

DISEÑO DE UN MODELO DE ASIGNACIÓN DE PERSONAL PARA UNA EMPRESA DE TRANSPORTE INTERURBANO

by

Patricia Pichardo Filiberto A thesis submitted in conformity with the requirements
for the MSc in Economics, Finance and Computer Science

University of Huelva & International University of Andalusia

uhu.es

un
i Universidad
Internacional
de Andalucía
A

Noviembre 2016

DISEÑO DE UN MODELO DE ASIGNACIÓN DE PERSONAL PARA UNA EMPRESA DE TRANSPORTE INTERURBANO

Patricia Pichardo Filiberto

Máster en Economía, Finanzas y Computación

José Manuel Bravo Caro y Manuel Jesus Vasallo Vázquez
Universidad de Huelva y Universidad Internacional de Andalucía

2016

Abstract

The objective of this study is the implementation of planning of personnel turnovers for a bus company that operates in the province of Huelva. We propose a model of Mixed-Integer Linear Programming through which the assignment of shifts to the different drivers is performed as evenly as possible over a period of one week, and accomplishing with the requirements which have been established by the company in terms of personnel through the inclusion of restrictions in the model

Key words: Bus transportation. Staff scheduling. Mixed-Integer Linear Programming

Resumen

El objetivo de este trabajo es realizar la planificación del personal de movimiento para una empresa de transporte interurbano de autobuses que realiza su actividad en la provincia de Huelva. Para ello, se propone un modelo de programación entera mixta, concretamente lineal, a través del cual se realiza la asignación de turnos a los distintos conductores lo más equitativamente posible durante un periodo de tiempo de una semana, y cumpliendo con los requisitos establecidos por la propia empresa en cuanto al personal a través de la inclusión de restricciones en el modelo

1. INTRODUCCIÓN

Todas las empresas, tanto públicas como privadas, cuentan con un problema común: la planificación de turnos de su personal de manera óptima. Muchas son las empresas, en todos los sectores de la economía, que han aumentado su inversión en tecnología e investigación operativa con el fin de mejorar sus sistemas de operaciones. Por ello, cada vez es mayor el número de software y modelos de optimización creados con el fin de mejorar las actividades operacionales de las empresas y determinar la mano de obra necesaria para hacer frente a las previsiones de demanda futura de las mismas.

En el caso de las empresas de servicios, la planificación de personal adquiere aún mayor relevancia debido a la alta variabilidad de su demanda. En este sentido, la programación intenta adecuar, a partir de una previsión de la demanda lo más exhaustiva posible, la cantidad de personal necesario para hacer frente al trabajo a realizar. Una correcta planificación del personal conlleva a un considerable ahorro en costes, razón por la cual son numerosos los estudios realizados en este ámbito.

Muchas son las empresas que ya han implementado métodos de generación de turnos y/o métodos de asignación y rotación de personal, entre las que destacan empresas de transportes masivos, centros médicos o aeropuertos, entre otros. El elevado número de clientes de este tipo de empresas así como la variabilidad en la demanda a lo largo del tiempo de estos clientes son razones más que evidentes de la necesidad de llevar a cabo una planificación óptima de su personal.

En este estudio se desarrolla un modelo de asignación de personal para una empresa de transporte interurbano de autobuses que realiza su actividad en la provincia de Huelva. Para ello se tendrán en cuenta las restricciones operacionales de la empresa así como la legislación laboral vigente. Con esta información de entrada y las especificaciones recibidas por parte de la empresa se realiza la formulación del modelo para dar solución al problema planteado. Para comprobar que el modelo planteado funciona correctamente, en primer lugar se presentan varios ejemplos simples donde se comprueba que la formulación del modelo es correcta y que los objetivos y las restricciones planteadas efectivamente proporcionan una solución óptima. Y por último, aplicamos el modelo al caso particular de la empresa de transportes ya comentada.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Existen numerosos estudios relacionados con procesos de programación del personal de las empresas. Sin embargo, las diferencias en la demanda de personal y en las tareas realizadas en cada sector dan lugar a muy diversos enfoques en la formulación de estos problemas. Por ejemplo, en *Li et al., (1991)* se realiza la programación del personal de una empresa del sector bancario, en *Loucks and Jacobs (1991)* a una empresa de comida rápida, en *Taylor and Husley (1989)* a un departamento de policía, y, en *J.P. Cavada et al. (2012)* al patio de equipajes en tierra de un aeropuerto.

Por esta razón, los métodos empleados para la resolución de problemas de asignación de personal son muy diversos para adaptarse lo máximo posible a los requerimientos de cada empresa, pudiéndose emplear desde métodos exactos como *Branch and Bound* o *Branch&Price*, a métodos heurísticos o métodos metaheurísticos, entre otros. En *Ernst et al. (2004a)* se puede encontrar una exhaustiva bibliografía de artículos sobre programación y rotación de personal escritos desde 1950; y en *Ernst et al.*

(2004b) se realiza una revisión completa de los métodos, aplicaciones y modelos empleados en la resolución de problemas de programación y rotación de personal.

No obstante, sea cual sea el método o métodos empleados para realizar la programación del personal de la organización, toda programación de personal consta de dos fases:

- *Fase 1*: en primer lugar se debe determinar qué tareas deben realizarse en la empresa cada día y agruparlas en turnos que tengan una duración determinada según las necesidades de cada empresa. En esta primera fase nos encontramos ante un problema de *generación de turnos de trabajo*.
- *Fase 2*: una vez generados los diferentes turnos de trabajo que deben realizarse, el siguiente paso es asignar a cada trabajador de la empresa la realización de un determinado turno cada día y programar, si se desea, la rotación del personal por dichos turnos. En esta fase estamos ante un *problema de asignación y rotación del personal*.

En el caso de las empresas de transporte masivo, el problema de programación del personal adquiere mayor relevancia para el caso del personal en movimiento, ya que una buena planificación de este personal para adaptarse a la demanda futura puede conllevar un gran ahorro en costes. Para esta planificación de tripulaciones se tienen como entradas la programación de los vehículos, la legislación laboral vigente y las normas operacionales de la empresa.

El problema de asignación de tripulaciones (*Crew Scheduling Problem - CSP*) consiste en la asignación de tripulaciones para el desarrollo de determinadas rutas en un sistema de transporte. Un caso particular de este tipo de problemas es el problema de asignación de conductores de autobús (*Bus Driver Scheduling Problem - BDSP*), consistente en determinar un conjunto de tareas a realizar por un conductor durante un día de trabajo, de manera que todos los conductores cubran los vehículos asignados *Wren&Eosseau, (1995)*. En los problemas CSP se parte de una asignación predeterminada de los vehículos a un determinado recorrido (turno) y la problemática se centra en la asignación de conductores a dichos vehículos.

En este mismo ámbito se encuentran también los problemas de rotación de turnos de trabajo consistentes en la asignación de un número de conductores a turnos de trabajo previamente establecidos cada día de la semana respetando las restricciones laborales correspondientes *Ernst et al. (2004b)*. Cada uno de estos turnos se forman a partir de una serie de tareas que son asignadas previamente con sus correspondientes tiempo de descanso, conociéndose como *roster* al conjunto de turnos desarrollados a lo largo de un horizonte temporal, normalmente una semana. Ejemplos de este tipo de problemas son *M. Lezaun et al. (2006)* y *Diego F. Quintero-Moncada et al. (2013)*.

3. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN Y ROTACIÓN DE TURNOS

3.1. Contexto del problema

En este trabajo el objetivo es conseguir la optimización en la asignación de turnos de trabajo para los conductores de una empresa particular de transporte interurbano, Damas S.A., en uno de sus sectores geográficos de trabajo (El Condado, Huelva), para un horizonte temporal de una semana.

Damas S.A. es una empresa dedicada al transporte regular y discrecional de pasajeros. Sus orígenes se remontan a 1920 donde se iniciaron transportes de viajeros entre Ayamonte y Huelva. En la

actualidad, Damas S.A es la mayor empresa de transporte regular y discrecional en la provincia de Huelva, con líneas que unen casi todos los municipios de la provincia con la capital, y cuenta con la concesión Huelva-Sevilla. La empresa además posee otras concesiones de transporte en Sevilla, Cádiz, Almería, Jaén, Murcia o Madrid, entre otras.

Para nuestra aplicación práctica tomaremos los datos de los servicios de transporte regular ofrecidos por la empresa en la zona geográfica de El Condado. Esta zona cuenta con 11 turnos de trabajo diarios de lunes a jueves, 12 turnos los viernes, 8 turnos los sábados y 7 turnos los domingos, todos ellos realizados por un total de 12 conductores.

En los trabajos realizados sobre la planificación de turnos de trabajo, el proceso suele estar dividido en dos pasos: primero se realiza una planificación y optimización de los turnos de trabajo (qué tareas hay que realizar, cómo realizarlas y cuándo); y en segundo lugar se realiza la asignación de personal a esos turnos (cuánto personal es necesario para el trabajo y en qué momento del tiempo).

En nuestro caso, la planificación de turnos de trabajo para hacer frente a la demanda de la empresa en la zona en cuestión ya viene dada por la empresa y para su desarrollo se ha tenido en cuenta la previsión de la demanda de la zona y, a su vez, una serie de restricciones operacionales. Los siguientes puntos describen dichas restricciones:

- Se denominará segmento a cada ruta comprendida entre una estación de origen a una estación de destinos.
- La unión de varios segmentos dará lugar a un turno de trabajo.
- Cada turno de trabajo es realizado por un conductor y un autobús
- Cada autobús debe salir y volver al terminar el turno a la misma estación.
- Ningún conductor debe conducir durante más de cuatro horas y media ininterrumpidamente. Cada 4,5 horas de conducción ininterrumpidas corresponde un descanso de 45 minutos
- Se deben minimizar los viajes “vacíos” para posicionar el autobús en la siguiente estación de salida.
- Cada turno debe tener una duración de trabajo efectivo de entre 5-8 horas.

Con estos turnos ya planificados (**Anexo 1**) nuestro objetivo es optimizar la asignación de los turnos a los conductores en función de las características de los turnos y de la legislación laboral y empresarial vigente.

3.2. Descripción del problema

La empresa actualmente cuenta con 11 turnos de trabajo diarios de lunes a jueves, 12 turnos los viernes, 8 turnos los sábados y 7 turnos los viernes (Anexo 1), que tienen actualmente repartidos entre 12 conductores. Según el Convenio Colectivo Interprovincial de Damas S.A, publicado en el Boletín Oficial de la Junta de Andalucía el 21 de junio de 2013, por el que se rige la empresa:

- Los conductores pueden trabajar un máximo de 40 horas en cómputo semanal.
- Los conductores podrán realizar un máximo de 2 horas extraordinarias de trabajo semanales.

- El descanso de cada conductor, según convenio, debe ser de 1 día de descanso una semana y 2 días la siguiente para compensar así las horas de descanso establecidas (1,5 días de descanso semanales).

De esta manera, nuestro objetivo será asignar los turnos de trabajo a los conductores correspondientes de la forma más equitativa posible. La función objetivo será minimizar la diferencia de horas efectivas de trabajo a la semana entre los distintos conductores. Esta función estará sujeta a una serie de restricciones que vienen dadas por la normativa de la empresa y el convenio colectivo de los trabajadores, siendo estas restricciones las siguientes:

- Cada turno debe ser asignado a un conductor cada día, teniendo en cuenta qué día de la semana es y qué turnos hay activos ese día.
- Cada trabajador debe realizar como máximo un turno cada día.
- Todos los conductores deben trabajar a la semana un máximo de 42 horas (40 horas + 2 horas extraordinarias).
- Todos los conductores deben tener a la semana entre 1 y 2 días de descanso.

3.3. *Formulación del problema*

El problema planteado se va a modelar mediante un problema de optimización con restricciones cuya solución será la planificación deseada conforme a las especificaciones indicadas en los apartados anteriores.

3.3.1. *Conjuntos*

I, conjunto de todos los trabajadores, índice $i = \{1, \dots, N_i\}$

J, conjunto de días que deben ser asignados, índice $j = \{1, \dots, N_j\}$

K, conjunto de turnos factibles a cubrir, índice $k = \{1, \dots, N_k\}$

3.3.2. *Parámetros*

H_k , duración en horas del turno k

H_{\max} , número máximo de horas que pueden ser asignadas al trabajador i al día

H_{ext} , número máximo de horas extras que pueden ser asignadas al trabajador i en el periodo

DescMin, número mínimo de días de descanso que puede tener cada trabajador a la semana

TD_{jk} , matriz binaria; 1 si el turno k está disponible el día j y 0 en caso contrario.

3.3.3. *Variables*

$$\alpha_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si el turno } k \text{ es asignado al conductor } i \text{ el día } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

3.3.4. *Modelo*

Para el desarrollo del modelo vamos a emplear una función objetivo que busque la equidad en el reparto de horas trabajadas entre los conductores. Para ello, emplearemos la variable dependiente Y :

$$Y = n^\circ \text{ total de horas asignadas a todos los trabajadores}$$

A través de la función objetivo buscaremos minimizar la diferencia (en valor absoluto) entre las horas medias asignadas a los conductores y las horas reales asignadas a los mismos, a la vez que realizamos una pre-asignación de algunos conductores en determinados turnos en función de los requerimientos de la empresa. El periodo de estudio es una semana.

El modelo inicial planteado es el siguiente:

$$\text{Min } f(\alpha) = \gamma \cdot \sum_i \left| \frac{Y}{N_i} - \sum_j \sum_k H_k \cdot \alpha_{ijk} \right| + (1 - \gamma) \cdot \sum_{i^* \in I^*} \sum_{j^* \in J^*} \sum_{k^* \in K^*} (1 - \alpha_{i^*j^*k^*}) \quad (1)$$

Sujeto a:

$$Y = \sum_i \sum_j \sum_k H_k \cdot \alpha_{ijk} \quad (2)$$

$$\sum_i \alpha_{ijk} = TD_{jk} \quad (3)$$

$$\sum_k \alpha_{ijk} \leq 1 \quad (4)$$

$$\sum_j \sum_k H_k \cdot \alpha_{ijk} \leq H_{max} \cdot (N_j - DescMin) \quad (5)$$

$$\sum_j \sum_k \alpha_{ijk} \leq (N_j - DescMin) \quad (6)$$

Como ya hemos comentado, en la función objetivo (1), donde I^* , J^* y K^* representan los conductores, días y turnos preasignados, se minimiza la diferencia (en valor absoluto) entre el promedio de horas trabajadas entre todos los trabajadores y las horas asignadas a cada uno de ellos, buscando cumplir además con una desviación mínima respecto a la preasignación de conductores realizada inicialmente (se asignará siempre que sea posible el turno k^* al conductor i^*). El parámetro γ pretende ponderar cada una de las partes de la función objetivo según las necesidades del problema. Así, para $\gamma = 1$ únicamente se tendrá en cuenta el reparto equitativo de las horas entre los conductores, para $\gamma = 0$ sólo se asignará siguiendo la preasignación establecida, y para cualquier otro valor de γ entre (0, 1) se asignará siguiendo ambos criterios pero dando un peso específico a cada una de las partes de la ecuación.

Las restricciones se describen a continuación:

- Restricción (2): se define la variable Y como la sumatoria del total de horas asignadas a todos los trabajadores.

- Restricción (3): se asegura que cada turno sea asignado a un único conductor cada día, siempre para aquellos turnos que están operativos ese día.
- Restricción (4): obliga que cada conductor sea asignado a un único turno cada día.
- Restricción (5): establece que cada conductor debe trabajar un máximo de horas en el período.
- Restricción (6): cada conductor debe tener un número mínimo de días de descanso durante el período.

No obstante, con la función objetivo definida nos encontramos con un problema de no linealidad pues el valor absoluto es una función discontinua, lo cual dificulta la resolución de dicho problema. Para evitar este problema y facilitar la resolución, vamos a transformar el problema no lineal inicialmente planteado en un problema lineal a través de la incorporación al modelo de variables *slack* que acoten superior e inferiormente los valores absolutos, permitiendo su eliminación. .

A su vez, y para reducir el tamaño del problema vamos a transformar la matriz H_k formada por un columna y N_k filas con N_k sin reducir en la matriz H_{jk} cuya dimensión será $N_j \times N_k$ con N_k reducido. De esta forma, para el ejemplo en cuestión, inicialmente tendríamos una matriz H_k de dimensión 1×30 , quedando tras la transformación una matriz H_{jk} de dimensión 7×12 (12 es el número máximo de turnos que pueden ser realizados un mismo día).

Además, con esta transformación, la matriz TD_{jk} también se ve modificada. Recordemos que la matriz TD_{jk} es una matriz binaria donde 1 significa que el turno k está disponible el día j y 0 en caso contrario. Al disminuir el índice k , la matriz TD_{jk} disminuye también su dimensión y se formará de manera que, dado un j^* y un k^* :

- Si $H_{j^*k^*} = 0 \rightarrow TD_{j^*k^*} = 0$
- Si $H_{j^*k^*} \neq 0 \rightarrow TD_{j^*k^*} = 1$

De esta manera, el nuevo planteamiento sería el siguiente:

$$\text{Min } f(S) = \gamma \cdot \sum_i S_i + (1 - \gamma) \cdot \sum_{i^* \in I^*} \sum_{j^* \in J^*} \sum_{k^* \in K^*} (1 - \alpha_{i^*j^*k^*}) \quad (5)$$

Sujeto a:

$$Y = \sum_i \sum_j \sum_k H_{jk} \cdot \alpha_{ijk} \quad (2)$$

$$\sum_i \alpha_{ijk} = TD_{jk} \quad (3)$$

$$\sum_k \alpha_{ijk} \leq 1 \quad (4)$$

$$\sum_j \sum_k H_{jk} \cdot \alpha_{ijk} \leq H_{max} \cdot (N_j - DescMin) \quad (5)$$

$$\sum_j \sum_k \alpha_{ijk} \leq (N_j - DescMin) \quad (6)$$

$$\frac{Y}{N_i} - \sum_j \sum_k H_{jk} \cdot \alpha_{ijk} \leq S_i \quad (7)$$

$$\frac{Y}{N_i} - \sum_j \sum_k H_{jk} \cdot \alpha_{ijk} \geq -S_i \quad (8)$$

El problema de optimización obtenido pertenece a la familia MILP (*Mixed-Integer Linear Programming*) y, por tanto, se necesita programación entera mixta (concretamente lineal) para resolverlo.

4. EXPERIMENTOS COMPUTACIONALES

La resolución del problema se ha realizado a través del software MatLab en su versión R2016b. Para ello, se ha empleado la librería YALMIP, la cual nos permite traducir el lenguaje de modelado empleado en nuestra formulación del problema en un lenguaje de programación que el software entienda como problema de optimización y pueda resolverlo como tal. Para la resolución se ha empleado el Solver SCIP, el cual se encuentra dentro de la librería Opti, y que resuelve problemas de optimización entera mixta, ya sea lineal o no lineal. Ambas librerías han sido instaladas previamente para poder ser usadas en la resolución del problema pues no vienen por defecto en el MatLab.

Para comprobar el correcto funcionamiento del modelo se realiza la resolución de varios ejemplos más pequeños en relación al número de variables que el problema descrito en este estudio pero con las mismas restricciones y datos similares.

4.1. Resolución de algunos ejemplos prácticos

Supondremos que tenemos que asignar a 5 trabajadores un total de 7 turnos a lo largo de un período de 4 días. No obstante, de los 7 turnos totales que hay el máximo número de turnos que se realizan en un mismo día son 4. Supondremos además un máximo de 8 horas de trabajo al día y al menos un día de descanso durante el periodo. De esta forma, los datos del problema son:

- Número de conductores, $N_i=5$
- Número de días a asignar, $N_j=4$
- Número de turnos a asignar, $N_k=7 \rightarrow$ resumidos en $\rightarrow N_k=4$
- Duración de cada turno, $H_k=[8, 7, 6, 4, 7, 6, 6]$
- Tabla de turnos disponibles cada día

	TURNO A	TURNO B	TURNO C	TURNO D
DIA 1	T1 (8h)	T2 (7h)	T3 (6h)	T4 (7h)
DIA 2	T1 (8h)	T2 (7h)	T3 (6h)	T4 (7h)
DIA 3	T1 (8h)	T2 (7h)	T3 (6h)	T4 (7h)
DIA 4	T5 (6h)	T6 (6h)	T7 (6h)	

- Matriz $H_{jk}=[8\ 7\ 6\ 7;8\ 7\ 6\ 7;8\ 7\ 6\ 7;6\ 6\ 6\ 0]$
- Matriz $TD_{jk}=[1\ 1\ 1\ 1;1\ 1\ 1\ 1;1\ 1\ 1\ 1;1\ 1\ 1\ 0]$
- Número máximo de horas de trabajo al día $H_{\max}=8$
- Número máximo de horas extra por trabajador en el período, $H_{\text{extra}}=0$
- Mínimo número de días de descanso por trabajador en el período, $\text{DescMin}=1$

4.1.1. Apartado 1:

Resolver el problema empleando como función objetivo únicamente la parte correspondiente a la preasignación de los trabajadores (es decir, $\gamma = 0$). En concreto, la preasignación será que el turno A deberá ser asignado al conductor 3 y el turno C al conductor 1. La solución obtenida queda recogida en la siguiente tabla.

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	TOTAL HORAS
Conductor 1	DESCANSO	TC (6h)	TC (6h)	TC (6h)	18 HORAS
Conductor 2	TC (6h)	DESCANSO	TB (7h)	TB (6h)	19 HORAS
Conductor 3	TA (8h)	TA (8h)	DESCANSO	TA (6h)	22 HORAS
Conductor 4	TB (7h)	TB (7h)	TD (7h)	DESCANSO	21 HORAS
Conductor 5	TD (7h)	TD (7h)	TA (8h)	DESCANSO	22 HORAS

Como vemos, efectivamente el Turno A ha sido asignado al Conductor 3 y el Turno C al Conductor 1, respetando el día de descanso para cada uno. En el caso del reparto de horas, como no hemos tenido en cuenta el reparto equitativo de las mismas en la función objetivo, se han repartido de manera arbitraria entre el resto de conductores.

4.1.2. Apartado 2

Resolver el problema empleando como función objetivo únicamente la parte correspondiente al reparto equitativo de las horas de trabajo entre todos los conductores ($\gamma = 1$). En este caso, el total de horas asignadas entre todos los trabajadores será $Y=102$, siendo por tanto la media de horas que debería

corresponder a cada trabajador $Y/N_i = 20,4h/conductor$. La solución obtenida queda recogida en la siguiente tabla:

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	TOTAL HORAS
Conductor 1	TD (7h)	DESCANSO	TD (7h)	TB (6h)	20 HORAS
Conductor 2	TC (6h)	TA (8h)	TC (6h)	DESCANSO	20 HORAS
Conductor 3	DESCANSO	TC (6h)	TA (8h)	TA (6h)	20 HORAS
Conductor 4	TB (7h)	TB (7h)	DESCANSO	TC (6h)	20 HORAS
Conductor 5	TA (8h)	TD (7h)	TB (7h)	DESCANSO	22 HORAS

En este caso observamos que la asignación se ha realizado siguiendo el reparto equitativo de las horas entre todos los trabajadores de forma que la diferencia de las horas asignadas con la media correspondiente a cada trabajador es mínima. También comprobamos que se cumple el requisito de descansar al menos un día durante el período.

4.1.3. Apartado 3

Resolver el problema empleando como función objetivo la ecuación completa empleando como valor del parámetro gamma, $\gamma = 0,5$, es decir, dándole el mismo peso al reparto equitativo de las horas entre los trabajadores como a la preasignación establecida en el apartado 1. La solución obtenida queda recogida en la siguiente tabla.

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	TOTAL HORAS
Conductor 1	TC (6h)	DESCANSO	TA (8h)	TC (6h)	20 HORAS
Conductor 2	DESCANSO	TB (7h)	TB (7h)	TB (6h)	20 HORAS
Conductor 3	TA (8h)	TA (8h)	DESCANSO	TA (6h)	22 HORAS
Conductor 4	TB (7h)	TD (7h)	TC (6h)	DESCANSO	20 HORAS
Conductor 5	TD (7h)	TC (6h)	TD (7h)	DESCANSO	20 HORAS

Como vemos, el reparto de horas es igual de equitativo que cuando $\gamma = 1$ y, a la misma vez, se ha asignado al Conductor 3 el Turno A y al Conductor 1 el Turno C siempre que ha sido posible.

4.2. Resolución del problema inicial planteado

Una vez demostrado con pequeños ejemplos que el modelo planteado funciona correctamente vamos a resolver el caso práctico para el cual se ha realizado este estudio. Como ya hemos comentado, vamos a asignar un total de 30 turnos ($N_k=30$) entre 12 conductores ($N_i=12$) durante un periodo de una semana ($N_j=7$). Los datos del problema, ya comentados, quedan resumidos en las siguientes tablas:

→ La duración en horas de cada uno de los turnos del Anexo 1 queda recogida en la siguiente tabla, junto con el nombre que van a recibir a partir de ahora:

TURNO	HORAS	NOMBRE	TURNO	HORAS	NOMBRE	TURNO	HORAS	NOMBRE
T1 L-V	6	A1	T11 L-J	6	A12	T8S	8	A23
T2 L-V	6	A2	T11 V	8	A13	T1D	8	A24
T3 L-J	6	A3	T12 V	6	A14	T2 D	8	A25
T3 V	8	A4	T13 L-V	8	A15	T3 D	6	A26
T4 L-J	7	A5	T1 S	8	A16	T4 D	7	A27
T4 V	8	A6	T2 S	8	A17	T5 D	8	A28
T5 L-V	8	A7	T3 S	6	A18	T6 D	6	A29
T6 L-V	6	A8	T4 S	6	A19	T7 D	6	A30
T7 L-V	7	A9	T5 S	8	A20			
T8 L-V	6	A10	T6 S	6	A21			
T10 L-V	7	A11	T7 S	6	A22			

Como vemos, la empresa cuenta con un total de 30 turnos diferentes.

→ El siguiente paso es construir la matriz H_{jk} donde se resumen los 30 turnos totales que tiene la empresa en 12 turnos, $N_k^* = 12$ (12 es el número máximo de turnos que se llevan a cabo en un mismo día). Para ello veamos la correspondencia de esos 30 turnos en los nuevos turnos resumidos:

Turnos originales: A1-A30 → Turnos resumidos T1-T12

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
Lunes	A1	A2	A3	A5	A7	A8	A9	A10	A11	A12		A15
Martes	A1	A2	A3	A5	A7	A8	A9	A10	A11	A12		A15
Miércoles	A1	A2	A3	A5	A7	A8	A9	A10	A11	A12		A15
Jueves	A1	A2	A3	A5	A7	A8	A9	A10	A11	A12		A15
Viernes	A1	A2	A4	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A13	A14	A15
Sábado	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23				
Domingo	A24	A25	A26	A27	A28	A29	A30					

En esta nueva matriz H_{jk} los turnos T1-T12 corresponderán a un turno real diferente según el día de la semana que estemos asignando. Por el ejemplo, el lunes el T1 hace referencia al turno A1 y el sábado hace referencia al turno A17. La matriz H_{jk} contendrá las horas de duración de los turnos reales correspondientes. Una vez tenemos la correspondencia de los turnos construimos la matriz H_{jk} . Para ello únicamente debemos poner en cada día la duración del turno correspondiente.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
L	7	7	6	7	8	7	7	6	7	6	0	8
M	7	7	6	7	8	7	7	6	7	6	0	8
X	7	7	6	7	8	7	7	6	7	6	0	8
J	7	7	6	7	8	7	7	6	7	6	0	8
V	7	7	8	8	8	7	7	6	7	8	6	8
S	8	8	7	6	7	6	6	8	0	0	0	0
D	8	8	7	7	7	6	6	0	0	0	0	0

→ Construida la matriz H_{jk} , el siguiente paso es construir la matriz TD_{jk}

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
L	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
M	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
X	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
J	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
V	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
D	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0

→ El resto de parámetros que nos quedan por determinar son:

- ◆ Número máximo de horas asignadas en el período, $H_{\max} = 40$
- ◆ Número mínimo de días de descanso en el período, $\text{DescMin} = 1$
- ◆ Número máximo de horas extras en el período, $H_{\text{ext}} = 2$
- ◆ Ponderación de la función objetivo, $\gamma = 0,5$
- ◆ Preasignaciones de turnos a conductores: puesto que existen diversas localizaciones de salida de los autobuses, es necesario que algunos de los turnos sean realizados por determinados conductores, aquellos que tienen su vivienda en el municipio de salida del autobús. Por ello, vamos a preasignar 7 de los 12 conductores para que, en la medida de lo

posible, cada uno de estos 7 conductores se le asigne el turno establecido. La preasignación de turnos empleada ha sido la siguiente:

CONDUCTOR	TURNOS PREASIGNADOS	CONDUCTOR	TURNOS PREASIGNADOS
CONDUCTOR 1	A8, A18, A26	CONDUCTOR 5	A14, A23
CONDUCTOR 2	A12, A19	CONDUCTOR 6	A10
CONDUCTOR 3	A7, A27	CONDUCTOR 7	A1
CONDUCTOR 4	A9, A20, A28		

Con todos estos datos se ha resuelto el problema en MatLab. El resultado obtenido aparece en la tabla que vemos a continuación. El tiempo de total de ejecución del algoritmo ha sido de 0.510620 segundos.

	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO	TOTAL HORAS
CONDUCTOR 1	A8	A8	A8	D	A8	A18	A26	42
CONDUCTOR 2	D	A12	A12	A12	A12	A19	A25	40
CONDUCTOR 3	A7	A7	A7	A7	A7	D.	D	40
CONDUCTOR 4	A9	A9	A9	A9	A9	D	A28	42
CONDUCTOR 5	A3	A15	A5	A5	A14	A23	D	42
CONDUCTOR 6	A10	A10	A10	A10	A10	A16	D	38
CONDUCTOR 7	A1	A1	A1	A3	A1	D	A24	42
CONDUCTOR 8	A12	A11	A3	A1	A15	A17	D	42
CONDUCTOR 9	A15	A3	A11	A2	A11	A20	D	42
CONDUCTOR 10	A5	D	A2	A8	A6	A22	A27	42
CONDUCTOR 11	A2	A5	A15	A11	A2	D	A30	42
CONDUCTOR 12	A11	A5	D	A15	A4	A21	A29	42

Como podemos observar, el modelo ha resuelto el problema de la asignación de los turnos de personal cumpliendo las restricciones establecidas, las preasignaciones y repartiendo las horas de trabajo entre todos los trabajadores de la forma más equitativa posible.

5. CONCLUSIONES

El problema planteado por la empresa Damas S.A. para la programación de su personal en movimiento para una zona concreta de actuación (El Condado) ha sido resuelto con éxito a través del modelo planteado, cumpliendo con los requisitos establecidos por la empresa y en un tiempo de ejecución de escasos segundos.

Posibles extensiones futuras de este trabajo podrían ser las siguientes:

- A nivel semanal, incluir a trabajadores con contrato a tiempo parcial, pues en este estudio solo se han tenido en cuenta los trabajadores contratados en jornada completa.
- Ampliar la programación del personal a un período más amplio (dos semanas o un mes). Para ello deberán cumplirse restricciones extras como por ejemplo que cada trabajador tenga descansos alternativos de uno y dos días a la semana, y en el caso de descansar dos días estos días deben ser consecutivos. Al realizar la ampliación del período de planificación será necesario el aumento del número de conductores para cubrir todos los turnos y los descansos.
- Incluir en el modelo la posibilidad de asignar a los trabajadores días concretos de descanso por petición del propio trabajador o por baja, entre otras posibilidades.
- Sustituir la preasignación por un término en la función objetivo que diera valor a la repetición de turnos por el mismo trabajador

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
3. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN Y ROTACIÓN DE TURNOS	4
<i>3.1. Contexto del problema</i>	4
<i>3.2. Descripción del problema</i>	5
<i>3.3. Formulación del problema</i>	6
<i>3.3.1. Conjuntos</i>	6
<i>3.3.2. Parámetros</i>	6
<i>3.3.3. Variables</i>	6
<i>3.3.4. Modelo</i>	6
4. EXPERIMENTOS COMPUTACIONALES	9
<i>4.1. Resolución de algunos ejemplos prácticos</i>	9
<i>4.2. Resolución del problema inicial planteado</i>	11
5. CONCLUSIONES	15
References.....	17
ANEXO 1.....	18

References

- Ernst, A., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Owens, B., Sier, D., 2004a. *An annotated bibliography of personnel scheduling and rostering*. Annals of Operations Research 127 (1-4), 21-144.
- Ernst, A., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Sier, D., 2004b. *Staffing scheduling and rostering: A review of applications, methods and models*. European Journal of Operational Research 153, 3-27.
- Herrera J.P.C, Cortés C.E., Rey P.A., 2012. *Modelo de planificación y asignación de personal para el patio de equipajes de un aeropuerto internacional*.
- Li, C., Robinson, E.P. Mabert, V.A. 1991. *An evaluation of tour scheduling heuristics with differences in employee productivity and cost*. Decision Sciences 22 (4), 700-718.
- Loucks, J.S., Jacobs, F.R., 1991. *Tour scheduling and task assignment of a heterogeneous workforce*. Decision Sciences 22 (4), 719-738.
- Lezaun. M., Perez G., Sáinz de la Maza E., 2006. *Crew rostering problem in a public transport company*. Journal of the Operational Research Society (2006) 57, 1173-1179 Taylor, P., Huxley, S., 1989. *A break from tradition for the san francisco police: Patrol officer scheduling using an optimization-based decision support system*. Interfaces 19, 4-24.
- Quintero-Moncada, D.F., Quintero-Araújo, C.L. , 2013. *Diseño de un modelo de asignación de turnos para la operación de sistemas de transporte masivo tipo BRT*. 11th LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013) "Innovation in Engineering, Technology and Education for Competitiveness and Prosperity" August 14 - 16, 2013 Cancun, Mexico Wren, A. ,& Rousseau, J.M. (1995). *Bus driver scheduling – an overview*. in: Daduna, J., Branco, I., P. Paixao, J. (editors) Computer-Aided Transit Scheduling, Springer Verlag, pp. 173-187.
- Wren, A., Rousseau, J.M. (1995). *Bus driver scheduling – an overview*. in: Daduna, J., Branco, I. and P. Paixao, J. (editors) Computer-Aided Transit Scheduling, Springer Verlag, pp. 173-187.

ANEXO 1

RELACIÓN DE TURNOS DE CONDADO VERANO 2016

TURNO 1 Lunes-Viernes			TURNO 6 Lunes-Viernes		
Hora	Línea	Recorrido	Hora	Línea	Recorrido
7:00	851	Almonte-Matalascañas	7:00	222	Rociana-Bllos-Almonte
8:00	851	Matalascañas-Almonte	7:30	Vacio	Almonte-Rociana
9:00	851	Almonte-Matalascañas	8:45	222	Rociana-Almonte-Sevilla
10:00	851	Matalascañas-Almonte	13:30	222	Sevilla-Almonte-Rociana
11:00	851	Almonte-Matalascañas	18:15	222	Rociana-Bllos-Almonte
12:00	851	Matalascañas-Almonte	19:15	222	Almonte-Bllos-Rociana
13:00	851	Almonte-Matalascañas	TURNO 7 Lunes-Viernes		
14:00	851	Matalascañas-Almonte	Hora	Línea	Recorrido
TURNO 2 Lunes-Viernes			8:45	859	Paterna-Matalascañas
Hora	Línea	Recorrido	11:00	851	Matalascañas-Almonte
15:00	851	Almonte-Matalascañas	12:00	851	Almonte-Matalascañas
16:00	851	Matalascañas-Almonte	13:00	851	Matalascañas-Almonte
17:00	851	Almonte-Matalascañas	14:00	851	Almonte-Matalascañas
18:00	851	Matalascañas-Almonte	17:00	851	Matalascañas-Almonte
19:00	851	Almonte-Matalascañas	18:00	851	Almonte-Matalascañas
20:00	851	Matalascañas-Almonte	19:00	859	Matalascañas-Paterna
21:00	851	Almonte-Matalascañas	TURNO 8 Lunes-Viernes		
22:00	851	Matalascañas-Almonte	Hora	Línea	Recorrido
TURNO 3 Lunes- Jueves			6:45	218	Matalascañas-SevillaxHinojos
Hora	Línea	Recorrido	9:00	230	Sevilla-Matalascañas
8:00	851	Almonte-Matalascañas	13:00	230	Matalascañas-Sevilla
9:00	851	Matalascañas-Almonte	15:00	230	Sevilla-Matalascañas
9:45	Vacio	Almonte-Rociana	TURNO 9 Lunes-Viernes		
10:00	076	Rociana-Alm-Bllos-La Palma	Hora	Línea	Recorrido
13:00	076	La Palma-Bllos-Alm-Rociana	9:00	230	Matalascañas-Sevilla
13:45	vacio	Rociana-Almonte	11:00	218	Sevilla-Matalascañas xHinojos
20:00	851	Almonte-Matalascañas	15:00	218	Matalascañas-Sevilla xHinojos
21:00	851	Matalascañas-Almonte	18:00	218	Sevilla-Matalascañas
TURNO 3 Viernes			TURNO 10 Lunes-Jueves		
Hora	Línea	Recorrido	Hora	Línea	Recorrido
8:00	851	Almonte-Matalascañas	7:15	051	Hinojos-Chucena-Huelva
9:00	851	Matalascañas-Almonte	10:00	133	Huelva-Matalascañas
9:45	Vacio	Almonte-Rociana	11:00	133	Matalascañas-Huelva
10:00	076	Rociana-Alm-Bllos-La Palma	13:35	172	Huelva-Nuevos Hospitales
13:00	076	La Palma-Bllos-Alm-Rociana	13:00	172	Nuevos Hospitales-Huelva
13:45	vacio	Rociana-Almonte	13:30	051	Huelva-Chucena-Hinojos
20:00	851	Almonte-Matalascañas	TURNO 10Viernes		
21:00	851	Matalascañas-Almonte	Hora	Línea	Recorrido
TURNO 4 Lunes-Jueves			7:15	051	Hinojos-Chucena-Huelva
Hora	Línea	Recorrido	10:00	133	Huelva-Matalascañas
8:30	081	Almonte-Huelva	11:00	133	Matalascañas-Huelva
10:30	012	Huelva-Manzanilla	12:35	172	Huelva-Nuevos Hospitales
11:30	012	Manzanilla-Huelva	13:00	172	Nuevos Hospitales-Huelva
14:15	1553	Huelva-Htal. Infanta Elena	13:30	051	Huelva-Chucena-Hinojos
15:10	1553	Htal. Infanta Elena-Huelva	16:00	Vacio	Hinojos-Sevilla
16:00	084	Huelva-Bonares-alm.Bllos.	17:00	230	Sevilla-Matalascañas
17:45	Vacio	Bllos-Almonte	18:20	Vacio	Matalascañas-Hinojos

TURNO 4 Viernes

Hora	Línea	Recorrido
8:30	081	Almonte-Huelva
10:30	012	Huelva-Manzanilla
11:30	012	Manzanilla-Huelva
14:15	1553	Huelva-Htal. Infanta Elena
15:10	1553	Htal. Infanta Elena-Huelva
16:00	084	Huelva-Bonares-alm.Bllos.
17:45	Vacio	Bllos-Almonte
20:00	851	Almonte-Matalascañas
21:00	851	Matalascañas-Almonte

TURNO 5 Lunes-Viernes

Hora	Línea	Recorrido
6:45	083	Bllos-Almonte-Huelva
8:00	083	Huelva-Almonte-Bllos.
9:00	083	Bllos-Almonte-Huelva
12:00	083	Huelva-Almonte-Bllos.
15:00	084	Bllos-Alm-Bonares-Huelva
19:00	084	Huelva-Bonares-Alm-Bllos
19:00	084	Huelva-Bonares-Alm-Bllos

TURNO 1 Sábado

Hora	Línea	Recorrido
7:00	851	Almonte-Matalascañas
8:00	851	Matalascañas-Almonte
9:00	851	Almonte-Matalascañas
10:00	851	Matalascañas-Almonte
11:00	851	Almonte-Matalascañas
12:00	851	Matalascañas-Almonte
17:00	851	Almonte-Matalascañas
18:00	851	Matalascañas-Almonte
20:00	851	Almonte-Matalascañas
21:00	851	Matalascañas-Almonte

TURNO 2 Sábado

Hora	Línea	Recorrido
8:00	851	Almonte-Matalascañas
9:00	851	Matalascañas-Almonte
13:00	851	Almonte-Matalascañas
14:00	851	Matalascañas-Almonte
15:00	851	Almonte-Matalascañas
16:00	851	Matalascañas-Almonte
19:00	851	Almonte-Matalascañas
20:00	851	Matalascañas-Almonte
21:00	851	Almonte-Matalascañas
22:00	851	Matalascañas-Almonte

TURNO 3 Sábado

Hora	Línea	Recorrido
8:45	222	Rociana-Bllos-Alm-Sevilla
13:00	230	Sevilla-Matalascañas
15:00	218	Matalascañas-Sevilla xHinojos
19:00	222	Sevilla-Alm-Bllos-Rociana

TURNO 11 Viernes

Hora	Línea	Recorrido
23:00	859	La Palma-Bllos-Rociana-Mata
6:00	859	Matalascañas-Rociana-Bllos-Palma
7:00	Vacio	La Palma-Matalascañas
8:00	859	Matalascañas-Rociana-Bllos-Palma

TURNO 12 Lunes-Viernes

Hora	Línea	Recorrido
9:00	312	Castilleja del Campo-Sevilla
11:00	012	Sevilla-Manzanilla
11:45	012	Manzanilla-Sevilla
12:30	113	Sevilla-Taller de Camas
15:40	113	Taller de Camas-Sevilla
16:00	299	Sevilla-Bormujos-Sevilla
18:00	012	Sevilla-Huelva
20:00	012	Huelva-Castilleja del Campo

TURNO 1 Domingo

Hora	Línea	Recorrido
7:00	851	Almonte-Matalascañas
8:00	851	Matalascañas-Almonte
9:00	851	Almonte-Matalascañas
10:00	851	Matalascañas-Almonte
11:00	851	Almonte-Matalascañas
12:00	851	Matalascañas-Almonte
17:00	851	Almonte-Matalascañas
18:00	851	Matalascañas-Almonte
20:00	851	Almonte-Matalascañas
21:00	851	Matalascañas-Almonte

TURNO 2 Domingo

Hora	Línea	Recorrido
8:00	851	Almonte-Matalascañas
9:00	851	Matalascañas-Almonte
13:00	851	Almonte-Matalascañas
14:00	851	Matalascañas-Almonte
15:00	851	Almonte-Matalascañas
16:00	851	Matalascañas-Almonte
19:00	851	Almonte-Matalascañas
20:00	851	Matalascañas-Almonte
21:00	851	Almonte-Matalascañas
22:00	851	Matalascañas-Almonte

TURNO 3 Domingo

Hora	Línea	Recorrido
8:45	222	Rociana-Bllos-Alm-Sevilla
13:00	230	Sevilla-Matalascañas
15:00	218	Matalascañas-Sevilla xHinojos
19:00	222	Sevilla-Alm-Bllos-Rociana

TURNO 4 Sábado

Hora	Línea	Recorrido
8:30	086	Hinojos-Bllos-Huelva
13:30	084	Huelva-Almonte-Bllos
15:30	084	Bllos-Almonte-Bonares-Huelva
19:00	086	Huelva-Almonte-Hinojos

TURNO 5 Sábado

Hora	Línea	Recorrido
8:45	859	Paterna-Matalascañas
11:00	851	Matalascañas-Almonte
12:00	851	Almonte-Matalascañas
13:00	851	Matalascañas-Almonte
14:00	851	Almonte-Matalascañas
17:00	851	Matalascañas-Almonte
18:00	851	Almonte-Matalascañas
19:00	859	Matalascañas-Paterna

TURNO 6 Sábado

Hora	Línea	Recorrido
06.45	218	Matalascañas-Sevilla xHinojos
9:00	230	Sevilla-Matalascañas
13:00	230	Matalascañas-Sevilla
15:00	230	Sevilla-Matalascañas

TURNO 7 Sábado

Hora	Línea	Recorrido
9:00	230	Matalascañas-Sevilla
11:00	218	Sevilla-Matalascañas xHinojos
18:00	218	Matalascañas-Sevilla xHinojos
20:30	230	Sevilla-Matalascañas (Express)

TURNO 8 Sábado

Hora	Línea	Recorrido
23:00	859	La Palma-Bllos-Rociana-Mata
6:00	859	Matalascañas-Rociana-Bllos-Palma
7:00	Vacio	La Palma-Matalascañas
8:00	859	Matalascañas-Rociana-Bllos-Palma

TURNO 4 Domingo

Hora	Línea	Recorrido
9:00	084	Bllos-Alm-Bonares-Huelva
11:00	128	Huelva-El Portil
11:30	Vacio	El Portil-Huelva
12:00	128	Huelva-El Portil
12:30	Vacio	El Portil-Huelva
17:00	111	Huelva-Gibraleón
17:25	111	Gibraleón-Huelva
19:00	084	Huelva-Bonares-Alm-Bllos

TURNO 5 Domingo

Hora	Línea	Recorrido
8:45	859	Paterna-Matalascañas
11:00	851	Matalascañas-Almonte
12:00	851	Almonte-Matalascañas
13:00	851	Matalascañas-Almonte
14:00	851	Almonte-Matalascañas
17:00	851	Matalascañas-Almonte
18:00	851	Almonte-Matalascañas
19:00	859	Matalascañas-Paterna

TURNO 6 Domingo

Hora	Línea	Recorrido
13:00	224	Paterna-Sevilla
15:00	230	Sevilla-Matalascañas xHinojos
18:00	218	Matalascañas-Sevilla xHinojos
20:00	224	Sevilla-Paterna

TURNO 7 Domingo

Hora	Línea	Recorrido
9:00	230	Matalascañas-Sevilla
11:00	218	Sevilla-Matalascañas xHinojos
18:00	218	Matalascañas-Sevilla xHinojos
20:30	230	Sevilla-Matalascañas (Express)