

8 Conclusiones

El presente trabajo titulado: "Asignación de conductores a jornadas de trabajo en empresas de transporte colectivo" constituye un acercamiento al problema de la asignación de tareas, en un ámbito muy concreto: el de los conductores de líneas urbanas regulares. Se trata pues de un caso particular de lo que se conoce como problema de *rostering*.

Dentro del amplísimo marco de la asignación de tareas, destaca, por ser uno de los más estudiados, la asignación de viajes en las compañías de transporte.

Se podría decir que el problema de la asignación de tareas en las compañías de transporte urbano regular está a mitad de camino entre la elaboración de turnos horarios tipo hospitales, peajes de autopistas, gasolineras, tiendas 24 horas, etc y la asignación de vuelos o viajes de largo recorrido. Ya que combina la elaboración de turnos con la asignación de tareas.

Esta tesis ha sido elaborada con una doble finalidad, por un lado definir el problema lo mejor posible en cuanto a su adaptación a las circunstancias reales que se viven hoy día en las empresas de transporte y por el otro la resolución del mismo.

Un esfuerzo muy importante en este trabajo ha ido encaminado a dilucidar cuales son los objetivos, los requerimientos y restricciones básicas impuestas por las diferentes compañías de transporte urbano regular a la hora de distribuir el trabajo entre sus conductores.

Para ello se contactó con las principales empresas españolas de transporte regular obteniéndose información suficiente de 10 de ellas.

Una de las cosas que más sorprende comparando los datos suministrados por las diferentes compañías es la gran disparidad que existe entre ellos. Disparidad que radica no solamente en la elaboración de los turnos y asignación de las tareas sino también en los criterios utilizados para ello, criterios que resultan en muchos casos totalmente contradictorios entre compañías distintas.

A modo de ejemplo se podría citar que mientras algunas compañías hacen trabajar a sus conductores siempre en el mismo turno horario, en otras los cambian continuamente, lo mismo se podría decir de la línea que tiene asignada cada conductor o de la presencia o no de la figura del corre-turno.

Con unos requerimientos tan distintos resulta imposible enunciar un único *problema de rostering en empresas de transporte urbano regular*. Lo que se ha hecho es, en primer lugar clarificar la terminología usada reuniendo en un **glosario** un buen número de palabras y expresiones frecuentemente utilizadas en estos ambientes. En segundo lugar tratar de formalizar algunos conceptos y elementos básicos como pueden ser los de período, tipo de periodo, patrón, ciclo, jornada de trabajo o lista de tareas. En tercer lugar se han deducido algunas fórmulas o proposiciones que dan por ejemplo, el número mínimo de conductores necesario para cubrir una determinada demanda, o el número de conductores que pueden compartir una determinada tarea.

Con estos elementos convenientemente definidos y formalizados se pueden plantear distintos problemas y resolverlos según las restricciones impuestas por una u otra compañía.

Esto se lleva a cabo desde dos perspectivas diferentes, en la primera se parte de la actual situación y de la asignación de conductores implantada en la empresa, y se mejora alterando lo menos posible la situación de partida. En la segunda se plantea un procedimiento genérico que resuelva el problema de *rostering* únicamente con criterios de equidad.

8.1 Mejora

Bajo esta perspectiva se toma un caso concreto y se analiza a fondo la asignación de conductores que actualmente se está llevando a la práctica. En ella se observan los siguientes problemas:

- Hay días en que no se cubren todas las jornadas de trabajo previstas

- Si se contabilizan las horas trabajadas por cada conductor en un año, se observa que la carga de trabajo se ha repartido de forma muy desigual.

El problema se aborda en dos etapas consecutivas la primera va encaminada a cubrir el déficit de trabajadores que se observa en algunos periodos y la segunda a repartir la carga laboral de forma más equitativa.

Patrones: En la primera fase se expone un procedimiento mediante el cual a partir de unos patrones de días libres que resultan deficitarios para una determinada demanda, se construyen unos nuevos patrones que la cubren perfectamente. En este proceso se intentan respetar al máximo los patrones utilizados por la compañía. En el caso concreto utilizado para ejemplificar el procedimiento tan sólo se alteran 2 de los 33 patrones propuestos inicialmente.

El procedimiento se basa en la resolución de una serie de problemas lineales enteros que además de indicar qué patrones que deben abandonar la solución, proporciona información a cerca de cómo deben ser los nuevos patrones que los sustituirán de modo que estos pueden ser generados de forma automática.

Listas de tareas: Una vez conseguido un juego de patrones que cubra perfectamente la demanda con el número mínimo de conductores se plantea la distribución del trabajo que realizará cada conductor en cada uno de los días o periodos que se presente a trabajar.

Dicha distribución debe tener en cuenta, en este caso concreto que se está resolviendo, una serie de reglas entre ellas:

- Debe haber el máximo número posible de conductores fijos, es decir de conductores que tengan asignada la misma jornada de trabajo todos los días.
- Los conductores fijos deben incorporarse todos los días al trabajo en el mismo lugar.
- Los conductores corre-turno podrán incorporarse al trabajo en cualquier lugar.
- Siempre trabajarán en jornadas pertenecientes al mismo turno horario.

El objetivo en la elaboración de estas listas de tareas será conseguir un reparto equitativo de las horas trabajadas al cabo de los 10 meses de que consta el horizonte de planificación que la compañía propone en este caso.

Para ello se utiliza un procedimiento greedy.

El cálculo de la mejor lista de tareas que incluye una jornada determinada se hace mediante la optimización de un programa lineal entero al cual se le pasan los parámetros desde un programa escrito en Visual Basic v6. El paquete estándar de optimización que se utiliza en el cálculo es Lingo v6. El resultado es recogido de nuevo por el programa en Visual Basic e introducido en la asignación que se está construyendo.

Los resultados obtenidos reducen a la mitad la suma de horas de desviación respecto a las horas teóricas que debe realizar cada conductor, sencillamente a base de combinar las jornadas de trabajo para los distintos tipos de periodo. La diferencia entre el número de horas trabajadas por el conductor que más horas hace y el que menos también se ve considerablemente reducido.

8.2 Genérico

Si se realizara un sondeo acerca de qué cualidades debería tener una buena asignación de conductores a sus jornadas de trabajo entre las más apreciadas aparecerían las siguientes:

- No debería utilizar más conductores de los necesarios.
- Deberían repartir equitativamente la carga laboral.
- Deberían repartir equitativamente los días libres que coinciden con sábados y domingos.
- Deberían tener unos patrones de días libres de ciclo corto.

- Los conductores deberían realizar la misma jornada de trabajo todos los días o periodos del mismo tipo y cuando esto no es posible al menos jornadas que empiecen a una hora similar y tengan el mismo lugar de incorporación al trabajo.

En esta parte del trabajo se diseña una asignación que cumple con estos criterios prescindiendo de otros condicionamientos de tipo histórico. El problema se resuelve de nuevo en dos etapas sucesivas.

En la primera etapa se hallan patrones que se acoplan perfectamente a una demanda determinada. Se diferencia de otros trabajos que tratan este mismo tema en que la longitud del ciclo es mucho más reducida, cosa que es imprescindible en una compañía de transporte urbano. La mayor parte de los algoritmos que se proponen para la construcción de patrones dan como resultado patrones de ciclo demasiado largo para ser utilizados en una empresa de transporte regular.

El algoritmo propuesto se basa en la descomposición y posterior agrupación de los patrones de modo que no todos los conductores pasen por todas las semanas del ciclo. En este procedimiento para encontrar patrones de ciclo corto que se ajusten perfectamente a una demanda determinada se distinguen dos estrategias, la primera es más recomendable cuando el número de conductores necesario para cubrir la demanda es reducido (inferior a 100) o bien cuando los patrones semanales válidos son muy pocos. La segunda estrategia está más indicada cuando el número de conductores es muy elevado o hay muchos patrones semanales válidos diferentes.

La segunda etapa de este procedimiento genérico utiliza un procedimiento GRASP para la selección de una jornada de trabajo para cada tipo de periodo. En primer lugar se observa que el problema es separable por lo que se denominan *subconjuntos compatibles* de jornadas de trabajo. La filosofía empleada en la fase constructiva de este algoritmo GRASP es similar a la utilizada en el algoritmo greedy, es decir empezar por la asignación de aquellas jornadas de trabajo más difíciles en el sentido de más desequilibradas en cuanto al número de horas de trabajo por exceso o por defecto de las mismas.

El elemento de aleatoriedad se consigue a base de no escoger para entrar en la solución la lista más cara sino que se elabora una lista restringida de candidatos. Dando a cada miembro de esa lista una probabilidad proporcional a su coste. Una vez concluida la fase constructiva se desarrolla una búsqueda local en la cuál intercambiando las jornadas de trabajo de los periodos significativos entre sí, se explora el entorno de la solución construida. Finalmente se compara el óptimo local así obtenido con la incumbente. La comparación se hace en tres aspectos:

- Si mejora la suma de las desviaciones respecto a las horas teóricas que debe hacer cada conductor.
- Si mejora la diferencia máxima entre conductores.
- Si mejora ambas cosas.

El proceso finaliza al alcanzar un número determinado de iteraciones.

Procesando el mismo caso tratado en el capítulo anterior se llega a reducir la suma de horas de desviación a la tercera parte y la diferencia máxima entre conductores a la mitad.

En definitiva, el presente trabajo aporta todo un bagaje de notación y conceptos para poder definir problemas de rostering en empresas de transporte urbano atendiendo a diferentes requisitos. Aporta así mismo un algoritmo de generación de patrones de ciclo corto que cubren perfectamente una demanda específica y un procedimiento GRASP para la combinación de tareas y patrones que permite hallar en pocos minutos una buena solución entre millones de ellas.

Quedan abiertas futuras líneas de trabajo entre ellas la posibilidad de plantear de forma global distintas épocas del año con distintas demandas, periodos vacacionales, etc.

Otro camino que se ha empezado a explorar es la posibilidad de distinguir a priori si una descomposición en subciclos tiene o no solución. Para ello se plantean especialmente útiles las técnicas de *Constraint Logic Programming* en particular las relacionadas con la consistencia de los arcos o *arc consistency*.

9 Referencias

BAKER, K.R. (1976)

Workforce Allocation in Cyclical Scheduling Problems: A Survey
Operational Research Quarterly Vol 27 N° 1 ii 1976
Pag.: 155 - 167

BAKER, K.R. (1974-a)

Scheduling a Full-Time Workforce to Meet Cyclic Staffing Requirements
Management Science. Vol 20, N° 12, August 1974
Pag.: 1561 - 1568

BAKER, K.R. (1974-b)

Scheduling Full-Time and Part-Time Staff to Meet Cyclic Requirements.
Operational Research Quarterly Vol. 25 n°1 1974
Pag.: 65 - 75

BAKER, K.R. and MAGAZINE, M.J. (1977)

Workforce Scheduling with Cyclic Demands and Day - Off Constraints
Management Science vol.24 n.2 1977
Pag.: 161 - 167

BAKER, K.R.; BURNS, R.N. and CARTER, M.W. (1979)

Staff Scheduling with Day - off and Workstretch Constraints
AIIE Trans. 6, 11 1979
Pag.: 286 - 292

BARTHOLDI, J.J. (1981)

A Guaranteed Accuracy Round-off Algorithm for Cyclic Scheduling and Set Covering
Operations Research 29, 3 1981
Pag.: 501 - 510

BARTHOLDI, J.J. and RATLIFF, H.D. (1978)

Unnetworks with Applications to Idle Time Scheduling
Management Science 24, 8 1978
Pag.: 850 - 858

BARTHOLDI, J.J.; ORLIN, J.B. and RATLIFF, H.D. (1980)

Cyclic Scheduling via Integer Programs with Circular Ones
Operations Research 28, 5 1980
Pag.: 1074 - 1085

BEAUMONT, N. (1997)

Using Mixed Integer Programming to Design Employee Rosters
Journal of the Operational Research Society, 48 1997
Pag.: 585 - 590

BECHTOLD, S.E. (1988)

Implicit Optimal and Heuristic Labor Staffing in a Multi - Objective, Multilocation
Environment
Decision Science, 19, 2 1988
Pag.: 353 - 373

- BECHTOLD, S.E. and BRUSCO, M.J. (1994)**
Working Set Generation Methods for Labor Tour Scheduling
European Journal of Operational Research 74 1994
Pag.: 540 - 551
- BECHTOLD, S.E. and BRUSCO, M.J. (1994)**
A Microcomputer - Based Heuristic for Tour Scheduling of a Mixed Workforce
Computers & Operations Research Vol.21 n° 9 1994
Pag.: 1001 - 1009
- BECHTOLD, S.E. and SHOWALTER, M.J. (1987)**
A Methodology for Labor Scheduling in a Service Operating System
Decision science 18 1987
Pag.: 89 - 107
- BECHTOLD, S.E.; BRUSCO, M. J. and SHOWALTER, M.J. (1991)**
A Comparative Evaluation of Labor Tour Scheduling Methods
Decision Sciences,22, 4 1991
Pag.: 683 - 699
- BIANCO, L. & BIELLI, M. (1992)**
A Heuristic Procedure for the Crew Rostering Problem
European Journal of Operational Research 58 1992
Pag.: 272 - 283
- BRAILSFORD, S.C. ; POTTS, C.N. and SMITH, B.M. (1999)**
Constraint Satisfaction Problems: Algorithms and Applications
European Journal of Operational Research 119 1999
Pag.: 557 - 581
- BRUSCO, M.J. and JACOBS, L.W. (1993)**
A Simulated Annealing Approach to the Solution of Flexible Labour Scheduling Problems
Research Society Vol. 44, N° 12 1993
Pag.: 1191 - 1200
- BRUSCO, M.J. and JACOBS, L.W. (1998)**
Eliminating redundant columns in Continuous Tour Scheduling Problems
European Journal of Operational Research, 111 1998
Pag.: 518-525
- BURNS, R.N. and CARTER, M.W. (1985)**
Work Force Size and Schedules with Variable Demands
Management Science 31 1985
Pag.: 599 - 607
- CAPRARA, A.; FISCHETTI, M.; GUIDA, P.L.; TOTH, P. and VIGO, D. (1997)**
Solution of Large-Scale Railway Crew Planning Problems: the Italian Experience
submitted for publication 1997
Pag.:
- CAPRARA, A.; FISCHETTI, M.; TOTH, P.; VIGO, D. and LUIGI GUIDA, P. (1997)**
Algorithms for Railway Crew Management
Mathematical Programming 79 1997
Pag.: 125 - 141
- CAPRARA, A.; FOCACCI, F.; LEMMA, E.; MELLO, P.; MILANO, M.; TOTH, P. and VIGO, D. (1998)**
Integrating Constraint Logic Programming and Operations Research Techniques for the Crew Rostering Problem

Software-Practice and Experience, 28 1998
Pag.: 49-76

CAPRARA, A.; TOTH, P.; VIGO, D. and FISCHETTI, M. (1998)

Modeling and Solving the crew Rostering Problem
Operations Research 1998
Pag.: 820 - 830

CARRARESI, P. and GALLO, G. (1984)

A Multi-Level Bottleneck Assignment Approach to the Bus Drivers' Rostering Problem
European Journal of Operation Research 16 1984
Pag.: 163 - 173

DAY, P.R. & RYAN, D.M. (1997)

Flight Attendant Rostering for Short-Haul Airline Operations
Operations Research vol. 45, n.5 1997
Pag.: 649 - 661

EASTON, F.F. and ROSSIN, D.F. (1991)

Equivalent Alternative Solutions for the Tour Scheduling Problem.
Decision science 22 1991
Pag.: 985 - 1007

EMMONS, H. & BURNS R.N. (1991)

Off-Day Scheduling with Hierarchical Worker Categories
Operations Research v39, n3 1991
Pag.: 484 - 495

FALCÃO, J. and PINHO, J. (2000)

GIST: Decision-support system for public transport planning in Portugal
ORMS Today, April 2000, vol.27 n°2
Pag.: 48-52

GARFINKEL, R.S. and NEMHAUSER, G.L. (1972)

Integer Programming
John Wiley & Sons 1972
Pag.: 1-427

GOPALKRISHNAN, M. ; GOPALKRISHNAN, S. & MILLER, D.M. (1993)

A Decision Support System for Scheduling Personnel in a Newspaper Publishing
Environment
Interfaces vol. 23 1993
Pag.: 104 - 115

HUNG, R. (1991)

Single-Shift Workforce Scheduling under a Compressed Workweek
Omega v19 1991
Pag.: 494 - 497

HUNG, R. (1993)

A Three-Day Workweek Multiple-Shift Scheduling Model.
Journal of the operation Research Society 44 1993
Pag.: 141 - 146

HUNG, R. (1994)

Multiple-Shift Workforce Scheduling Under the 3-4 Workweek With Different Weekday
and Weekend Labor Requirements
Management Science, Vol 40 N° 2 1994
Pag.: 280 - 284

- HUNG, R. (1994)**
 A Multiple-Shift Workforce Scheduling Model Under the 4-Day Workweek With
 Weekday and Weekend labour Demands
 Journal of the operation Research Society 45 n° 9 1994
 Pag.: 1088 - 1092
- HUNG, R. (1994)**
 Single-Shift Off Day Scheduling of a Hierarchical Workforce with Variable Demands
 European Journal of Operational Research vol.78 1994
 Pag.: 49 - 57
- LAPORTE, G (1999)**
 The art and science of designing Rotating Schedules
 Journal of the Operational Research Society, 50 1999
 Pag.: 1011-1017
- MABERT, V. and WATTS, C. (1982)**
 A Simulation Analysis of Tour-Shift Construction Procedures
 Management Science, 28, 5 1982
 Pag.: 520 - 532
- MASON, A.J. and SMITH, M.C. (1998)**
 Anested Column Generator for solving Rostering Problems with Inteer Programming
<http://www.esc.auckland.ac.nz/Mason> 1998
 Pag.: 1 - 8
- MASON, A.J.; RYAN, D.M. & PANTON, D.M. (1998)**
 Integrated Simulation, Heuristic and Optimisation Approaches to Staff Scheduling
 Operations Research Vol 46, n 2 1998
 Pag.: 161 - 174
- MILLAR, H.H. & KIRAGU, M. (1998)**
 Cyclic and Non-Cyclic Scheduling of 12h Shift Nurses by Network Programing
 European Journal of the Operational Research 1998
 Pag.: 582 - 592
- MILLER, H.E.; PIERSKALLA, W.P. and RATH, G.J. (1976)**
 Nurse Scheduling Using Mathematical Programming
 Operations Reseach, 24 1976
 Pag.: 857 - 869
- MORRIS, J.G.; SHOWALTER, M.J. (1983)**
 Simple Approaches to Shift, Days-Off and Tour Scheduling.
 Management Science, 29 (8) 1983
 Pag.: 942 - 950
- PAIXÃO, J and PATO, M. (1989)**
 A Structural Lagrangian Relaxation for Two - Duty Period Bus Driver Scheduling
 Problems
 European Journal of Operation Research 39 1989
 Pag.: 213 - 222
- RANDHAWA, S.U. & SITOMPUL, D. (1993)**
 A Heuristic-Based Computerized Nurse Scheduling System
 Computers & Operations Research v20 n8 1993
 Pag.: 837 - 844
- RYAN, D.M. (1992)**
 The Solution of Massive Generalized Set Partitioning Problems in Aircrew Rostering

Operational Research Society, Vol. 43, N° 5 1992
Pag.: 459 - 467

SEGAL, M. (1974)

The Operator Scheduling Problem: A Network Flow Approach
Operations Research, 22 (4) 1974
Pag.: 808 - 823

SHEPARDSON, F and MARSEN, R.E. (1980)

A Lagrangean Relaxation Algorithm for the Two Duty Period Scheduling Problem
Management Science 26 1980
Pag.: 274 - 281

SMITH, B.M.

IMPACS - A Bus Crew Scheduling System Using Interer Programming
Mathematical Programming 42 1988
Pag.: 181 - 187

THOMPSON, G.M. (1995)

Labor Scheduling Using NPV Estimates of the Marginal Benefit of Additional Labor Capacity
Journal of Operations Management 13 1995
Pag.: 67 - 86

TOWNSEND, W. (1988)

An Approach to Bus-Crew Roster Design in London Regional Transport
Journal of the operation Research Society Vol. 39 N°6 1988
Pag.: 543 - 550

VANCE, P.H.; BARNHART, C.; JOHNSON, E.L. and NEMHAUSER G.L. (1997)

Airline Crew Scheduling: A new Formulation and Decomposition Algorithm
Operations Research vol 45 n.2 1997
Pag.: 188 - 200

VASCONCELOS, CAMPOS (1995)

A Travelling Salesman Model for the Sequencing of Duties in Bus Crew Rotas
Journal of the operation Research Society (1995) 46 1995
Pag.: 415 - 426

WILLERS. W.P., PROLL, L.G. and WREN, A.

A Dual Strategy for Solving The Linear Programming Relaxation of a Driver Scheduling System
Annals of Operations Research 58 1995
Pag.: 519 - 531

WOLSEY, L.A. (1998)

Integer Programming
Wiley-Interscience Series in Discrete Mathematics and Optimization (John Wiley & Sons, inc. 1998
Pag.: 1-264

WREN, A. and WREN, D.O.

A Genetic Algorithm for Public Transport Driver Scheduling
Computers & Operations Research Vol. 22, N° 1 1995
Pag.: 101 - 110

Anexo

Hardware

Todas las pruebas han sido realizadas en un PC Pentium III a 700 MHz.

128 bytes de memoria RAM.

20 GBytes de disco.

Software

El sistema operativo utilizado ha sido Windows 98 Second Edition

Los programas se han desarrollado con Microsoft Visual Basic v6.

Los paquetes estandar de optimización utilizados han sido:

- Lingo V4
- Lingo V6
- Gams V2.5
- llog Opl v2.5.

Tamaño lista restringida de candidatos

Para la construcción del siguiente cuadro comparativo se ha utilizado el ejemplo de la elaboración de listas de tareas en el subconjunto compatible F.

Número de jornadas de trabajo por tipo de periodo: 10

Número de patrones: 2

Número de pruebas antes de mostrar incumbente: 10

Tamaño lista	Coste total	Diferencia Máxima
1	87.54	43.30
2	65.18	36.63
3	71.23	42.69
4	69.20	36.63
5	71.23	42.69

Cuadro comparativo para distintos tamaños de la lista restringida de candidatos

Tiempos

A continuación se registran los tiempos de cálculo requeridos para resolver mediante el procedimiento GRASP las listas de tareas en distintos casos.

En la primera columna se consigna el número de jornadas de trabajo de que consta el problema, en la segunda el número de patrones entre los que se ha buscado la solución, la tercera el número de soluciones construidas antes de mostrar la incumbente y por último el tiempo de cálculo expresado en segundos.

Jornadas	Patrones	Pruebas	Tiempo
2	2	20	3"
10	2	10	69"
9	2	20	74"
10	2	20	139"
15	2	10	268"

Tiempo de cálculo