

Asignación de Tripulaciones

AUTORA : M^a Paz Velasco

Departamento: Estadística e I.O.
E. U. Estadística
Complutense de Madrid
pvelasco@iberia.es

RESUMEN:

Dada la programación de vuelos de una compañía para un periodo de tiempo determinado, se trata de encontrar una asignación de tripulaciones para dicha programación, de forma que se minimice el coste y a la vez se cumplan una serie de complejas restricciones.

Cada tripulación tiene asignada una ciudad base y el programa de una tripulación consta de una serie de vuelos que empieza y termina en su ciudad base. Tal serie se denomina rotación. Una rotación válida debe satisfacer un gran número de restricciones, como el tiempo máximo de descanso,... Aunque es difícil definir matemáticamente estas restricciones, es posible construir rotaciones que las satisfacen.

El problema se puede entonces resolver en dos fases. En la primera se generaría un gran número de rotaciones factibles y se calcularía el coste de cada una. En la segunda fase se trataría de seleccionar un subconjunto de las rotaciones generadas, de forma que el coste total se minimice. En la segunda fase el problema se podría abordar, planteando un problema de cubrimiento, donde las filas de la matriz son los vuelos a realizar y las columnas representan a las rotaciones.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El objetivo del problema (*crew scheduling problem*) es encontrar una asignación de tripulaciones para una programación de vuelos dada de forma que se minimice el coste y a la vez se cumplan una serie de complejas restricciones. Unas dictadas por la Administración Aérea (para asegurar que la tripulación puede realizar sus servicios sin riesgo importante de degradación de su trabajo debido al cansancio), y otras específicas de la compañía que opera los vuelos del horario. Normalmente esta asignación se realiza separadamente para cada uno de los tipos de avión, flota a flota, (una *flota* es un grupo de vuelos asignados a un tipo de avión), porque los pilotos están cualificados para volar solamente en un tipo de avión. La asignación de individuos a las tripulaciones se realiza a continuación y no se considera aquí.

Los costes de las tripulaciones es la segunda componente más importante después del fuel en los gastos directos de operación, de ahí la importancia de este problema.

El problema previo sería la asignación de un tipo de avión a cada uno de los vuelos que componen el horario. Suponemos que esto ya se ha hecho. Entonces, en este trabajo se considera el horario particular de todos los vuelos que han sido asignados a un determinado tipo de avión.

Existen algunas diferencias entre la asignación de pilotos y la de auxiliares de vuelo, por ejemplo, el auxiliar puede ser asignado para volar en más de un tipo de avión, mientras que el piloto no. Por lo tanto, el problema de los auxiliares resulta más complicado al tener que considerar los distintos tipos de avión individualmente. Sin embargo, tiene la misma

estructura general , luego entonces, una metodología similar podría ser aplicada. Aquí se va tratar el problema de la asignación de pilotos.

El punto de partida para la formulación de este problema es el horario de vuelos publicado por la compañía, el cual incluye: el tipo de avión de cada vuelo, número de vuelo, los aeropuertos origen y destino, hora de salida y hora de llegada, durante un mes determinado.

Ejemplo: una parte del horario de Iberia puede estar formada por los vuelos siguientes, que incluyen 3 ciudades, MAD = Madrid, PMI = Palma de Mallorca y LPA = Las Palmas.

	N. Vuelo	<u>Ciudad</u>		<u>Hora</u>	
		Salida	LLegada	Salida	LLegada
1	221	MAD	PMI	0800	0934
2	223	MAD	PMI	0900	1039
3	228	PMI	MAD	1100	1423
4	766	LPA	PMI	1600	1912
5	105	MAD	LPA	1100	1314
6	259	MAD	LPA	1400	1609
7	274	LPA	PMI	0800	1116
8	293	PMI	LPA	1400	1510
9	412	LPA	MAD	1400	1959

Definiciones que se utilizan:

Tramo: es un único vuelo sin paradas entre pares de ciudades. En el ejemplo anterior cada uno de los 9 vuelos se correspondería con un tramo.

servicio: es un tramo o una serie de tramos separados por pequeños periodos de descanso, sin necesidad de volver al aeropuerto origen del que se parte. En el servicio está incluido los tiempos de presentación y despedida, al comienzo y al final del él respectivamente. Puede ser considerado como un día de trabajo. En el ejemplo anterior, los vuelos 223 y 293 podrían formar un servicio.

rotación: es una serie de servicios programados consecutivamente, los cuales deben empezar y terminar en la misma ciudad, la cual denominamos base asociada a la tripulación. Una rotación no puede estar interrumpida por un día libre en la base. Normalmente tienen una duración entre 2 y 5 días dependiendo de las normas de trabajo de la compañía y del tipo de vuelo; los vuelos internacionales requieren una duración más larga de la rotación. En el ejemplo anterior, una rotación podría estar formada por los vuelos 238, 105 y 274.

vuelos de situación : son los desplazamientos realizados por los tripulantes como pasajeros para hacerse cargo de un servicio o, a la terminación del mismo, regresar a la base. Algunas compañías no permiten estos tipos de vuelos.

Formulación básica

Dado el horario de partida, se pretende obtener un fichero que contenga un conjunto de tripulaciones las cuales colectivamente cubran dicha programación de vuelos. Para ello se puede seguir el proceso siguiente: en un primer paso, a partir de los vuelos del horario (es decir, los tramos) construir servicios, y a continuación, con los servicios formar rotaciones con el objetivo minimizar el coste de las tripulaciones que cubrirán dichas rotaciones. También se pueden construir las rotaciones directamente a partir de los tramos. Las restricciones legales y contractuales definen la estructura y coste de los servicios y/o las rotaciones factibles. Estas restricciones varían por tipo de tripulación (pilotos y auxiliares), tamaño de la tripulación, tipo de avión y tipo de operación (vuelos domésticos e internacionales).

Por lo tanto, se trata de encontrar el mejor conjunto de rotaciones de forma que

- (1) Cada vuelo sea cubierto una y solo una vez (si no se permiten los vuelos de situación);
- (2) Cada rotación empiece una ciudad base , vuele alrededor de la red, y vuelva a la misma base;
- (3) Cada rotación satisfaga las limitaciones de la Administración Aérea y las reglas de trabajo en vigor de la compañía;
- (4) El número de tripulaciones asignadas a cada base esté dentro de unos límites mínimo y máximo específicos, de acuerdo con los tripulantes disponibles por la compañía en dichas bases, (esta restricción solo la tienen algunas compañías).

Dado el conjunto de rotaciones factibles, uno puede formular el problema de encontrar el mejor conjunto de rotaciones de forma que cada vuelo sea cubierto exactamente una vez, como un problema conjunto partición (PCP):

(PCP)

$$\begin{array}{ll} \text{Minimizar} & \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ \text{sujeto a} & Ax = e_m \\ & x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j = 1, \dots, n \end{array}$$

donde m es el número de tramos, n el número de rotaciones consideradas y e_m es un vector con m entradas iguales a 1. Cada fila de la matriz A de orden $m \times n$ representa un tramo, y se introduce una variable 0-1 x_j , asociada con cada rotación j , de forma que $x_j = 1$ si se selecciona la rotación j y 0 en otro caso. La matriz A se construye por columnas, donde

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la rotación } j \text{ incluye el tramo } i \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$c_j = \text{coste total de la rotación } j\text{-ésima}$$

En esta formulación no se ha añadido las restricciones que limitan el número de tripulaciones asignadas a una base particular.

Si planteamos el problema permitiendo los vuelos de situación, sustituiríamos el vector e_m por b_m , donde cada componente representaría el número de tripulaciones que pueden ser asignadas para cada tramo.

Ejemplo. Para el ejemplo dado, considero las rotaciones siguientes: $R_1 = \{\text{tramo 1, tramo 3}\}$, $R_2 = \{\text{tramo 2, tramo 4}\}$, ..., $R_{11} = \{\text{tramo 5, tramo 8, tramo 9}\}$. Además supongo que el coste de cada rotación es igual al número de tramos de que consta. Entonces este ejemplo se podría formular de la forma siguiente:

Min	$2x_1$	$+2x_2$	$+3x_3$	$+3x_4$	$+2x_5$	$+2x_6$	$+3x_7$	$+2x_8$	$+3x_9$	$+4x_{10}$	$+3x_{11}$	
	x_1							$+x_8$				$= 1$
		$+x_2$							$+x_9$	$+x_{10}$		$= 1$
	x_1			$+x_4$						$+x_{10}$		$= 1$
		$+x_2$						$+x_8$				$= 1$
			$+x_3$				$+x_7$				$+x_{11}$	$= 1$
				$+x_4$			$+x_7$			$+x_{10}$		$= 1$
			$+x_3$	$+x_4$			$+x_7$					$= 1$
					$+x_5$						$+x_{11}$	$= 1$
			$+x_3$			$+x_6$					$+x_{11}$	$= 1$
						$+x_6$			$+x_9$	$+x_{10}$		$= 1$
					$+x_5$				$+x_9$			$= 1$
	$x_1,$	$x_2,$	$x_3,$	$x_4,$	$x_5,$	$x_6,$	$x_7,$	$x_8,$	$x_9,$	$x_{10},$	x_{11}	$\in \{0,1\}$

Afortunadamente, el problema se ajusta a un problema clásico de programación lineal entera (PLE). Aunque se tiene que representar todas las pagas garantizadas y complejas restricciones en la matriz, en los problemas del mundo real la parte más difícil es resolverlo. Para un número tan pequeño como 1000 tramos en un periodo dado, existen billones de

rotaciones factibles. Por lo tanto, las compañías normalmente generan un número mucho más pequeño de rotaciones, aunque aún grande, el cual se intenta que sea representativo. La solución final consta de un pequeño conjunto de rotaciones seleccionadas de ese conjunto, normalmente menos de 150 rotaciones cubren 1000 tramos. Para hacerse una idea de la complejidad de este problema, una importante compañía americana en 1993 cubría aproximadamente 2700 vuelos utilizando para ello 10 tipos diferentes de aviones, más o menos 5700 pilotos y 9000 auxiliares de vuelo se necesitaban por día.

Componentes del Coste

Las componentes específicas del coste dependen de la estructura del salario y reglas de trabajo de la compañía; sin embargo, varias características son comunes para la mayoría de las compañías. El coste depende de los tiempos de vuelo de los miembros de la tripulación y posibles vuelos de situación, (los contratos especifican que los vuelos de situación se paguen como el 50% de las horas de vuelo o más, aunque el vuelo de situación no es tiempo productivo de trabajo). Todas las compañías incurren también en gastos de hoteles, y dietas como resultado de los descansos nocturnos programados fuera de la base. Además, unos costes del transporte por tierra pueden aparecer para llevar a los miembros de la tripulación a o desde los hoteles o entre terminales de los aeropuertos.

Además, las compañías tienen contratos con sus tripulaciones de forma que tienen una paga garantizada por un determinado número de horas cada día o por cada vuelo. Estas garantías se negocian para disuadir a la gerencia de programar servicios con poco tiempo de vuelo. A menudo los acuerdos también garantizan que el tiempo de vuelo del servicio excederá algún porcentaje del tiempo total de duración del servicio. Así, se disuadirá la

programación de servicios con largos descansos entre los tramos que lo forman. La mayoría de las compañías también tienen una garantía sobre el tiempo total de vuelo de la rotación, el cual excederá algún porcentaje de las horas totales que la tripulación está fuera de la base; esto disuadirá descansos nocturnos excesivamente largos.

El pago garantizado de una rotación completa se calcula como el máximo de ciertas pagas garantizadas individuales y nunca es menor que el tiempo de vuelo programado. Las pagas garantizadas individuales se basan en características de la rotación, tales como su duración, número de servicios, número de horas de los vuelos de situación, etc. Por ejemplo el tiempo de vuelo garantizado por servicio o día de vuelo es normalmente de 4 a 5 horas.

Se debe intentar construir asignaciones que alcancen o excedan las pagas garantizadas lo máximo posible. Para ello se define una componente importante llamada *el pago-y-crédito*; es la diferencia entre el número de horas por las cuales se le paga a un miembro de la tripulación (horas garantizadas) y el número de horas que vuela realmente. El pago-y-crédito representa el tiempo no productivo de la tripulación y por lo tanto se tratará de minimizarlo.

Una asignación de tripulaciones pobre genera “tiempo crédito” por el cual se le paga a la tripulación además de por el tiempo real de vuelo. Este tiempo crédito se contabiliza también en el número de horas mensuales de trabajo de las tripulaciones. Como existe un máximo, penaliza la disponibilidad de los tripulantes.

En muchos casos, los descansos nocturnos de la tripulación fuera de la base son inherentes a la programación de vuelos. Si un avión está planificado que permanezca durante

la noche en una ciudad que no es una ciudad base, un descanso nocturno de la tripulación fuera de la base es inevitable.

Reglas de trabajo

La construcción de rotaciones está limitada por las reglas de trabajo de la compañía. Esta debe publicar y soportar algunas reglas para definir condiciones básicas de trabajo y asegurar una distribución equitativa de los vuelos. La Administración Aérea también define unos requerimientos mínimos que tienen que cumplir las tripulaciones, para minimizar su fatiga y así reforzar la seguridad de los pasajeros. La mayoría de las normas de la compañía exceden a las de la Administración.

Las reglas de trabajo tienen que ver con los servicios y los descansos. Existen unas reglas rigurosas que especifican la máxima duración de un servicio, la cual varía entre 14 y 16 horas. Normalmente se impone una duración más corta en previsión de la existencia de posibles retrasos durante las operaciones reales. Esta duración permitida se acorta más cuando los servicios implican horas de vuelos nocturnas. Otras reglas fijan el tiempo máximo real de vuelo y el número de tramos que componen el servicio.

Además, se especifica un conjunto bastante complejo de normas para calcular el mínimo descanso antes y después de un servicio, que depende del rango en el cual varía las horas de vuelo. Así, un servicio que es legal aislado, puede no serlo en el contexto de una rotación determinada, con varios servicios y cortos descansos nocturnos entre ellos. Para los vuelos internacionales largos sin paradas, una tripulación adicional se necesita para relevar a la tripulación regular.

La satisfacción de todas estas restricciones solamente puede ser verificada después de que la rotación ha sido construida.

Otras restricciones prácticas y matemáticas

Otros factores restringen la construcción de rotaciones. Algunos son impuestos por la dirección de la compañía para cumplir ciertos objetivos particulares; otros son necesidades matemáticas:

Se prefieren las soluciones que mantienen la tripulación dentro del mismo avión tanto tiempo como sea posible, ya que esto mejora la seguridad de las operaciones. Esto se puede conseguir penalizando las rotaciones en las cuales las tripulaciones cambian de avión.

Las asignaciones deben utilizar el número de tripulaciones disponibles en las diferentes bases. Todas las rotaciones deben empezar en una base, volar por el sistema de rutas de la compañía durante un número de días, y terminar en la misma base. Esta norma restringe efectivamente los tramos del horario que pueden ser el principio o el final de una rotación. Además, las rotaciones deben ser continuas; es decir, el aeropuerto de llegada de un tramo debe coincidir con el aeropuerto de salida del tramo siguiente.

Ya que casi todas las compañías tienen límites para el número de horas mensuales que cada miembro de la tripulación puede volar, la construcción de una rotación con origen en una base particular genera un recuento del requerimiento para esa base.

La optimización de la asignación debe tener en cuenta los cambios realizados en el horario de la compañía debidos a una demanda según la estación, competencia, oportunidades de nuevos negocios, distribuciones de aviones, y a la adquisición de nuevas

rutas. Tales cambios son bastante frecuentes y destruyen la regularidad del horario, complicando el proceso de asignación de tripulaciones.

Finalmente, el número máximo de días que a una rotación se le permite operar limita el número total de rotaciones posibles. Es una política de la compañía mantener el valor de este parámetro tan pequeño como sea posible, en parte, porque es difícil reasignar tripulaciones que forman parte de rotaciones largas en el caso de que se produzcan retrasos durante las operaciones reales. Por otra parte, largas rotaciones raramente implican bajos costes, y enormes recursos pueden ser consumidos examinando las posibilidades. Normalmente este parámetro se ajusta entre 2 y 5 días, dependiendo de que el vuelo sea doméstico o internacional.

Resolución del problema

El problema se puede ajustar a un modelo de programación lineal entera, pero como el número de variables es muy elevado, no hay un método sistemático válido para resolverlo.

Por ejemplo, se ha intentado resolver el problema de la asignación de tripulaciones para los 19 vuelos de una semana determinada que realiza una avión Se considera que la base es Madrid para todas las tripulaciones. Se construye una matriz donde las filas representan a la tripulaciones y las columnas a los vuelos. Un elemento de dicha matriz tomará el valor 1, si la tripulación que representa la fila es asignada al vuelo representado por la columna, en caso contrario, tomará el valor 0. Se tratará de minimizar el número de tripulaciones, de forma que cada vuelo sea asignado a una y solo una tripulación, y se cumplan las restricciones asociadas a las tripulaciones. Para estos datos el fichero con formato MPS tiene 871 variables y 2338 restricciones, el FORTMP no es capaz de encontrar una solución entera, lo cual justifica la dificultad del problema.

Una alternativa es la aplicación de heurísticas o algoritmos aproximados. Se va a tratar de utilizar algunos de estos algoritmos basados en Metaheurísticas de implantación reciente, como es el caso de búsqueda tabú y algoritmos genéticos, entre otras.