

Tesis doctoral

Asignación de conductores a jornadas de trabajo en empresas de transporte colectivo

Por
Carmen Esclapés

Director: Albert Corominas
Tutora: Elena Fernández

Departament d'Estadística i Investigació Operativa
Universitat Politècnica de Catalunya
Julio 2000

1	Introducción	5
2	Glosario	9
	2.1 OBJETO DEL GLOSARIO	9
	2.2 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	10
	2.3 NOTACIÓN.....	14
3	Rostering: Estado del arte	15
	3.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN TIPO DE PROBLEMA	15
	3.2 ARTÍCULOS CLASIFICADOS	35
4	Rostering en empresas de transporte	41
	4.1 BÚSQUEDA DEL MODELO.....	41
	4.2 SONDEO DE LA REALIDAD.....	41
	4.3 CONCLUSIONES	65
	4.4 INVENTARIO DE ACCIONES.....	68
5	Formalización del modelo	71
6	Mejora de un caso concreto	83
	6.1 OBJETIVO	83
	6.2 DESCRIPCIÓN DEL CASO	84
	6.3 PATRONES	91
	6.4 LISTAS DE TAREAS	98
7	Procedimiento genérico	123
	7.1 OBJETIVO	123
	7.2 PATRONES	126
	7.3 LISTAS DE TAREAS	151
8	Conclusiones	169
	8.1 MEJORA.....	169
	8.2 GENÉRICO	170
9	Referencias	173
	Anexo	179

1 Introducción

Los modelos matemáticos y las técnicas de programación matemática nacieron para dar respuesta a la necesidad de mejorar los procesos productivos y se han venido aplicando mayoritariamente a la organización y distribución de los recursos físicos.

No obstante ya hace unas décadas, se ha podido comprobar los excelentes resultados que esas mismas técnicas aportan cuando son utilizadas para optimizar la eficacia de los recursos humanos, en particular dicha aplicación es especialmente interesante en las empresas de servicios, donde el potencial humano constituye el factor más importante y por lo tanto el coste más relevante.

En este marco se sitúa el problema de la organización de horarios, en particular la organización de horarios en aquellas actividades donde, por sus características específicas el abanico de posibilidades alcanza unas dimensiones que lo hacen intratable de forma manual.

Se encuadran dentro de esta problemática las organizaciones que tienen que cubrir unos servicios que se prolongan en el tiempo más allá de lo que es una jornada laboral, las que tienen una demanda de servicios fluctuante, las que deben ajustar su servicio a la demanda de un público incierto, etc. En particular todas aquellas que disponen de la capacidad de mejorar la calidad de su servicio y la satisfacción de sus clientes y colaboradores a base de distribuir de forma más eficiente el potencial humano de su empresa.

Las empresas de transporte colectivo son un claro ejemplo de organización donde concurren las circunstancias que hacen especialmente útil este tipo de planteamientos. La reorganización y en muchos casos la reciente privatización han obligado a plantear de nuevo conceptos de productividad y eficiencia.

En primer lugar deben ajustar sus servicios al nivel de demanda de los usuarios, tanto en lo que respecta al itinerario del transporte como a la frecuencia del mismo.

A continuación se deben ajustar los recursos físicos, esto es vehículos, aviones, trenes, etc., a dicha demanda fluctuante.

Y por último es necesario compaginar todo esto con el calendario y horario laboral de los empleados.

El planteamiento y en consecuencia el tratamiento que hay que dar a esta problemática, es muy distinto dependiendo de las peculiaridades de cada tipo de transporte. Por ejemplo no tiene prácticamente nada en común la organización de horarios en una compañía de transporte aéreo o en una compañía de transporte urbano. O entre la organización de viajes y conductores en una compañía de autobuses discrecional y autobuses de línea.

La organización de horarios en empresas de transporte colectivo es un problema muy complejo dadas las muchas variables que intervienen y por lo tanto las muchas combinaciones posibles que pueden formar parte de la solución buscada.

Tradicionalmente este problema es abordado en cuatro etapas sucesivas, lo hacen así los paquetes de software existentes en el mercado como el que presenta Falcão, J. y Pinho, J. (2000) y también las compañías que simultanean la resolución manual con la automatización de algunas partes o la utilización de sistemas de soporte a la decisión.

A continuación se enumeran las cuatro etapas en que se divide el problema.

Organización de líneas

A partir de una determinada matriz de movilidad, es decir a partir de la estimación del número de personas que desea trasladarse de un sitio a otro se determinan las rutas que deben seguir los vehículos (líneas) y la cadencia de cada una de estas líneas a lo largo del día, esto es cada cuánto debe pasar un vehículo por cada parada.

La matriz de movilidad está siempre referida a una franja horaria en concreto y a un tipo de día en concreto, ya que evidentemente el flujo de personas que desean trasladarse de un sitio a otro depende de unos usos y costumbre que varían, por ejemplo, de un día laborable a un día festivo o de una hora punta a una hora nocturna.

Las líneas regulares tienen por lo general unos recorridos muy estables ya que cualquier variación en el mismo comporta un nuevo acuerdo en la concesión municipal.

No ocurre lo mismo con la cadencia de paso de los vehículos donde la compañía tiene mucha más capacidad de decisión y autonomía.

Horarios de vehículos o *Vehicle scheduling*

Una vez programados los viajes que se desea realizar, se determina cuántos vehículos son necesarios para hacerlos.

Aquí hay que tener en cuenta que dependiendo de la franja horaria en que nos encontremos, para hacer un mismo recorrido un autobús puede tardar más o menos tiempo. El mismo trayecto que en una "hora punta" puede costar dos horas hacerlo, en una "hora valle" se puede hacer en una hora y media.

Al mismo tiempo que se determina cuántos vehículos son necesarios para cubrir todos los servicios que plantea la compañía, se está organizando el horario de los mismos, es decir a qué hora saldrá de la cochera, qué trayecto o trayectos hará, en qué momentos pasará por los distintos puntos de relevo y a qué hora regresará a la cochera.

Organización de las jornadas de trabajo o *Crew scheduling*

Una expedición es el trayecto de un vehículo entre su salida y su llegada al garaje o cochera.

Evidentemente una expedición puede tener un horario muy amplio y un mismo conductor no puede llevar ese vehículo tantas horas. Ya están previstos distintos puntos de relevo donde el conductor puede ser reemplazado por otro. Supongamos que para una línea determinada (Plaza Cataluña - Plaza Tetuán - Plaza Cataluña) el punto de relevo se encuentra en Plaza Cataluña, el conductor que ha cogido ese vehículo a primera hora puede ser reemplazado después de la primera vuelta o después de la segunda, tercera...

Pasar por un punto de relevo no significa que el conductor deba ser necesariamente reemplazado por otro, sino que puede serlo.

Se denomina viaje a la parte de una expedición comprendida entre dos puntos de relevo consecutivos.

Parte de trabajo es el conjunto de viajes consecutivos de una misma expedición efectuados por un mismo conductor.

Se conoce como *Crew scheduling* el proceso por el cual se elaboran las jornadas de trabajo es decir el conjunto de partes de trabajo efectuados por el mismo conductor.

Este es el problema mejor estudiado y del cual existen más referencias, entre ellas SMITH, B.M. (1988), WERNER, F.; BRÄSEL H. y KLUGE D. (1995), WREN, A. y WREN, D.O. (1995), etc.

Asignación de conductores o Rostering

Una vez determinadas las jornadas de trabajo falta aún asignar estas jornadas a trabajadores concretos, contemplando toda una serie de factores condicionantes como pueden ser:

- **Los periodos de descanso:** Puesto que cada jornada de trabajo resultado del Crew scheduling puede empezar y terminar a horas distintas, cuando se asigna a un mismo conductor dos jornadas determinadas para dos días consecutivos hay que tener en cuenta que descanse al menos un número mínimo de horas.
- **Los días libres:** Puesto que hay servicios todos los días del año hay que contemplar cómo se distribuyen los días libres. Para que por un lado la compañía vea cubiertos todos los servicios con el mínimo número de personal y por otro lado el reparto de los días libres sea lo más equitativo posible en cuanto a número de días seguidos de trabajo, número de festivos libres, número de fines de semana libres, etc.
- **Los cambios de turno:** Algunos convenios laborales contemplan unos determinados cambios de turno que es necesario respetar a la hora de hacer esta asignación. Por ejemplo los trabajadores deben trabajar de forma rotativa quince días en turno de mañana, quince días en turno de tarde y quince en turno partido.
- **El número total de horas trabajadas:** Otro tema que suele ser motivo de conflicto es el total de horas trabajadas al cabo del año. Si un mismo conductor siempre es asignado a jornadas de trabajo "cortas" al cabo del año puede tener respecto a otro trabajador una desviación muy importante en cuanto al número total de horas trabajadas. Esto puede comportar pérdidas económicas para la compañía dado que por un lado debe pagar horas extras a los conductores que han trabajado más de lo estipulado y por otro lado a los que han trabajado menos no puede descontarles nada.

El presente trabajo trata de abordar la última de estas cuatro fases, es decir el problema de Rostering. Para ello parte de la solución o soluciones halladas en los problemas anteriores, en particular de las jornadas de trabajo establecidas por el Crew scheduling. Estas jornadas de trabajo solución del Crew Scheduling serán en principio diferentes para cada tipo de periodo, es decir difieren entre periodos donde la demanda de servicios y por lo tanto de conductores es distinta.

El motivo por el cual se ha elegido el problema de la asignación de conductores ha sido determinado por varias circunstancias pero sobre todo por la percepción de que es el problema peor resuelto actualmente. Intervienen en el demasiados factores para poder ser abordado de una forma general, de modo que cualquier solución que se pretenda dar al problema de Rostering tiene implícitas unas ciertas limitaciones que pueden invalidar su aplicación en otras circunstancias.

Hay que tener en cuenta que los convenios colectivos pueden influir tanto en este tema que una buena solución para una compañía puede ser absolutamente inviable para otra.

Para abordar el problema de Rostering en empresas de transporte regular, ha sido necesario definir el marco de referencia ya que no había un concepto claro de lo que esto significaba.

En el capítulo 2 se ha recogido un glosario de términos frecuentemente utilizados en el contexto del transporte regular y se ha dado un significado concreto a cada uno de ellos. La gran ambigüedad con que trata la literatura y el uso cotidiano conceptos como: línea, turno, tarea, etc. exigían una definición precisa. También se han definido términos y *problemas tipo* frecuentemente utilizados en la bibliografía del tema.

A continuación en el capítulo 3 se ha recogido una buena muestra de publicaciones que tienen como tema el problema de la organización de horarios o Rostering aplicado a distintas actividades de servicios. Dicha recopilación se ha organizado atendiendo al problema que tratan de resolver y no al método utilizado para abordarlo.

Seguidamente en el capítulo 4 se plantean las peculiaridades que tiene el problema de Rostering en

las empresas de transporte regular y se observa por un lado, las discrepancias reales existentes entre las restricciones impuestas por una u otra compañía y por otro la imposibilidad de aplicar los planteamientos recogidos en la bibliografía.

Una vez recogida la información que permite definir el problema se pasa a la formalización del mismo en el capítulo 5. Dicha formalización del modelo permite observar que dado el tamaño del modelo, no es posible tratarlo directamente.

El hecho de que las diferentes empresas planteen restricciones contradictorias hace pensar que dichas restricciones son fruto de unos derechos adquiridos que impiden en muchos casos el adoptar nuevos planteamientos. En este sentido se ha optado por dar dos tipos de soluciones distintas, por un lado en el **capítulo 6** se aborda la mejora del procedimiento o de la asignación que actualmente se hace, respetando todos los requisitos impuestos y por otro lado, en el **capítulo 7** se describe un procedimiento genérico para llegar a la solución que se obtendría si se pudieran obviar todos aquellos requisitos que lo único que hacen es desequilibrar la asignación, provocando las diferencias en la carga de trabajo de la que se quejan tanto las empresas como los trabajadores.

Por último en el **capítulo 8** se recogen las conclusiones de la tesis señalando sus principales aportaciones y las futuras líneas de trabajo que quedan abiertas.

Todo el desarrollo teórico ha sido ejemplificado mediante un caso concreto que sirve de hilo conductor para facilitar la comprensión de lo que se expone. Los ejemplos repetitivos y las referencias a los tiempos de cálculo así como a los distintos resultados obtenidos utilizando distintos parámetros de cálculo han sido recogidos en el anexo final.

2 Glosario

2.1 Objeto del glosario

Este capítulo pretende clarificar la terminología usada en el presente trabajo.

Para ello se definen toda una serie de términos que tienen en este ámbito una significación muy determinada, pudiendo diferir notablemente de su acepción habitual en otros entornos.

Se ha hecho así mismo un esfuerzo de unificación y coherencia en la terminología pues reina una gran diversidad de notación entre los distintos autores y empresas.

Siempre que se ha creído conveniente aparece el termino en inglés junto con la traducción adoptada.

Las definiciones aparecen en el orden adecuado para facilitar su comprensión. A continuación se proporciona la lista de todos los términos definidos por orden alfabético.

Ciclo
Conductor fijo
Conductor corre-turno
Expedición
Horizonte de planificación
Jornada de trabajo
Línea
Lista de tareas
Organización de jornadas de trabajo
Organización de Listas de tareas
Parte de trabajo
Patrón
Período
Problema de cobertura de conjuntos
Problema del cuello de botella
Problema de satisfacción de restricciones
Problema generalizado de cobertura de conjuntos
Punto de Relevó
Tipo de período
Tipo de período mayoritario
Tipo de período obligatorio
Turnos continuos
Turno horario
Viaje

2.2 Definición de términos

Línea

Una **línea** es un servicio regular de vehículos que recorren un itinerario determinado.

Expedición

Una **expedición** es el trayecto de un vehículo entre su salida y su llegada al garaje o cochera.

Punto de Relevo

Se denomina **punto de relevo** al lugar donde un conductor puede ser reemplazado por otro.

Viaje

(Trips)

Se denomina **Viaje** a la parte de una expedición comprendida entre dos puntos de relevo consecutivos.

Parte de trabajo

Se denomina **Parte de trabajo** a un conjunto de Viajes consecutivos de una misma expedición efectuados por un mismo conductor.

Jornada de trabajo

(Duties)

Se denomina **Jornada de trabajo** al conjunto de partes de trabajo efectuados por el mismo conductor en un día. Dentro de la jornada de trabajo los distintos partes de trabajo tienen una secuencia determinada.

Lista o Lista de tareas

(Roster)

Se denomina **Lista de tareas** a la secuencia de Jornadas de trabajo efectuadas por el mismo conductor en el horizonte de planificación.

Turno horario

(Shift)

Un **Turno horario** se define por una hora de inicio, una hora de finalización y ocasionalmente un periodo de descanso entre ambas.

En un sentido más general y dado que las jornadas de trabajo pueden empezar cada una de ellas en horas diferentes, se agrupan las que tienen un horario de trabajo similar formando lo que se denomina también turnos horarios en un sentido más amplio. Por ejemplo: Turno de mañana, tarde o noche.

Si una jornada de trabajo tiene, entre su hora de inicio y su hora de finalización, un periodo de tiempo no remunerado, se dice que tiene un turno horario partido.

Turno continuo

(Continuous tour scheduling)

Se habla de **turno continuo** cuando se permite que el tiempo de trabajo de un turno horario se prolongue desde un día al siguiente.

Organización de jornadas de trabajo

(Crew scheduling)

Se conoce como Organización de jornadas de trabajo el proceso por el cual se elaboran las jornadas de trabajo es decir el conjunto de partes de trabajo efectuados por el mismo conductor.

Organización de listas de tareas

(Crew rostering)

Se conoce como Organización de Listas de tareas el proceso por el cual se agrupan jornadas de trabajo en Listas de tareas.

Horizonte de planificación

Horizonte temporal sobre el que se plantea el problema de la *Organización de listas*.

Período

Unidad de tiempo en que se subdivide el *Horizonte de planificación*.

Tipos de período

Dos periodos son del mismo tipo si y sólo si tienen las mismas jornadas de trabajo.

Patrón

Vector formado por componentes binarias que indican si el periodo de tiempo correspondiente es de presencia en el trabajo o por el contrario es de descanso.

Tipo de período obligatorio

Un tipo de período será obligatorio si no existe ningún patrón que tenga todos los periodos de ese tipo como periodos de descanso.

Tipo de período mayoritario

Se denomina tipo de período mayoritario al tipo de periodo que aparece con más frecuencia como período de trabajo en los patrones.

Ciclo

Número de periodos a partir de los cuales se repite la misma secuencia en el patrón.

Conductor fijo

Un conductor fijo será aquél que tenga asignada una única jornada de trabajo por cada tipo de periodo y en consecuencia todos los periodos del mismo tipo realizará el mismo trabajo.

Conductor corre-turno

Un conductor corre-turno será aquél que tenga asignada más de una jornada de trabajo por tipo de periodo, pudiendo trabajar dos periodos del mismo tipo en jornadas de trabajo diferentes.

Problema de cobertura de conjuntos

(Set covering problem)¹

Sea el conjunto $I = \{1, \dots, m\}$ y el conjunto $P = \{P_1, \dots, P_n\}$ donde $P_j \subseteq I$, $j \in J = \{1, \dots, n\}$

Un subconjunto $J^* \subseteq J$ define una cobertura de I si y sólo si

$$\bigcup_{j \in J^*} P_j = I$$

Sea $c_j > 0$ el coste asociado con cada $j \in J$ el coste total de la cobertura J^* es $\sum_{j \in J^*} c_j$.

El **problema de cobertura de conjuntos** es hallar la cobertura de coste mínimo y puede escribirse como el siguiente problema lineal entero

$$\text{Min} \quad \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1 \quad i = 1 \dots m$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad j = 1 \dots n$$

$$\text{donde } x_j = \begin{cases} 1 & \text{si } j \text{ está en la cobertura} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i \in P_j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Problema generalizado de cobertura de conjuntos

(Generalized Set Covering Problem)

$$\text{Min} \quad \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq d_i \quad i = 1 \dots m$$

$$0 \leq x_j \quad \text{entero} \quad j = 1 \dots n$$

donde $d_i \geq 0$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i \in P_j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

se trata de hallar el valor de las variables x_j donde

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{si } j \text{ está en la cobertura} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

¹ Definición de GARFINKEL, R.S. (1972)

Problema del cuello de botella

(Bottleneck programming problem)¹

$$\max z(x), \quad x \in S = \{x \mid g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m, \quad x \text{ } n\text{-vector binario}\}$$

donde

$$z(x) = \min f(j), \quad j \in V(x) = \{j \mid x_j = 1\}$$

y f es una función de $J = \{1, \dots, n\}$ en \Re

Problema de satisfacción de restricciones

(Constraint Satisfaction Problem)²

Dado un conjunto de variables que pueden tomar un número finito de valores y dado un conjunto de restricciones. Hallar valores de dichas variables que cumplan las restricciones.

¹ Definición de GARFINKEL, R.S. (1972)

² Definición de BRAILSFORD, S.C. y otros (1999)

2.3 Notación

$\lceil x \rceil$ representa el menor entero mayor o igual que x .

$\lfloor x \rfloor$ representa el mayor entero menor o igual que