del problema de emparejamiento de la tripulación.

7.6 Optimización matemática.

7.6.1 Algoritmo de Generación de columnas.

La técnica de generación de columnas consiste en resolver problemas de programación lineal donde las columnas o variables del problema no son conocidas o no es práctico generarlas explícitamente en problemas que cuentan con un número considerable de variables. Para resolver estos problemas se empieza con un problema maestro, el cual es una relajación lineal del problema original y debe tener una estructura relativamente simple (se genera sólo un número pequeño de

columnas, necesario para obtener una solución factible para el problema relajado). Después hay un sub-problema que permite identificar las variables adicionales que no han sido incluidas en el problema maestro y que pueden llegar a mejorar el valor de la función objetivo. (Díaz Smith, 2009)

En la siguiente gráfica se resume cómo procede el método de generación de columnas.

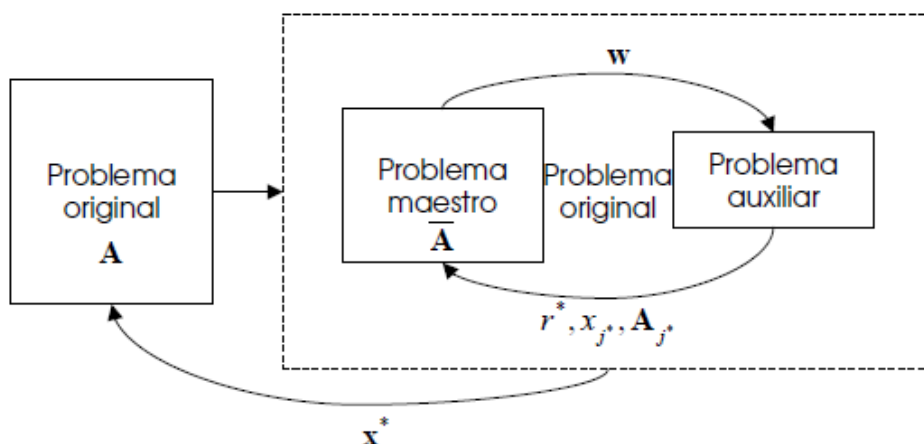


Figura 9: Marco general del método de generación de columnas. Adaptado de (Medaglia, 2008)

Se quiere resolver un problema lineal, al cual denominaremos el Problema Lineal Maestro (PLM)

$$v := \min \sum_{j \in J} c_j \lambda_j$$

Sujeto

a:

$$\sum_{j \in J} a_j \lambda_j \geq b$$

$$\lambda_j \geq 0, j \in J$$

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

Con $|J| = n$ variables y m restricciones. La idea del algoritmo es resolver el problema lineal por medio de la aplicación del Método Simplex; sin embargo, dada la enorme cantidad de columnas (asignaciones factibles), en lugar de evaluar todas las columnas respecto a su costo reducido, para determinar cuál debe adicionarse a la base, el problema de encontrar la columna con el mayor costo reducido es en sí mismo un conjunto de m problemas de optimización. El procedimiento desarrollado en el algoritmo puede describirse en los siguientes pasos:

Inicialización: Debe disponerse de un subconjunto de columnas que provean el Problema Lineal Maestro Restringido (PLMR) para el cuál sea posible determina una solución básica factible, de modo que cualquier solución básica factible del problema restringido o es también para el problema no restringido.

Prueba de optimalidad para el problema no restringido: Debe determinarse si la solución factible encontrada es óptima para el problema restringido, para ello se determina si es posible hallar una columna con el costo reducido negativo para adicionar a la base, usando para ello los precios duales asociados a la solución del problema restringido. De no existir dicha columna la solución actual del problema restringido es óptima y también lo es para el problema no restringido, con lo cual finaliza el algoritmo.

Generación de una nueva columna: En caso de no satisfacerse las condiciones de optimalidad, una (o varias) columna(s) con costo reducido negativo debe(n) ser adicionada(s) generándose un nuevo Problema Maestro Restringido, el cual puede ser reoptimizado para volver al segundo paso del algoritmo. El problema auxiliar empleado para generar esta columna se denomina “Pricing Problem”. (Maya, 2008)

7.6.2 *Problema Maestro Restringido Inicial.*

El algoritmo debe comenzar con un conjunto de columnas que provean una solución básica factible para la relajación lineal del problema original, este conjunto de columnas constituye el Problema Maestro Restringido Inicial. Una alternativa válida, que de hecho corresponde a la empleada en la implementación del algoritmo, consiste en construir una asignación factible para cada emparejamiento de la tripulación y adicionar a este conjunto de m columnas una columna artificial adicional. La columna artificial es tal que sus primeros n elementos son uno y los m restantes son cero, de esta forma junto con las columnas asociadas a cada *emparejamiento* permite siempre construir una solución básica factible. El beneficio de la columna artificial deberá ser M , donde M es una constante suficientemente grande. (Maya, 2008)

7.6.3 *Problema Auxiliar (Pricing Problem).*

De acuerdo con lo expuesto por (Maya, 2008), a partir del Problema Maestro Restringido se generan las columnas que vayan siendo necesarias hasta resolver óptimamente el problema. La generación de las columnas se hace por medio de un problema auxiliar denominado Pricing Problem.

Teniendo en cuenta que λ^* y π^* son las soluciones primal y dual respectivamente del Problema Maestro Restringido, se busca una variable no básica de costo negativo reducido para que entre a la base, resolviendo el siguiente subproblema:

$$v(PP) := \min\{c_j - \pi^* a_j \mid j \in J\}$$

Si $v(PP) < 0$, la variable λ_j y sus coeficientes en la columna (c_j, a_j) corresponden a j minimizada y se añade al PLMR; este es resuelto hasta la optimalidad para obtener los valores óptimos de la variable dual, y luego se procede a iterar hasta que no hayan variables que puedan mejorar la solución previa.

7.6.4 Descomposición de Dantzig-Wolfe.

El clásico escenario de generación de columnas se sitúa en el contexto de la descomposición de Dantzig-Wolfe, en el cual el problema en su formulación estándar puede ser entendido como la partición del conjunto de vuelos en subconjuntos que pueden ser asignados a cada emparejamiento minimizando el costo en la asignación, a este se le llama *formulación desagregada*.

$$\min \sum_{p \in P} c_p \lambda_p + \sum_{r \in R} c_r \lambda_r$$

Sujeto a:

$$\sum_{p \in P} a_p \lambda_p + \sum_{r \in R} a_r \lambda_r \geq \mathbf{b}$$

$$\sum_{p \in P} \lambda_p = 1$$

$$\lambda \geq 0$$

En esta formulación, las restricciones garantizan, respectivamente, que cada vuelo es asignado a un emparejamiento y que para cada emparejamiento es seleccionada una asignación factible. Esta formulación corresponde a la descomposición de Dantzig-Wolfe para la formulación

estándar, donde las restricciones de capacidad han sido definidas para el subproblema en el algoritmo de generación de columnas. (Lübbecke, 2011).

7.6.5 Método de Ramificación y Acotamiento (*Branch and Bound*).

Este método aborda la resolución de modelos de programación lineal entera a través de la enumeración de las posibles soluciones enteras al problema original, esto lo hace dividiendo el problema inicial en subproblemas o nodos más sencillos.

- *Divide* (ramifica) el conjunto de soluciones enteras en subconjuntos disjuntos cada vez menores.
- *Determina* (acota) el valor de la mejor solución del subconjunto.
 - En problema de minimización una cota inferior de la solución óptima de un problema MIP es la menor solución entera factible encontrada hasta el momento.
 - En problema de maximización una cota superior de la solución óptima de un problema MIP es la solución óptima del problema lineal relajado RMIP o LP.
- *Elimina* (poda) la rama del árbol si la cota indica que no puede contener la solución óptima.

Según (Ramos, 2018) el procedimiento para aplicar el método de Ramificación y Acotamiento consta de los siguientes pasos:

- *Inicialización.*
 - Se inicia con la cota inferior de la función objetivo (z), en problemas de minimización.

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

- Se resuelve una relajación del problema (habitualmente la lineal, pero pueden usarse otras). Éste es el nodo raíz.
- Aplicar acotamiento (o poda) y criterio de optimalidad al problema completo.
- Si no se puede etiquetar el problema como “acotado”, comienza una iteración completa.
- *Iteración*
 - *Ramificación:*
 - Seleccionar uno de los nodos entre los no explorados (nodos restantes).
 - Seleccionar una variable entera que tenga valor continuo en la solución óptima del nodo relajado.
 - Sea x_j^* el valor óptimo en el problema relajado
 - Se ramifica en dos ramas incorporando las restricciones. Siendo $\lfloor x_j^* \rfloor$ la parte entera de x_j^*

$$\left\{ \begin{array}{l} x_j \leq \lfloor x_j^* \rfloor \\ x_j \geq \lfloor x_j^* \rfloor + 1 \end{array} \right\}$$
 - Para variables binarias se fija el valor de la variable en 0 ó 1. No se puede repetir la ramificación.
 - Cada vez que se ramifica se añade una restricción (análisis de sensibilidad mediante el método simplex dual). El problema primal resulta no factible, el problema dual resulta factible pero no óptimo.
 - Cada rama elimina la solución óptima del problema anterior.
- *Acotamiento*
 - Para cada nodo se obtiene el valor de su función objetivo (z)

- Se intentan eliminar nodos (ramas) del árbol. Se aplican los siguientes criterios de poda para un problema de minimización:
 - i. Solución (entera o no) peor que la solución entera actual; es decir $z \geq z^*$, siendo z^* el valor de la función objetivo para la solución entera actual. Se poda o elimina la rama.
 - ii. Solución entera mejor que la actual; es decir $z < z^*$, $z^* = z$ nueva solución entera actual. Con la nueva solución se aplica el criterio α para todos los nodos que no se han eliminado.
 - iii. Si es no factible, se elimina la rama.
- *Criterio de optimalidad*

Parar cuando no existan nodos sin analizar. La solución entera actual es óptima. De lo contrario, se realiza otra iteración.

7.6.6 *Método de la Gran M.*

Según (Taha, 2012) el método de la gran M se inicia con la programación lineal en forma de ecuación. Si dicha ecuación no tiene una holgura (o una variable que pueda desempeñar el papel de una), se agrega una variable artificial R_i para formar una solución inicial parecida a la solución básica de total holgura. Sin embargo, las variables artificiales no dormán parte del problema original, y se requiere un “artificio” de modelado para igualarlas a cero en el momento en que se alcance la iteración óptima (suponiendo que el problema tenga una solución factible).

La meta deseada se logra penalizando estas variables en la función objetivo utilizando la siguiente regla:

Dado M , un valor positivo suficientemente grande (matemáticamente hablando $M \rightarrow \infty$), el coeficiente objetivo de una variable artificial representa una penalización apropiada si

$$\text{Coef. objetivo de la variable artificial} = \begin{cases} -M, & \text{en problemas de maximización} \\ M, & \text{en problemas de minimización} \end{cases}$$

8 Terminología

8.1 Vuelo o trayecto de vuelo (Leg):

Trayecto que realiza un avión u otro vehículo aéreo, haciendo o no escalas, entre el punto de origen y el destino. Unidad primaria de datos para el proceso de programación de la tripulación.

8.2 Turno o periodo de servicio de vuelo (Duty):

Tiempo total desde el momento en que un miembro de la tripulación comienza a prestar servicio, inmediatamente después de un periodo de descanso, y antes de hacer un vuelo o una serie de vuelos, hasta el momento en que se releva de todo servicio después de haber completado tal vuelo o serie de vuelos. Después de cada turno, sin importar la ubicación en la que se encuentre la tripulación, debe haber un periodo de descanso definido. (Oficina de Transporte Aéreo, 2015).

8.3 Emparejamiento o Par (Pairing):

Secuencia de vuelos que comienza y termina en una ubicación determinada y consta de uno o más *turnos*.

8.4 Tiempo de vuelo (Flying Time):

De la tripulación, el tiempo transcurrido desde el momento en que la aeronave empieza a moverse por cualquier medio con el propósito de despegar, hasta el momento en que se detiene al finalizar el vuelo (de «cuña a cuña»). (Oficina de Transporte Aéreo, 2015).

8.5 Tiempo fuera de la base (Elapsed Time):

Tiempo transcurrido desde el momento en que la aeronave despegar, hasta el momento que aterriza nuevamente.

8.6 Tiempo de servicio (Service Time):

Es la suma total de los tiempos durante los cuales un tripulante realiza actividades al servicio del Explotador, y no deberá exceder los tiempos de servicio máximo permitidos. (Oficina de Transporte Aéreo, 2015)

8.7 Tiempo muerto (Deadhead):

Tiempo en el cual un miembro de la tripulación vuela como pasajero en lugar de viajar como miembro de la cabina de mando o auxiliar de vuelo, pero aun así está de turno.

8.8 Tiempo de descanso (Rest time):

Lapso durante el cual los tripulantes son relevados de todo servicio. (Oficina de Transporte Aéreo, 2015)

8.9 Hora Bloque (Block Time):

Tiempo total transcurrido desde el momento en que la aeronave empieza a moverse por cualquier medio con el propósito de despegar, hasta el momento en que se detiene al finalizar el vuelo (de “cuña a cuña”). (Oficina de Transporte Aéreo, 2015).

8.10 Tripulación (Crew):

Conjunto de personas titulares de las correspondientes licencias, a quienes se le asigna obligaciones esenciales para la operación de una aeronave, durante el tiempo de vuelo. La tripulación incluye:

8.10.1 Tripulación de Vuelo:

Integrada por El Comandante o piloto al mando y el Copiloto o cualquier otro piloto que ejerza funciones como tal durante el vuelo.

8.10.2 Otros Tripulantes.

En las aeronaves que los requieran, conformados por El Ingeniero de Vuelo, Navegante y Auxiliar (es) de Servicios a Bordo. (Oficina de Transporte Aéreo, 2015).

8.11 Base de tripulación (Crew Base):

Lugar donde el explotador asigna a uno o más tripulantes para prestar servicios habitualmente.

8.12 Sector:

Es el fragmento de una asignación de vuelo, está comprendida entre un despegue y el siguiente aterrizaje. (Oficina de Transporte Aéreo, 2015)

8.13 Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC):

Conjunto de normas de carácter general y obligatorio, emanadas de la UAEAC a través de su Director General, en ejercicio de facultades que le otorga la Ley en tal sentido, que regulan aspectos propios de la aviación civil, en concordancia con otras normas nacionales e internacionales sobre la materia y en especial con la Parte Segunda del Libro Quinto del Código de Comercio y con el Convenio de Chicago de 1.944 Sobre Aviación Civil Internacional y sus anexos técnicos. (Oficina de Transporte Aéreo, 2015)

9 Formulación y desarrollo del algoritmo

El emparejamiento de la tripulación (Crew Pairing en inglés) se propone como un modelo de programación entera-mixta en el trabajo de (AhmadBeygi, Cohn, & Weir, 2009), basado en un conjunto de variables binarias que determinan si un vuelo es secuencial con otro; a partir de su solución se busca posteriormente programar la asignación de la tripulación (Crew Scheduling). La solución a este problema es una secuencia de vuelos que forman emparejamientos factibles los cuales buscan reducir el costo de la ruta cumpliendo con las restricciones aplicadas. Nuestro modelo está basado en el propuesto por estos autores, adaptando la política aeroportuaria actual regulada por la Aeronáutica Civil colombiana y a la legislación vigente. En la Figura 10 se presenta la estructura utilizada por el algoritmo para dar solución al problema de programación de tripulación CSP.

Algoritmo de solución del problema de programación de la tripulación

Camila Rodríguez y Nathalia Gutiérrez

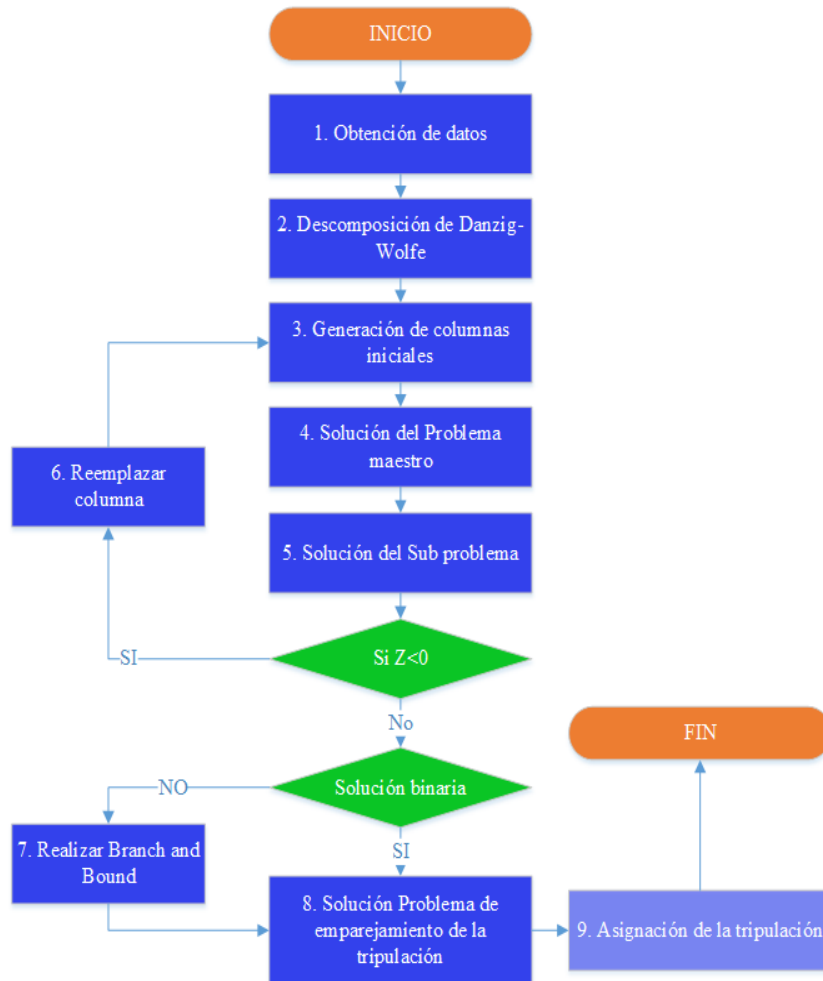


Figura 10: Algoritmo de solución del problema de programación de la tripulación. Nota: Elaborado con el software Microsoft Visio.

El primer paso para la aplicación del algoritmo es la definición de los parámetros del problema, los cuales fueron obtenidos a través de una generación de instancias basadas en el contexto nacional. A partir de esta información y teniendo en cuenta las características del problema, se aborda mediante generación de columnas utilizando la descomposición de Dantzig-Wolfe,

planteando un problema maestro relajando la restricción de la naturaleza discreta de las variables, y un subproblema para hallar la solución.

Para la generación de las columnas iniciales el algoritmo se basa en la técnica de la gran M, y a partir de estas se generan nuevas columnas mediante la iteración de los problemas maestro y subproblema. Este proceso se realiza de manera cíclica mientras el subproblema sugiera que existe una mejor solución, en cuyo caso se reemplaza la columna generada por la que menos valor aporte a la función objetivo. Por último, si los valores asociados a las variables en la solución encontrada no cumplen la condición de ser binarias, se debe utilizar con un algoritmo de exploración de soluciones que satisfagan estas restricciones.

9.1 Obtención de datos

En la literatura es común encontrar que se soluciona del problema de la asignación de la tripulación en la logística aeroportuaria a diferentes aerolíneas, dada la complejidad y la importancia de resolver éste problema, se evidencia que las soluciones mostradas en la literatura son específicas para aerolíneas determinadas es necesario resaltar que la información es proporcionada por las mismas y manejan cláusula de confidencialidad para los investigadores y personas dedicadas a resolver el problema de programación de la tripulación, por ende no es posible tener acceso a ellas ya que no se cuenta con la suficiente cantidad de datos reales y se hace necesaria la generación de datos sintéticos para realizar la construcción de instancia sobre la cual se trabaja el algoritmo y se evalúa el método.

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

La instancia usada en el presente trabajo fue generada de la siguiente forma: como parámetros básicos de entrada es necesario saber los aeropuertos de salida y de llegada con sus respectivas horas los cuales se obtuvieron de la página de Avianca (Avianca, 2018) teniendo en cuenta solo los vuelos domésticos. Se tomaron 200 vuelos^{*}: ($f = 200$), correspondientes a trayectos entre las ciudades de Bogotá, Medellín, Barranquilla y Bucaramanga, tomando como única base de tripulación la ciudad de Bogotá: ($\omega = 1$).

Como parámetros correspondientes a regulación se encuentran los que son estipulados por la aerolínea y los que son estipulados por los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC). Para la regulación estipulada por la aerolínea se asumirán los valores de los parámetros de la siguiente manera: máximo número de turnos en el emparejamiento: ($D = 4$); porcentaje de tiempo fuera de la base del emparejamiento aplicado a la función costo del emparejamiento: ($\alpha = 1\%$); porcentaje de tiempo fuera de la base del turno aplicado a la función costo del turno ($\beta = 1\%$); mínimo tiempo requerido entre dos vuelos consecutivos en un turno: ($\tau = 30$ min); máximo tiempo permitido en un turno: ($\sigma = 180$ min); mínimo pago garantizado de un turno: ($\gamma = 240$ min); máximo tiempo de vuelo de un turno: ($\varphi = 360$ min); máximo tiempo fuera de la base de un turno: ($\delta = 600$ min); en cuanto a los parámetros estipulados por los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC) el mínimo tiempo de descanso entre turnos consecutivos: ($\rho = 600$) min, aplica para vuelos menores de 4 horas consecutivas, para seis (6) o menos sectores en donde hayan dos pilotos se

^{*} Se asume que la aeronave usada para realizar estos trayectos tiene siempre la misma capacidad, para este caso teniendo en cuenta la frecuencia de los vuelos de la instancia podrían usarse las aeronaves A318, A319 y A320 con capacidad de 100,120 y 150 pasajeros respectivamente, las otras aeronaves son o muy grandes o muy pequeñas y para los trayectos

tiene que las máximas horas de servicio de los pilotos e ingenieros de vuelo para el tipo de aeronave que opera en este caso son 12:30 al día; en las asignaciones de vuelo que sean programadas entre las 15:00 y las 3:00 del día siguiente, el tiempo de servicio de los tripulantes se reducirá en una (1 hora); el tiempo de servicio de los tripulantes que se asignan a un vuelo empieza tenerse en cuenta una hora antes de la iniciación programada de los vuelos domésticos y se termina al finalizar el vuelo; el tiempo máximo de servicio dentro de periodos de 24 horas es de 12:00 horas para vuelos nacionales. (Oficina de Transporte Aéreo, 2015)

9.2 Descomposición de Dantzig-Wolfe.

La descomposición de Dantzig-Wolfe tiene su origen en la programación lineal, pero no es exclusiva de ella. Ya que si se toma un problema de programación entera mixta (como es el caso del problema planteado) y éste se relaja en la condición de algunas variables pertenecientes al problema maestro, se puede hacer uso de esta técnica para explorar soluciones exactas. La formulación de los problemas maestro y subproblema se detallan en las secciones 9.4 y 9.5 respectivamente.

9.3 Generación de la columna inicial

Se utiliza el enfoque de la gran M para generar una solución factible inicial compuesta de un conjunto de “emparejamientos artificiales” que cubren todos los vuelos.

Esos emparejamientos no son realmente factibles, pero pretendemos que sí lo sean. Cada emparejamiento artificial solo cubre un vuelo. La matriz de coeficientes para las parejas artificiales es, por ende, la matriz de identidad. El costo de cada emparejamiento artificial equivale a una gran

M; un número lo suficientemente grande como para garantizar que ningún emparejamiento artificial permanezca en la solución por mucho tiempo.

9.4 Problema maestro

El problema maestro propuesto busca de manera simple la minimización de los costos, restringiendo que los vuelos pertenezcan a uno y sólo a un emparejamiento. Como se explicó en las secciones anteriores, la descomposición de Dantzig-Wolfe relaja la restricción de integridad de las variables por lo que X_p no es binaria; por otra parte se inicia con una variable artificial por cada vuelo, que indica que cada vuelo pertenece a un emparejamiento (inicialmente artificial y no factible) generándose una matriz identidad a partir de las restricciones planteadas.

$$Z: = \min \sum_{p \in P} c_p x_p$$

Sujeto a:

$$\sum_{p \in P} \delta_{fp} x_p = 1 \quad \forall f \in F$$

$$X_p, \quad \epsilon \{0,1\} \quad \forall p \in P$$

$$X_p = \{1$$

$$x_p = \begin{cases} 1 & \text{si el pairing es escogido} \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases} \quad \forall p \in P$$

$\delta_{fp} = 1$ si el vuelo f es incluido en el emparejamiento p y 0 de otra forma

$c_p =$ costo del emparejamiento p

$P =$ conjunto de emparejamientos factibles

$F =$ conjunto de vuelos

Al resolver el problema maestro se obtienen los valores duales de cada restricción y con estos se alimenta el subproblema.

9.5 Subproblema

Partiendo de la condición de linealidad planteada para el problema maestro, este a su vez tendrá un problema dual, que en este caso es el subproblema; éste además contempla la mayoría de restricciones del problema original. En el modelo planteado por (AhmadBeygi, Cohn, & Weir, 2009) se muestra a continuación.

Parámetros Definidos sobre el Conjunto de Vuelos (\mathcal{F})^{*}

$\pi_f \in \mathbb{R}^+$	$\forall f \in \mathcal{F}$	valor dual del vuelo f
$t_f \in [0,24]$	$\forall f \in \mathcal{F}$	hora de salida del vuelo f
$l_f \in [0,24]$	$\forall f \in \mathcal{F}$	hora de llegada del vuelo f
$b_f > 0$	$\forall f \in \mathcal{F}$	hora bloque del vuelo f
o_f	$\forall f \in \mathcal{F}$	origen del vuelo f
d_f	$\forall f \in \mathcal{F}$	destino del vuelo f

* Todas las unidades de tiempo están dadas en horas

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

Parámetros Correspondientes a la Regulación*

$D \in \mathbb{Z}^+$	máximo número de turnos en un emparejamiento
$\alpha \in (0,1)$	porcentaje de tiempo fuera de la base de un emparejamiento aplicado a la función de costo del mismo.
$\beta \in (0,1)$	porcentaje de tiempo fuera de la base de un turno aplicado a la función de costo del mismo.
ω	base de la tripulación
$\tau \in \mathbb{R}^+$	tiempo mínimo requerido entre dos vuelos consecutivos en un turno
$\sigma \in \mathbb{R}^+$	tiempo máximo permitido entre dos vuelos consecutivos en un turno
$\gamma \in \mathbb{R}^+$	mínimo tiempo de turno con pago garantizado
$\varphi \in \mathbb{R}^+$	tiempo máximo de vuelo en turno
$\delta \in \mathbb{R}^+$	tiempo máximo fuera de la base en un turno
$\rho \in \mathbb{R}^+$	tiempo mínimo de descanso entre dos turnos consecutivos.

Conjuntos

$\mathcal{D} = \{1, \dots, D\}$	conjunto de todos los índices posibles de los turnos
$\mathcal{D}' = \{1, \dots, D - 1\}$	conjunto de todos los índices posibles de los turnos excepto el último
$\mathcal{D}'' = \{2, \dots, D\}$	conjunto de todos los índices posibles de los turnos excepto el

* $\gamma < \varphi < \delta$

primero

$\mathcal{D}''' = \{2, \dots, D - 1\}$ conjunto de todos los índices posibles de los turnos excepto el primero y el último

$$S = \left\{ (f1, f2) \in \mathcal{F} \text{ s. a. } d_{f1} = o_{f2}, b_{f1} + b_{f2} \right. \\ \left. \leq \varphi \text{ y } \left\{ \begin{array}{l} t_{f2} - l_{f1} \geq \tau \\ t_{f2} - l_{f1} \leq \sigma \\ l_{f2} - t_{f1} \leq \delta \end{array} \right\} \text{ ó } \left\{ \begin{array}{l} l_{f1} > t_{f2} \\ t_{f2} + 24 - l_{f1} \geq \tau \\ t_{f2} + 24 - l_{f1} \leq \sigma \\ l_{f2} + 24 - t_{f1} \leq \delta \end{array} \right\} \right\}$$

$$\mathcal{O} = \{(f1, f2) \in \mathcal{F} \text{ s. a. } d_{f1} = o_{f2}\}$$

$$\mathcal{B} = \{f \in \mathcal{F} \text{ s. a. } o_{f1} = \omega\}$$

$$\mathcal{E} = \{f \in \mathcal{F} \text{ s. a. } d_{f1} = \omega\}$$

S: Conjunto de todos los pares de vuelo que pueden ser secuenciales en el mismo turno. La destinación del primer vuelo debe coincidir con el origen del segundo, el tiempo total de los dos no puede exceder el total de tiempo permitido en un turno, el intervalo de tiempo entre el aterrizaje del primero y el despegue del segundo debe estar entre el mínimo y el máximo tiempo permitido. El total de tiempo fuera de la base no puede sobrepasar el límite de tiempo para un turno. Nótese que cuando los vuelos cruzan de la media noche (por ejemplo, el primero llega a las 11 p.m. y el segundo despegue a la 1 a.m.) se necesita sumarle a la hora de despegue del segundo 24 horas para denotar que es un día subsecuente en el vuelo.

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

O: Conjunto de todos los pares de vuelo que pueden abarcar un turno. Este conjunto incluye todos los pares de vuelo en donde la destinación del primero concuerda con el origen del segundo – si el tiempo entre estos dos es inadecuado para el descanso debido, entonces el segundo vuelo puede ser cambiado para un día después e incrementar el descanso en 24 horas.

B: Conjunto de todos los vuelos que se originan en la base de tripulación y por tanto pueden comenzar un emparejamiento.

E: Conjunto de todos los vuelos que se terminan en la base de tripulación y por tanto pueden finalizar un emparejamiento.

Otros Parámetros

Los siguientes parámetros incluyen el descanso nocturno (r) y los tiempos de espera (s) entre dos vuelos consecutivos.

$$r(f_1, f_2) \in \mathcal{F} = \left\{ \begin{array}{ll} t_{f_2} - l_{f_1} & \text{si } t_{f_2} - l_{f_1} \geq \rho \\ t_{f_2} + 24 - l_{f_1} & \text{si } t_{f_2} > l_{f_1} \text{ y } t_{f_2} - l_{f_1} < \rho \\ t_{f_2} + 24 - l_{f_1} & \text{si } l_{f_1} > t_{f_2} \text{ y } t_{f_2} + 24 - l_{f_1} \geq \rho \\ t_{f_2} + 48 - l_{f_1} & \text{si } l_{f_1} > t_{f_2} \text{ y } t_{f_2} + 24 - l_{f_1} < \rho \end{array} \right\}$$

$$s(f_1, f_2) \in S = \left\{ \begin{array}{ll} t_{f_2} - l_{f_1} & \text{si } t_{f_2} > l_{f_1} \\ t_{f_2} + 24 - l_{f_1} & \text{si } t_{f_2} < l_{f_1} \end{array} \right\}$$

$r(f_1, f_2)$: es el periodo de descanso entre dos vuelos seguidos en dos turnos consecutivos. Es decir, la hora de salida del segundo vuelo menos la hora de llegada del primer vuelo. Si este periodo de tiempo es menos del mínimo requerido, entonces el segundo vuelo debe cambiarse para un día

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

después y el periodo de descanso se incrementará en 24 horas. Si la hora de llegada del primer vuelo se da después de la hora de salida del segundo vuelo, entonces el segundo vuelo también debe ser cambiado para el día siguiente. Finalmente, puede ser necesario tener que cambiar un vuelo dos días seguidos para poder tener en cuenta la hora si la longitud del periodo de descanso resultante del primer cambio es menor que el mínimo requerido.

$s(f1, f2)$: es el tiempo entre dos vuelos consecutivos que se siguen en el mismo turno (tiempo de espera), donde las 24 horas se deben adicionar al segundo vuelo si hay que cambiarlo para un día después.

Variables de Decisión

$v_f \in \{0,1\}$	$\forall f \in \mathcal{B}$	si f es o no el primer vuelo del emparejamiento.
$w_{f,d} \in \{0,1\}$	$\forall f \in \mathcal{E}, d \in \mathcal{D}$	si f es o no el último vuelo del emparejamiento y este tiene una longitud de d turnos
$x_{f1,f2,d} \in \{0,1\}$	$\forall (f1, f2) \in \mathcal{S}, d \in \mathcal{D}$	si $f1$ va o no seguido de $f2$ que abarca el d^{th} turno.
$y_{f1,f2,d} \in \{0,1\}$	$\forall (f1, f2) \in \mathcal{O}, d \in \mathcal{D}'$	si $f1$ finaliza o no el d^{th} turno y está seguido de $f2$ que comienza el $d + 1$ turno
$z_{f,d} \in \{0,1\}$	$\forall f \in \mathcal{F}, d \in \mathcal{D}$	si f aparece o no el d^{th} turno
$u_d \in \{0,1\}$	$\forall d \in \mathcal{D}$	si el emparejamiento contiene o no por lo menos d turnos.
$C \in \mathbb{R}^+$		costo del emparejamiento.

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

$T \in \mathbb{R}^+$		tiempo fuera de la base del emparejamiento
$c_d \in \mathbb{R}^+$	$d \in \mathcal{D}$	costo del d^{th} turno
$e_d \in \mathbb{R}^+$	$d \in \mathcal{D}$	tiempo fuera de la base del d^{th} turno

Función Objetivo

La siguiente función objetivo minimiza el costo reducido del emparejamiento – el costo real del emparejamiento menos la suma de las contribuciones duales de cada vuelo incluido en dicho emparejamiento.

$$\min C - \sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \pi_f z_{f,d}$$

Restricciones de Costo

$$c_d \geq \gamma u_d \quad \forall d \in \mathcal{D} \quad (1)$$

$$c_d \geq \sum_{f \in \mathcal{F}} b_f z_{f,d} \quad \forall d \in \mathcal{D} \quad (2)$$

$$c_d \geq \beta e_d \quad \forall d \in \mathcal{D} \quad (3)$$

$$T = \sum_{d \in \mathcal{D}} e_d + \sum_{(f_1, f_2) \in \mathcal{O}} \sum_{d \in \mathcal{D}'} r_{f_1, f_2} y_{f_1, f_2, d} \quad (4)$$

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

$$C \geq \sum_{d \in \mathcal{D}} c_d \quad (5)$$

$$C \geq \alpha T \quad (6)$$

Las restricciones del 1 al 6 son usadas para computar el costo del emparejamiento. Las restricciones 1, 2 y 3 definen el costo de cada turno como el máximo de tres cantidades: el mínimo tiempo con pago garantizado, el tiempo total de vuelo del turno, y una fracción del total del tiempo fuera de la base del turno (Note que, si el emparejamiento contiene menos de D turnos, el lado de derecho de estas restricciones será cero para los valores apropiados de d). Las restricciones 5 y 6 definen el costo del emparejamiento como el máximo del costo de los turnos contenidos en el emparejamiento y una fracción del tiempo total lejos de la base, el cual se define en la restricción 4 como la suma del tiempo fuera de base de todos los turnos en el emparejamiento más la suma de los periodos de descanso entre turnos.

Restricciones que definen las variables auxiliares.

$$u_1 = 1 \quad (7)$$

$$u_d = \sum_{(f_1, f_2) \in \mathcal{O}} y_{f_1, f_2, d-1} \quad \forall d \in \mathcal{D}'' \quad (8)$$

$$z_{f,1} = \sum_{(f_1, f) \in \mathcal{S}} x_{f_1, f, 1} \quad \forall f \in \mathcal{F} \setminus \mathcal{B} \quad (9)$$

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

$$z_{f,1} = v_f + \sum_{(f,1) \in \mathcal{S}} x_{f,1} \quad \forall f \in \mathcal{B} \quad (10)$$

$$z_{f,d} = \sum_{(f,1) \in \mathcal{O}} y_{f,1,d} + \sum_{(f,1) \in \mathcal{S}} x_{f,1,d} \quad \forall f \in \mathcal{F} \setminus \mathcal{E}, \forall d \in \mathcal{D}''' \quad (11)$$

$$z_{f,d} = w_{f,d} + \sum_{(f,1) \in \mathcal{O}} y_{f,1,d} + \sum_{(f,1) \in \mathcal{S}} x_{f,1,d} \quad \forall f \in \mathcal{E}, \forall d \in \mathcal{D}''' \quad (12)$$

$$z_{f,D} = \sum_{(f,1) \in \mathcal{S}} x_{f,1,D} \quad \forall f \in \mathcal{F} \setminus \mathcal{E} \quad (13)$$

$$z_{f,D} = w_{f,D} + \sum_{(f,1) \in \mathcal{S}} x_{f,1,D} \quad \forall f \in \mathcal{E} \quad (14)$$

La restricción 7 asegura que un emparejamiento contenga por lo menos un turno. Para todo $d > 1$, la restricción 8 afirma que el d^{th} turno existe si contiene una conexión nocturna del turno precedente. La restricción 9 afirma que un vuelo existe en el primer turno si es precedido por otro vuelo en ese mismo turno; si el vuelo se origina en una base de tripulación, entonces también puede ser el primer vuelo de un emparejamiento (restricción 10). Si un vuelo está presente en cualquier turno que no sea el primero, entonces debe ser el último vuelo de ese turno (y por tanto debe preceder un periodo de descanso) o debe ir seguido por otro vuelo en ese turno (restricción 11). Si el vuelo finaliza en una base de tripulación entonces quizás sea el último vuelo en el emparejamiento (restricción 12). Las restricciones 13 y 14 abarcan el caso especial donde puede

que no haya turno subsecuente y, por lo tanto, ningún vuelo puede preceder a un periodo de descanso.

Restricciones de los turnos

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} b_f z_{f,d} \leq \varphi \quad \forall d \in \mathcal{D} \quad (15)$$

$$e_d = \sum_{f \in \mathcal{F}} b_f z_{f,d} + \sum_{(f,f1)} S_{f,f1} x_{f,f1,d} \quad \forall d \in \mathcal{D} \quad (16)$$

$$e_d \leq \delta \quad \forall d \in \mathcal{D} \quad (17)$$

Las restricciones 15 a 17 garantiza la factibilidad de los turnos. En la restricción 15 asegura que el tiempo total de vuelo en el d^{th} turno no exceda el tiempo máximo de vuelo permitido. La restricción 16 define el tiempo fuera de la base del d^{th} turno como la suma de todos los tiempos de vuelo de las rutas incluidas en dicho turno más la suma de todos los tiempos de espera entre estos. La restricción 17 previene que el d^{th} turno viole el máximo tiempo fuera de la base que está permitido.

Restricciones del emparejamiento.

La siguiente restricción afirma que cada vuelo f puede estar incluido por máximo en una ocasión en el emparejamiento.

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} z_{f,d} \leq 1 \quad \forall f \in \mathcal{F} \quad (18)$$

Restricciones de Balance

Las restricciones 19 a 28 son análogas a las restricciones de equilibrio en un problema de flujo de red, obligando a los vuelos elegidos a formar una ruta secuencial.

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} v_f = 1 \quad (19)$$

$$\sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f_1, f) \in \mathcal{E}} x_{f_1, f, 1} = \sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f, f_1) \in \mathcal{E}} x_{f, f_1, 1} + \sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f, f_1) \in \mathcal{O}} y_{f, f_1, 1} \quad \forall f \in \mathcal{F} \setminus \mathcal{B} \cup \mathcal{E} \quad (20)$$

$$v_f + \sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f_1, f) \in \mathcal{E}} x_{f_1, f, 1} = \sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f, f_1) \in \mathcal{E}} x_{f, f_1, 1} + \sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f, f_1) \in \mathcal{O}} y_{f, f_1, 1} \quad \forall f \in \mathcal{B} \quad (21)$$

$$\sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f_1, f) \in \mathcal{E}} x_{f_1, f, 1} = \sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f, f_1) \in \mathcal{E}} x_{f, f_1, 1} + \sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f, f_1) \in \mathcal{O}} y_{f, f_1, 1} + w_{f, 1} \quad \forall f \in \mathcal{E} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f_1, f) \in \mathcal{E}} x_{f_1, f, d} + \sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f_1, f) \in \mathcal{O}} y_{f_1, f, d-1} \\ = \sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f, f_1) \in \mathcal{E}} x_{f, f_1, d} + \sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f, f_1) \in \mathcal{O}} y_{f, f_1, d} \quad \forall f \in \mathcal{F} \setminus \mathcal{E}, \forall d \in \mathcal{D}''' \quad (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f_1, f) \in \mathcal{E}} x_{f_1, f, d} + \sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f_1, f) \in \mathcal{O}} y_{f_1, f, d-1} \\ = \sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f, f_1) \in \mathcal{E}} x_{f, f_1, d} + \sum_{f_1 \in \mathcal{F}, (f, f_1) \in \mathcal{O}} y_{f, f_1, d} + w_{f, d} \quad \forall f \in \mathcal{E}, \forall d \in \mathcal{D}''' \quad (24) \end{aligned}$$

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

$$\sum_{f1 \in \mathcal{F}, (f1, f) \in \mathcal{S}} x_{f1, f, D} + \sum_{f1 \in \mathcal{F}, (f1, f) \in \mathcal{O}} y_{f1, f, D-1} = \sum_{f1 \in \mathcal{F}, (f, f1) \in \mathcal{S}} x_{f, f1, D} + w_{f, D} \quad \forall f \in \mathcal{E} \quad (25)$$

$$\sum_{f1 \in \mathcal{F}, (f1, f) \in \mathcal{S}} x_{f1, f, D} + \sum_{f1 \in \mathcal{F}, (f1, f) \in \mathcal{O}} y_{f1, f, D-1} = \sum_{f1 \in \mathcal{F}, (f, f1) \in \mathcal{S}} x_{f, f1, D} \quad \forall f \in \mathcal{F} \setminus \mathcal{E} \quad (26)$$

La restricción 19 asegura la existencia del primer vuelo para el emparejamiento. La 26 afirma que si un vuelo aparece en el primer turno (y por tanto es precedido por un vuelo en el primer turno), entonces debe estar seguido por otro vuelo en el primer turno o preceder un periodo de descanso que lleve al segundo turno. Si el vuelo se origina en una base de tripulación, entonces puede también ser el primer vuelo del emparejamiento (y por tanto el término adicional en la parte izquierda de la restricción 21). Si el vuelo termina en la base de tripulación, entonces también puede ser el último vuelo del emparejamiento (siendo el término adicional en la parte derecha de la restricción 22).

Para $d > 1$, un vuelo aparece en el d^{th} turno si está precedido por otro vuelo del mismo turno o está seguido de un periodo de descanso. Si un vuelo aparece en el d^{th} turno, entonces debe ir seguido de un vuelo que se encuentre dentro del mismo d^{th} turno o preceder un periodo de descanso que llevará al turno $d + 1$ (restricción 23). Si el vuelo termina en la base de tripulación, entonces puede también ser el último del emparejamiento (y por tanto el término adicional en el lado derecho de la restricción 24).

Finalmente, si el vuelo aparece en el D^{th} turno, entonces no puede preceder un periodo de descanso, pues no puede haber turnos subsecuentes (de ahí que se suprima el término correspondiente de las restricciones 25 y 26).

Cómo se mencionó en la sección 7.7 el subproblema es alimentado por la información de los valores duales de las restricciones y se encarga de evaluar si existe un nuevo emparejamiento con el costo reducido negativo, que mejore el costo total de la solución.

9.6 Reemplazar columnas

Tal como se indicó en la Figura 10 si el costo (z) de la función objetivo del subproblema es negativo, se entiende que el emparejamiento (columna) propuesto por el subproblema mejora la solución del master; el nuevo emparejamiento debe reemplazar uno existente, para el criterio de eliminación se usa el cálculo de Ratio.

En el momento que el costo del subproblema tome valores no negativos se tendrá la solución, ya que se entenderá que no existe otro emparejamiento que pueda ofrecer un costo reducido con respecto a los existentes.

9.7 Branch and Bound

Una vez obtenida la solución óptima del problema que minimiza la función de costos totales, se debe considerar que, si la solución del problema master no es entera, se debe explorar con algún método como B&B para hallar la solución óptima entera. Para el caso del problema planteado las soluciones cumplieron la condición de integridad por lo cual no fue necesario realizar B&B.

9.8 Solución del problema de emparejamiento de la tripulación

Como no fue necesario realizar B&B y la solución del subproblema tomó un valor no negativo se llega a la solución del problema de emparejamiento de la tripulación dando así paso a darle solución al problema de programación de la tripulación en Logística Aeroportuaria.

9.9 Asignación de la tripulación

Al tener el emparejamiento de la forma en la que se asigna la tripulación está dada bajo ciertas normas o parámetros sujetos a la reglamentación laboral que aplique a la tripulación en el país, la normativa vigente que respecta a la aeronavegabilidad colombiana y que afecte de alguna forma a los tripulantes y por último parámetros propios de la aerolínea a la hora de realizar esta asignación como por ejemplo la experiencia de los pilotos, el tipo de avión, las preferencias de vacaciones de los pilotos, las características del vuelo que apliquen a las habilidades especiales o necesarias de tripulación de vuelo que se deban tener para asignar a cada emparejamiento previamente establecido, los costos en los que se incurre cuando la tripulación debe quedarse fuera de la base o devolverse a la base sin un vuelo asignado, entre muchas otras.

9.10 Evaluación de desempeño del algoritmo desarrollado

El algoritmo desarrollado fue experimentado con los datos mencionados en el capítulo 9.1; esto con el fin de analizar la eficacia con la que las soluciones encontradas generen el emparejamiento de la tripulación, para así dar paso a la asignación de la misma. También se analizan su desempeño en base a los tiempos computacionales.

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

El algoritmo fue programado en Matlab R2017a, donde un script gestiona la ejecución e información de los problemas maestro y subproblema; los cuales a su vez fueron programados en GAMS WIN 64 23.9.5. Los códigos de programación se encuentran en los apéndices A, B y C.

Como primera medida se analiza que los turnos y emparejamientos cumplan con las restricciones asociadas al modelo matemático del subproblema, que es el encargado de garantizar la factibilidad de las soluciones.

Estas restricciones afectan la conformación de los turnos y emparejamientos a través de costos, tiempo, lugar de origen y destino de los vuelos.

Se analizó de manera exhaustiva las soluciones halladas con el algoritmo frente al cumplimiento de las restricciones del modelo matemático, y se encontró que las columnas o soluciones generadas satisfacen dichas restricciones, por lo que se observa la eficacia del algoritmo en la generación de los emparejamientos. A su vez en cada iteración del subproblema, el costo total disminuye, cumpliendo con su objetivo de de minimización. Las secuencias de emparejamientos obtenidos se presentan en el apéndice D.

En la Figura 11 se ilustra la relación que tienen las variables binarias $X_{f1,f2,d1}$, $Y_{f3,f4,d1}$, V_{f1} y $W_{f6,d2}$ para interconectarse a través de sus turnos (d1 y d2) que conformar un emparejamiento.

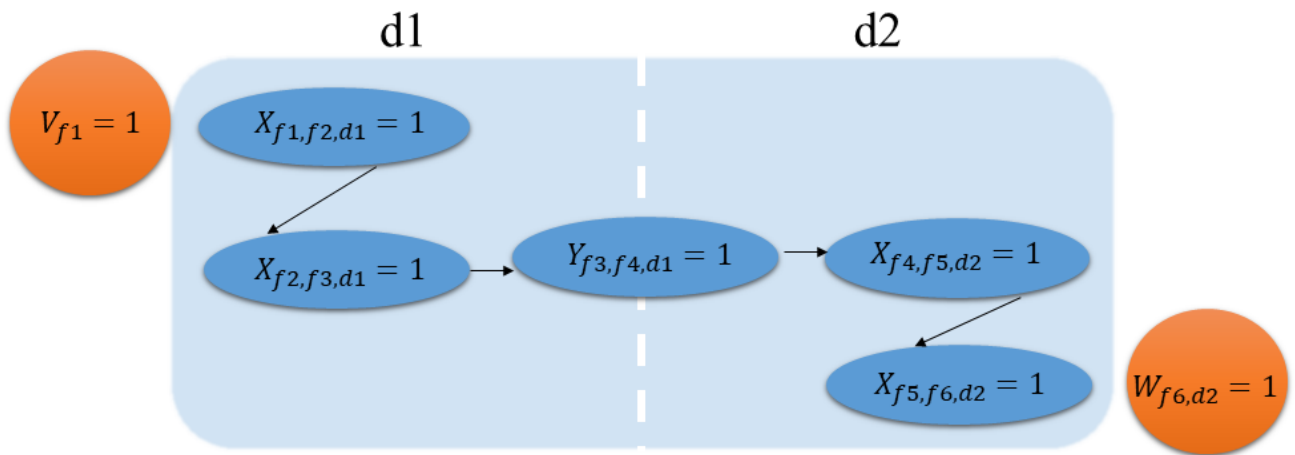


Figura 11: Estructura general de un emparejamiento.

V_{f1} Indica que el vuelo f1 es el primero del emparejamiento.

$X_{f1,f2,d1}$ Indica que el vuelo f2 es precedido por f1 en el turno d1.

$Y_{f3,f4,d1}$ Indica que el vuelo f3 del turno d1, conecta con el siguiente turno a través del vuelo f4.

$W_{f6,d2}$ Indica que el vuelo f6 es el último del turno.

En la *Figura 12* y *Figura 13* se muestran 200 vuelos que se tomaron con un alfa y beta iguales del cien por ciento.

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

vuelo	h salida	h llegada	duración	origen	destino	vuelo	h salida	h llegada	duración	origen	destino
1	08:30	10:02	92	BAQ	BGO	51	08:30	10:02	92	BAQ	BGO
2	10:25	11:57	92	BAQ	BGO	52	10:25	11:57	92	BAQ	BGO
3	11:13	12:45	92	BAQ	BGO	53	11:13	12:45	92	BAQ	BGO
4	11:42	13:14	92	BAQ	BGO	54	11:42	13:14	92	BAQ	BGO
5	12:51	14:23	92	BAQ	BGO	55	12:51	14:23	92	BAQ	BGO
6	14:15	15:47	92	BAQ	BGO	56	14:15	15:47	92	BAQ	BGO
7	15:18	16:50	92	BAQ	BGO	57	15:18	16:50	92	BAQ	BGO
8	16:00	17:29	89	BAQ	BGO	58	16:00	17:29	89	BAQ	BGO
9	05:34	07:07	93	BGO	BAQ	59	05:34	07:07	93	BGO	BAQ
10	06:25	07:58	93	BGO	BAQ	60	06:25	07:58	93	BGO	BAQ
11	07:30	09:03	93	BGO	BAQ	61	07:30	09:03	93	BGO	BAQ
12	08:20	09:53	93	BGO	BAQ	62	08:20	09:53	93	BGO	BAQ
13	08:50	10:23	93	BGO	BAQ	63	08:50	10:23	93	BGO	BAQ
14	09:29	11:02	93	BGO	BAQ	64	09:29	11:02	93	BGO	BAQ
15	10:48	12:21	93	BGO	BAQ	65	10:48	12:21	93	BGO	BAQ
16	12:07	13:40	93	BGO	BAQ	66	12:07	13:40	93	BGO	BAQ
17	09:10	10:14	64	BGA	BGO	67	09:10	10:14	64	BGA	BGO
18	11:21	12:25	64	BGA	BGO	68	11:21	12:25	64	BGA	BGO
19	12:10	13:14	64	BGA	BGO	69	12:10	13:14	64	BGA	BGO
20	14:55	15:59	64	BGA	BGO	70	14:55	15:59	64	BGA	BGO
21	16:55	17:59	64	BGA	BGO	71	16:55	17:59	64	BGA	BGO
22	19:01	20:05	64	BGA	BGO	72	19:01	20:05	64	BGA	BGO
23	20:41	21:45	64	BGA	BGO	73	20:41	21:45	64	BGA	BGO
24	21:25	22:29	64	BGA	BGO	74	21:25	22:29	64	BGA	BGO
25	06:04	07:10	66	BGO	BGA	75	06:04	07:10	66	BGO	BGA
26	07:34	08:40	66	BGO	BGA	76	07:34	08:40	66	BGO	BGA
27	09:45	10:51	66	BGO	BGA	77	09:45	10:51	66	BGO	BGA
28	10:34	11:40	66	BGO	BGA	78	10:34	11:40	66	BGO	BGA
29	13:20	14:25	65	BGO	BGA	79	13:20	14:25	65	BGO	BGA
30	15:19	16:25	66	BGO	BGA	80	15:19	16:25	66	BGO	BGA
31	17:25	18:31	66	BGO	BGA	81	17:25	18:31	66	BGO	BGA
32	19:05	20:11	66	BGO	BGA	82	19:05	20:11	66	BGO	BGA
33	05:33	06:32	59	BGO	MDE	83	05:33	06:32	59	BGO	MDE
34	06:01	07:00	59	BGO	MDE	84	06:01	07:00	59	BGO	MDE
35	06:20	07:19	59	BGO	MDE	85	06:20	07:19	59	BGO	MDE
36	09:25	10:24	59	BGO	MDE	86	09:25	10:24	59	BGO	MDE
37	07:18	08:17	59	BGO	MDE	87	07:18	08:17	59	BGO	MDE
38	09:01	10:00	59	BGO	MDE	88	09:01	10:00	59	BGO	MDE
39	09:49	10:48	59	BGO	MDE	89	09:49	10:48	59	BGO	MDE
40	10:49	11:48	59	BGO	MDE	90	10:49	11:48	59	BGO	MDE
41	12:40	13:39	59	BGO	MDE	91	12:40	13:39	59	BGO	MDE
42	06:45	07:42	57	MDE	BGO	92	06:45	07:42	57	MDE	BGO
43	08:47	09:44	57	MDE	BGO	93	08:47	09:44	57	MDE	BGO
44	09:11	10:08	57	MDE	BGO	94	09:11	10:08	57	MDE	BGO
45	09:44	10:41	57	MDE	BGO	95	09:44	10:41	57	MDE	BGO
46	11:28	12:25	57	MDE	BGO	96	11:28	12:25	57	MDE	BGO
47	12:18	13:15	57	MDE	BGO	97	12:18	13:15	57	MDE	BGO
48	12:52	13:49	57	MDE	BGO	98	12:52	13:49	57	MDE	BGO
49	14:17	15:14	57	MDE	BGO	99	14:17	15:14	57	MDE	BGO
50	14:50	15:47	57	MDE	BGO	100	14:50	15:47	57	MDE	BGO

Figura 12. Información de vuelos parte 1 tomados de (AVIANCA, 2017)

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

vuelo	h salida	h llegada	duración	origen	destino	vuelo	h salida	h llegada	duración	origen	destino
101	08:30	10:02	92	BAQ	BGO	151	08:30	10:02	92	BAQ	BGO
102	10:25	11:57	92	BAQ	BGO	152	10:25	11:57	92	BAQ	BGO
103	11:13	12:45	92	BAQ	BGO	153	11:13	12:45	92	BAQ	BGO
104	11:42	13:14	92	BAQ	BGO	154	11:42	13:14	92	BAQ	BGO
105	12:51	14:23	92	BAQ	BGO	155	12:51	14:23	92	BAQ	BGO
106	14:15	15:47	92	BAQ	BGO	156	14:15	15:47	92	BAQ	BGO
107	15:18	16:50	92	BAQ	BGO	157	15:18	16:50	92	BAQ	BGO
108	16:00	17:29	89	BAQ	BGO	158	16:00	17:29	89	BAQ	BGO
109	05:34	07:07	93	BGO	BAQ	159	05:34	07:07	93	BGO	BAQ
110	06:25	07:58	93	BGO	BAQ	160	06:25	07:58	93	BGO	BAQ
111	07:30	09:03	93	BGO	BAQ	161	07:30	09:03	93	BGO	BAQ
112	08:20	09:53	93	BGO	BAQ	162	08:20	09:53	93	BGO	BAQ
113	08:50	10:23	93	BGO	BAQ	163	08:50	10:23	93	BGO	BAQ
114	09:29	11:02	93	BGO	BAQ	164	09:29	11:02	93	BGO	BAQ
115	10:48	12:21	93	BGO	BAQ	165	10:48	12:21	93	BGO	BAQ
116	12:07	13:40	93	BGO	BAQ	166	12:07	13:40	93	BGO	BAQ
117	09:10	10:14	64	BGA	BGO	167	09:10	10:14	64	BGA	BGO
118	11:21	12:25	64	BGA	BGO	168	11:21	12:25	64	BGA	BGO
119	12:10	13:14	64	BGA	BGO	169	12:10	13:14	64	BGA	BGO
120	14:55	15:59	64	BGA	BGO	170	14:55	15:59	64	BGA	BGO
121	16:55	17:59	64	BGA	BGO	171	16:55	17:59	64	BGA	BGO
122	19:01	20:05	64	BGA	BGO	172	19:01	20:05	64	BGA	BGO
123	20:41	21:45	64	BGA	BGO	173	20:41	21:45	64	BGA	BGO
124	21:25	22:29	64	BGA	BGO	174	21:25	22:29	64	BGA	BGO
125	06:04	07:10	66	BGO	BGA	175	06:04	07:10	66	BGO	BGA
126	07:34	08:40	66	BGO	BGA	176	07:34	08:40	66	BGO	BGA
127	09:45	10:51	66	BGO	BGA	177	09:45	10:51	66	BGO	BGA
128	10:34	11:40	66	BGO	BGA	178	10:34	11:40	66	BGO	BGA
129	13:20	14:25	65	BGO	BGA	179	13:20	14:25	65	BGO	BGA
130	15:19	16:25	66	BGO	BGA	180	15:19	16:25	66	BGO	BGA
131	17:25	18:31	66	BGO	BGA	181	17:25	18:31	66	BGO	BGA
132	19:05	20:11	66	BGO	BGA	182	19:05	20:11	66	BGO	BGA
133	05:33	06:32	59	BGO	MDE	183	05:33	06:32	59	BGO	MDE
134	06:01	07:00	59	BGO	MDE	184	06:01	07:00	59	BGO	MDE
135	06:20	07:19	59	BGO	MDE	185	06:20	07:19	59	BGO	MDE
136	09:25	10:24	59	BGO	MDE	186	09:25	10:24	59	BGO	MDE
137	07:18	08:17	59	BGO	MDE	187	07:18	08:17	59	BGO	MDE
138	09:01	10:00	59	BGO	MDE	188	09:01	10:00	59	BGO	MDE
139	09:49	10:48	59	BGO	MDE	189	09:49	10:48	59	BGO	MDE
140	10:49	11:48	59	BGO	MDE	190	10:49	11:48	59	BGO	MDE
141	12:40	13:39	59	BGO	MDE	191	12:40	13:39	59	BGO	MDE
142	06:45	07:42	57	MDE	BGO	192	06:45	07:42	57	MDE	BGO
143	08:47	09:44	57	MDE	BGO	193	08:47	09:44	57	MDE	BGO
144	09:11	10:08	57	MDE	BGO	194	09:11	10:08	57	MDE	BGO
145	09:44	10:41	57	MDE	BGO	195	09:44	10:41	57	MDE	BGO
146	11:28	12:25	57	MDE	BGO	196	11:28	12:25	57	MDE	BGO
147	12:18	13:15	57	MDE	BGO	197	12:18	13:15	57	MDE	BGO
148	12:52	13:49	57	MDE	BGO	198	12:52	13:49	57	MDE	BGO
149	14:17	15:14	57	MDE	BGO	199	14:17	15:14	57	MDE	BGO
150	14:50	15:47	57	MDE	BGO	200	14:50	15:47	57	MDE	BGO

Figura 13 Información de vuelos parte 2 tomados de (AVIANCA, 2017)

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

En la Figura 14 se presentan los emparejamientos encontrados por el algoritmo tal y como se explicaba en la Figura 11.

E1	E3	E5	E7	E10	E12	E15	E17
V(35)	V(29)	V(36)	V(38)	V(12)	V(31)	V(34)	V(9)
X(35,43)	X(29,21)	X(36,46)	X(38,3)	X(12,18)	X(31,23)	X(34,44)	Y(9,22)
X(43,40)	X(21,32)	Y(46,88)	Y(3,66)	Y(18,75)	Y(23,78)	Y(44,87)	Y(22,79)
X(40,48)	Y(32,95)	X(88,68)	X(66,100)	X(75,94)	X(78,55)	X(87,52)	X(79,58)
Y(48,85)	X(95,91)	Y(68,126)	Y(100,139)	Y(94,134)	Y(55,112)	Y(52,113)	Y(58,166)
X(85,93)	X(91,70)	X(126,145)	X(139,147)	X(134,101)	X(112,118)	X(113,104)	X(166,157)
X(93,90)	Y(70,129)	X(145,141)	Y(147,186)	Y(101,162)	Y(118,180)	Y(104,165)	W(157)
X(90,98)	X(129,121)	Y(141,170)	X(186,154)	X(162,168)	X(180,172)	X(165,199)	E18
Y(98,135)	X(121,132)	X(170,181)	W(154)	W(168)	W(172)	W(199)	V(65)
X(135,143)	Y(132,195)	X(181,173)	E8	E11	E13	E16	X(65,99)
X(143,140)	X(195,191)	W(173)	V(10)	V(28)	V(15)	V(13)	Y(99,133)
X(140,148)	X(191,200)	E6	X(10,17)	X(28,5)	X(15,20)	X(13,4)	Y(133,122)
Y(148,185)	W(200)	V(26)	Y(17,77)	Y(5,60)	Y(20,81)	Y(4,62)	Y(122,176)
X(185,193)	E4	X(26,45)	X(77,97)	X(60,67)	X(81,73)	X(62,53)	X(176,153)
X(193,190)	V(16)	X(45,41)	Y(97,138)	Y(67,125)	Y(73,128)	Y(53,115)	W(153)
X(190,198)	X(16,50)	Y(41,92)	X(138,103)	X(125,144)	X(128,105)	X(115,149)	E19
W(198)	Y(50,89)	X(92,86)	Y(103,160)	Y(144,184)	Y(105,164)	Y(149,183)	V(11)
E2	X(89,69)	X(86,54)	X(160,194)	X(184,151)	X(164,197)	X(183,167)	X(11,2)
V(39)	X(69,80)	Y(54,116)	W(194)	W(151)	W(197)	W(167)	Y(2,59)
X(39,19)	Y(80,142)	X(116,120)	E9		E14		Y(59,72)
X(19,30)	X(142,136)	X(120,131)	V(27)		V(25)		Y(72,179)
Y(30,71)	X(136,146)	Y(131,171)	X(27,47)		X(25,1)		X(179,158)
X(71,82)	Y(146,189)	X(171,182)	Y(47,84)		Y(1,63)		W(158)
X(82,74)	X(189,169)	X(182,174)	X(84,51)		X(63,96)		
Y(74,127)	W(169)	W(174)	Y(51,110)		Y(96,137)		
X(127,119)			X(110,117)		X(137,102)		
X(119,130)			Y(117,178)		Y(102,161)		
Y(130,192)			X(178,155)		X(161,152)		
X(192,188)			W(155)		W(152)		
X(188,196)							
W(196)							

Figura 14 Emparejamientos encontrados por el algoritmo

El algoritmo parte de la solución inicial donde cada vuelo es un emparejamiento independiente, a partir de allí va buscando como mejorar cada emparejamiento ceñido a las restricciones del

PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LA TRIPULACIÓN

subproblema, por esto es posible que no todos los vuelos sean factibles de realizar bajo estas condiciones. En el caso mencionado, el algoritmo programó 170 vuelos del banco de 200; los 30 vuelos restantes pueden ser realizados bajo el riesgo de incurrir en violaciones de restricciones, que ocasionarán costos adicionales.

Se puede observar que a pesar del hecho que todos los emparejamientos encontrados por el algoritmo cumplen con las restricciones planteadas, los primeros generados son más eficientes a la hora de programar más vuelos en cada turno.

Una vez se comprobó la factibilidad de las soluciones del algoritmo se analizaron los tiempos computacionales descritos en la Tabla 3.

Tabla 3:

Tiempos computacionales resultantes

	Costo	Tiempo de ejecución (seg)	Emparejamientos generados	Alfa	Beta
1	23954	290,47	170	1	1
2	23576	348,92	162	0,7	1
3	26332	322,73	152	1	0,7

Los tiempos computacionales de ejecución del algoritmo para los escenarios descritos anteriormente son cortos, teniendo en cuenta que resuelven un problema de programación de lapso semanal o mensual. El equipo de cómputo utilizado cuenta con un procesador Intel® Core™ i5-4570 CPU @ 3.20CHz, 8GB de RAM. Se exploraron variaciones de parámetros de porcentajes

tiempos transcurridos de turno (Beta) y de emparejamientos (Alfa), para explorar el cumplimiento de las restricciones de costos.

Conclusiones

En el presente trabajo se diseñó un algoritmo para resolver el problema de programación de la tripulación en logística aeroportuaria de vuelos domésticos y asociado a los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia. El algoritmo está fundamentado en la técnica de generación de columnas, a partir de la relajación de integridad de la descomposición de Danzig-Wolfe que encuentra una solución básica factible, la cual reduce el costo de la función objetivo.

Con éste primer acercamiento a la solución de una parte fundamental de las problemáticas que se manejan en el ámbito de la Logística Aeroportuaria, se resalta la generación de una instancia cercana la realidad colombiana, tomando parámetros de legislación nacional aplicada. Lo cual es un marco de referencia importante para futuras investigaciones.

A pesar de la complejidad del problema, el uso de Generación de Columnas es conveniente para el problema abordado, ya que permite llegar a la solución óptima en un tiempo adecuado, puesto que arroja una solución en menos de dos horas en un escenario con un horizonte de planeación que puede ser semanal o mensual.

Para el problema de emparejamiento el algoritmo planteado de generación de columnas con base en la descomposición de Dantzing-Wolfe, brinda el óptimo con soluciones binarias a pesar

de la relajación de integridad del método; lo cual facilita su implementación ya que no es necesario utilizar técnicas de exploración de soluciones enteras como Branch and Bound.

Recomendaciones

Como recomendación para futuras investigaciones éste trabajo puede ser usado como base para la asignación como tal de la tripulación. Por otro lado, se puede aumentar el tamaño de la instancia para usar heurísticas que provean otra solución haciendo así el problema mucho más interesante hasta lograr salir de la programación de la tripulación para vuelos domésticos y comenzar a estudiar cómo cambiaría el problema cuando se usa en instancias que abarquen también vuelos internacionales.

Sería interesante explorar la posibilidad de realizar un convenio comercial con alguna aerolínea que permita estudiar problema con instancias reales y una posible implementación.

Referencias Bibliográficas

- AhmadBeygi, S., Cohn, A., & Weir, M. (2009). An integer programming approach to generating airline crew pairings. *Computers & Operations Research*, 1284-1298.
- Alonso, S., Cordon, O., Fernandez de Viana, I., & Herrera, F. (2001). La metaheurística de optimización basada en colonias de hormigas: modelos y nuevos enfoques. *Optimización inteligente: técnicas de inteligencia computacional para optimización*, 261-314.
- AVIANCA. (01 de 12 de 2017). Obtenido de AVIANCA: www.avianca.com/co/es/
- Avianca. (2018). *Consulta de Itinerarios. Avianca*. Recuperado el 18 de Marzo de 2018, de <https://www.avianca.com/co/es/>
- Aydemir-Karadag, A., Dengiz, B., & Bolat, A. (2013). Crew pairing optimization based on hybrid approaches. *Computers & Industrial Engineering*, 87-96.
- Barnhart, C., Cohn, A. M., Johnson, E. L., Klabjan, D., Nemhauser, G. L., & Vance, P. H. (2003). Airline Crew Scheduling. En *Handbook of Transportation Science*. Boston: Hall R.W.
- Bazargan, M. (2016). *Airline Operations and Scheduling*. Londres: Routledge.
- Brunner, J. O. (2014). Rescheduling of flights during ground delay programs with consideration of passenger and crew connections. *Transportation Research Part E*, 236-252.
- Burke, E. K., De Causmaecker, P., De Maere, G., Mulder, J., Paelinck, M., & Vanden Berghe, G. (2010). A multi-objective approach for robust airline scheduling. *Computers & Operations Research*, 822-832.

- Castellanos Muñoz, A. C. (2014). Estado del arte de los modelos de optimización en a logística aeroportuaria. *Tesis de Pregrado*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Deng, G.-F., & Lin, W.-T. (2011). Ant colony optimization-based algorithm for airline crew scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 5787-5793.
- Díaz Smith, S. (30 de Octubre de 2009). Evaluación del método de generación de columnas para el problema de corte “Cutting Stock” usando heurísticas para la obtención de patrones de corte. *Trabajo de Grado*. Cholula, Puebla, México.
- Díaz-Ramírez, J., Huertas, J. I., & Trigos, F. (2014). Aircraft maintenance, routing, and crew scheduling planning for airlines with a single fleet and a single maintenance and crew base. *Computers & Industrial Engineering*, 68-78.
- Escorcía Ojalora, T. (2008). El análisis bibliométrico como herramienta para el seguimiento de publicaciones científicas, tesis y trabajos de grado. *Tesis de Pregrado*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Flórez, D. C., Walteros, J. L., Vargas, M. A., Medaglia, A. L., & Velasco, N. (2012). A Mathematical Programming Approach to Airline Crew Pairing Optimization. *Centro para la Optimización y Probabilidad Aplicada Universidad de los Andes*.
- Gao, C., Johnson, E., & Smith, B. (2009). Integrated Airline Fleet and Crew Robust Planning. *Transportation Science*, 2-16.
- García Sánchez, Á. (12 de Julio de 2017). *Ingeniería de Organización y Logística*. Obtenido de Ingeniería de Organización y Logística: <http://iol.etsii.upm.es/arch/metaheurísticas.pdf>
- Gopalakrishnan, B., & Johnson, E. (2005). Air Crew Scheduling: State-of-the-Art. *Annals of Operations Research*, 305-337.

- Ionescu, L., & Kliwer, N. (2011). Increasing Flexibility of Airline Crew Schedules. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* , 1019-1028.
- Kasirzadeh, A., Saddoune, M., & Soumis, F. (2015). Airline Crew Scheduling: models, algorithms, and data sets. *EURO Journal on Transportations and Logistics*, 111-137.
- Lübbecke, M. E. (2011). Column Generation. *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*.
- Maenhout, B., & Vanhoucke, M. (2010). A hybrid scatter search heuristic for personalized crew rostering in the airline industry. *European Journal of Operational Research*, 155-167.
- Martínez Quezada, D. O. (2014). Solución del problema CVRP mediante el algoritmo de descomposición de Dantzig Wolfe. *Trabajo de grado*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Maya, P. A. (2008). Algoritmo de Generación de Columnas: Una revisión desde su aplicación al problema de asignación de cupos escolares. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 145-157.
- Medaglia, A. (2008). *Programación a gran escala: generación de columnas*. Bogotá: Universidad de los Andes: Centro de Optimización y Probabilidad Aplicada.
- Norin, A., Granberg, T. A., Yuan, D., & Varbrand, P. (2012). Airport Logistics - A case study of the turn-around process. *Journal of Air Transport Management*, 31-34.
- Oficina de Transporte Aéreo. (2015). *Normas de Aeronavegabilidad y Operación de Aeronaves*. Unidad Administrativa Especial de Aeronautica Civil.
- Oficina de Transporte Aéreo. (2015). *Reglamentos Aeronáuticos de Colombia*. Unidad Administrativa Especial de Aeronautica Civil.

- Petruf, M., Korba, P., & Kolesár, J. (2016). Roles of Logistics in Air Transportation. *NAŠE MORE, Znanstveno-stručni časopis za more i pomorstvo*(3 Special Issue), 215-218.
- Ramos, A. (03 de 04 de 2018). *Portal de Andrés Ramos: Instituto de Investigación Tecnológica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería*. Obtenido de Página Web Universidad de Comillas : https://www.iit.comillas.edu/aramos/simio/transpa/t_mip_ar.pdf
- Real Academia Española. (13 de Julio de 2017). Obtenido de Diccionario de la Lengua Española : <http://www.rae.es/>
- Rosat, S., Quesnel, F., Elhallaoui, I., & Soumis, F. (2017). Dynamic penalization of fractional directions in the integral simplex using decomposition: Application to aircrew scheduling. *European Journal of Operational Research*, 1-12.
- Saddoune, M., Desaulniers, G., Elhallaoui, I., & Soumis, F. (2010). Integrated airline crew scheduling: A bi-dynamic constraint aggregation method using neighborhoods. *European Journal of Operational Research*, 445-454.
- Souai, N., & Teghem, J. (2009). Genetics algorithm based approach for the integrated airline crew-pairing and rostering problem. *European Journal of Operational Research*, 674-683.
- Taha, H. A. (2012). *Investigación de operaciones* (Novena edición ed.). México: Pearson Educación.
- Zeren, B., & Özkol, I. (2016). A novel column generation strategy for large scale airline crew pairing problems. *Expert Systems With Applications*, 133-144.