

## Procedimiento heurístico para la asignación de horarios y tareas a trabajadores polivalentes

Jordi Ojeda Rodríguez<sup>1</sup>, Albert Corominas Subias<sup>2</sup>, Rafael Pastor Moreno<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ing. Industrial, Centre CIM UPC-ICT, C Llorens i Artigas 12, 08028 Barcelona, jordi.ojeda@upc.es

<sup>2</sup> Dr. Ing. Industrial, IOC-DOE-ETSEIB, UPC, Av. Diagonal 647, 08028 Barcelona, albert.corominas@upc.es

<sup>3</sup> Dr. Ing. Industrial, IOC-DOE-ETSEIB, UPC, Av. Diagonal 647, 08028 Barcelona, rafael.pastor@upc.es

### Resumen

*Se ha desarrollado un procedimiento heurístico para la asignación de horarios y tareas a trabajadores polivalentes, que permita comparar los resultados con los obtenidos de los modelos de programación lineal mixta (PLM) desarrollados con el mismo equipo de investigadores. Dichos modelos de PLM no aseguraban el óptimo en todas las ocasiones, así que se propone utilizar la heurística diseñada como procedimiento alternativo a la PLM.*

**Palabras clave:** Programación de horarios, Heurística

### 1. Introducción

En Ojeda *et al.* (2003a y 2003b) se presentan dos modelos de programación lineal mixta para la asignación de horarios a los trabajadores polivalentes de un centro de servicios. En las pruebas realizadas con datos reales y simulados, no se garantiza el óptimo en determinadas ocasiones. Se diseña un procedimiento heurístico para comparar los resultados con los obtenidos de los modelos citados.

Los datos básicos del problema son:

- Relación de trabajadores con los siguientes datos para cada uno de ellos:
  - o Categoría.
  - o Lista de horarios admisibles y sus preferencias, para la semana de estudio a programar.
- Tipos de tareas que pueden realizar los trabajadores de cada categoría, y prioridad y eficiencia correspondiente a cada par *categoría-tarea*.
- Capacidad mínima para cada tipo de tarea, en cada período de tiempo del horizonte de programación (hora, media hora, etc.).
- Capacidad deseada para cada tipo de tarea (igual o mayor que la capacidad mínima), en cada período de tiempo del horizonte de programación.

- Importancia relativa de los diferentes elementos a considerar en la función objetivo.

La función a optimizar es compleja, ya que se consideran diversos objetivos:

- Minimizar las desviaciones de la capacidad resultante respecto a la capacidad deseada.
- Maximizar las preferencias de los trabajadores al asignar los horarios.
- Maximizar las prioridades al asignar las tareas a las categorías.

Una capacidad inferior o superior a la capacidad deseada contribuye a un deterioro del nivel de servicio que hay que tener en cuenta, tanto desde un punto de vista del valor absoluto del déficit o del superávit, como del valor relativo respecto al valor deseado. Cada unidad adicional de déficit o superávit produce un deterioro del servicio más que proporcional, con una repercusión no lineal y convexa. El reparto del déficit y del superávit entre varios períodos contribuye a disminuir el deterioro del nivel de servicio. Por otro lado, la cota inferior de la capacidad indica el valor mínimo aceptable para poder desarrollar el servicio.

En Thompsom (1997) se expone una clasificación completa de los modelos presentados por diferentes autores, para acabar concluyendo que los modelos existentes no garantizan un desarrollo eficiente de la programación de horarios al no tener un control directo sobre el nivel de servicio. Las dificultades de los modelos analizados se basan en dos limitaciones en su aplicación: la insuficiencia de poder asegurar un nivel mínimo de capacidad aceptable en cada período; y no evitar que el superávit aumente notablemente en pocos períodos, en lugar de repartirlo de forma más homogénea. El reto es superar dichas limitaciones para asegurar un nivel de servicio aceptable y con ello la satisfacción del cliente y de los trabajadores.

Con estas premisas, y utilizando la misma función objetivo empleada en Ojeda *et al.* (2003a y 2003b), se propone el siguiente procedimiento heurístico de tres fases:

- 1ª Fase: Procedimiento *greedy*.
- 2ª Fase: Reasignación de tareas a los trabajadores.
- 3ª Fase: Optimización local.

En la fase 1, el procedimiento *greedy* parte de una solución *vacía* (sin ninguna asignación); se fija la asignación *horario-trabajador* a aquella pareja que presenta un mejor valor de la función objetivo; y así iterativamente. Además de asignar un horario a un trabajador, en cada período en que está presente según dicho horario, se le debe asignar la tarea a realizar. De esta forma, para generar las asignaciones *horario-trabajador* (y tarea) posibles, se utilizan reglas para seleccionar primero la tarea y luego la categoría que la llevará a cabo, o viceversa. Se realizan tantas iteraciones como número de trabajadores.

En la segunda fase, se aplica un procedimiento de reasignación de tareas, en el que partiendo de los horarios asignados a los trabajadores se les asignan las tareas, en cada período de tiempo, con el objetivo de mejorar el valor final de la función objetivo. Esta fase parece imprescindible ya que en la primera fase de la heurística se toman decisiones de asignación de tareas a trabajadores mediante un procedimiento miope, lo que puede conducir a asignaciones finales mejorables. Cada iteración corresponde a un período en el que se consideran

únicamente los trabajadores presentes en ese período.

En la tercera y última fase, se realiza una optimización local de la siguiente manera: para cada uno de los trabajadores se intercambia el horario asignado en la primera fase por cada uno del resto de su lista de horarios posibles; a continuación, se reasignan las tareas para cada nuevo horario con el procedimiento utilizado en la fase 2; en el caso que el mejor de dichos horarios mejore el valor de la función objetivo se asigna al trabajador en cuestión. La fase finaliza cuando no se produce reasignación de un nuevo horario a ningún trabajador.

Una vez introducidas las fases del procedimiento heurístico, la organización del documento restante es la siguiente: en la sección 2, se describe la formalización de las tres fases de la heurística; en la sección 3 se expone la experiencia computacional realizada; en la sección 4 se exponen unas breves conclusiones; y, finalmente, los agradecimientos y los trabajos referenciados.

## 2. Formalización de la heurística

La estructura general del procedimiento heurístico es la siguiente:

<i>1º Lectura e Inicialización</i>	- Lectura de datos e inicialización de variables.
<i>2º Fase 1. Hacer W veces {</i>	- En cada una de las W iteraciones (con $W=n^{\circ}$ de trabajadores) se asigna un horario a un trabajador.
<i>Si (Primero Tarea) {</i>	- Primera variante principal de la heurística.
<i>Seleccionar_Tarea</i>	- Selección de la tarea a cubrir.
<i>Seleccionar_Categoría</i>	- Selección de la categoría (de entre las que puedan hacerla) que realizará la tarea .
<i>} sino {</i>	- Segunda variante de la heurística.
<i>Seleccionar_Categoría</i>	- Selección de la categoría.
<i>Seleccionar_Tarea</i>	- Selección de la tarea que realizará la categoría, entre las que puede hacerla.
<i>}</i>	
<i>Encontrar_Horarios</i>	- Obtención del conjunto de horarios (CH) a probar: horarios permitidos para los trabajadores sin asignar de la categoría elegida.
<i>Para cada horario de CH</i>	
<i>hacer {</i>	
<i>Trabajador_sobrante</i>	- Selección de una nueva tarea a realizar por un trabajador si, en un período concreto, ya se alcanza la capacidad deseada de la tarea a cubrir.
<i>Evaluar_horario</i>	- Evaluar la asignación del horario a un operario de la categoría elegida realizando la tarea a cubrir o, si está cubierta, la determinada en <i>Trabajador_sobrante</i> .
<i>Guardar_horario</i>	- Guardar el valor del mejor horario.
<i>}</i>	
<i>Seleccionar_Trabajador</i>	- Selección del trabajador de la categoría elegida que realizará el horario seleccionado.
<i>Actualizar_Datos</i>	
<i>}</i>	

```
3° Fase 2. Para cada período del
horizonte T hacer {
    Reasignar_Tareas
}
4° Fase 3. Optimización Local
5 ° Fin_del_procedimiento
```

- Cada iteración corresponde a un período.
- Se reasignan las tareas entre los trabajadores presentes en cada período.

## 2.1. Procedimiento *greedy*

Como se puede observar, la primera fase consta de dos variantes principales, según se selecciona primero la tarea o la categoría, y un conjunto de variantes secundarias determinadas por el orden de uso de las reglas para desempatar entre posibles tareas o categorías a asignar. En un estudio desarrollado por el equipo de investigación se proponen 38 variantes (véase Velasco, 2002); en las conclusiones de dicho estudio se destaca que ocho variantes son adecuadas para los tres tamaños de plantilla analizados (en ese caso, menor de 20, de 20 a 80 y más de 80 trabajadores), y, de éstas ocho, una de ellas es la que obtiene los mejores resultados de la función objetivo en todos los casos.

Ésta es la variante que ha sido seleccionada para realizar el experimento. A continuación se indican las reglas asociadas a dicha variante, para las diferentes acciones de la primera fase de la heurística:

- Seleccionar una tarea o una categoría en primer lugar. La variante escogida corresponde a la de seleccionar en primer lugar la tarea, utilizando las siguientes reglas para seleccionarla y para desempatar:

- 1°. Seleccionar la tarea con mayor cociente entre el valor de la función no lineal convexa asociada al déficit (definida en Ojeda *et al.*, 2003a y 2003b) de dicha tarea y el número de trabajadores que potencialmente puede realizar la tarea.
- 2°. En caso de empate, aquella tarea, entre las que empatan, con mayor valor de la función no lineal convexa asociada al déficit.
- 3°. En caso de empate, la tarea que puede ser realizada por el menor número de categorías.

- Una vez escogida la tarea, se selecciona la categoría siguiendo las siguientes reglas:

- 1°. Seleccionar la categoría que solamente puede cubrir la tarea elegida.
- 2°. En caso de empate, aquella categoría que presenta un mayor índice de prioridad para cubrir la tarea seleccionada.

- Para seleccionar la tarea que debe realizar el trabajador en el período en que la demanda de la tarea seleccionada inicialmente ya está cubierta, se siguen las siguientes reglas:

- 1°. Seleccionar la tarea con mayor cociente entre la función no lineal convexa asociada al déficit de dicha tarea en el período y el número de trabajadores que podrían realizar la tarea.

- 2°. En caso de empate, la tarea, entre las que empatan, con mayor valor de la función no lineal convexa asociada al déficit en el período.
- 3°. En caso de empate, la tarea que presenta un mayor índice de prioridad en función de la categoría del trabajador en cuestión.

## 2.2. Reasignación de tareas

El procedimiento utilizado en la primera fase que selecciona un horario para cada trabajador y le asigna una tarea en cada período, puede provocar situaciones indeseables, al tratarse de un procedimiento miope. Por ejemplo, en un intervalo de tiempo determinado un trabajador de una categoría “*i*” puede tener asignada una tarea para la que está más cualificado otro trabajador de la categoría “*j*” y éste, a su vez, puede tener asignada una tarea para la que está más cualificado el trabajador de la categoría “*i*”.

Se utiliza un procedimiento eficiente y rápido para resolver de forma exacta la asignación de las tareas a los trabajadores, planteándolo como un problema de flujo compatible a coste mínimo en un grafo con costes y capacidades mínimas y máximas conocidas (Corominas *et al.*, 2003) .

La reasignación de tareas se realiza en cada período de tiempo, con un horario ya asignado a cada trabajador, lo que implica que la función objetivo no lineal planteada tiene tres componentes en lugar de los cuatro indicados en la función original: los componentes asociados al déficit, al superávit y a la priorización de la asignación tareas y categorías.

La acción de reasignar las tareas a los trabajadores para conseguir una mejor asignación y, por lo tanto, una solución mejor que la que se obtiene de la aplicación de la primera fase del procedimiento heurístico, debe ser muy rápida, ya que los cálculos se deben realizar para todos los períodos.

## 2.3. Optimización Local

El procedimiento de optimización local consiste en generar soluciones vecinas y comprobar si mejoran la solución actual; en caso de que mejore se adopta esa nueva solución como solución en curso y así hasta que no se produce ninguna mejora. La manera de proceder es la siguiente: para cada trabajador se cambia el horario asignado por el resto de su lista de horarios admisibles; a continuación, se reasignan las tareas para este nuevo horario mediante el algoritmo presentado en el apartado [2.2]. Si cualquier otro de los horarios que se pueden asignar al trabajador mejora el valor de la función objetivo, se asume éste como su horario asignado. El procedimiento se esquematiza de la siguiente manera:

<i>Mientras se mejore {</i>	
<i>Hacer W veces {</i>	
<i>Número_Horarios</i>	- Para cada uno de los W trabajadores. - Cálculo del número de horarios (NH) que puede realizar el trabajador considerado.
<i>Hacer NH veces {</i>	
<i>Cambiar_Horario</i>	- Cambiar el horario al trabajador.
<i>Reasignación_</i> <i>de_tareas</i>	- Ejecutar el algoritmo de reasignación de tareas, y evaluar la solución.
<i>Evaluar_Resultado</i>	- Si la solución es mejor que la actual, se asigna ese horario y esas tareas.
<i>}</i>	
<i>}</i>	
<i>} Fin de la optimización local</i>	

### 3. Experiencia computacional

Se ha utilizado un ordenador personal con procesador Intel Pentium III a 866 MHz y 256 Mb de RAM. El procedimiento heurístico se ha desarrollado en MS-Visual C++ 6.0 y se ha utilizado la librería del sistema The ILOG-CPLEX Network Optimizer 8.1.

Los ejemplares corresponden a 18 combinaciones que surgen de los siguientes datos básicos:

*W*    Número de trabajadores: 25, 50 y 100.

*J*    Número de tareas: 2, 3 y 4.

*C*    Número de categorías: 2, 3 y 4.

Se considera la siguiente ponderación de los componentes de la función objetivo a minimizar:  $\{1, 0.001, 0.0001, 0.00001\}$ , para los términos asociados al déficit, al superávit, a la preferencia de los horarios y a la prioridad de la asignación *tarea-categoría*, respectivamente.

La Tabla 1 recoge el valor de la solución de cada una de las tres fases del procedimiento, así como los tiempos de cálculo de dichas fases (en segundos). En la columna correspondiente a la fase 3 de optimización local se indica con la palabra “mejora” los casos en los que se mejora ligeramente el valor obtenido de la función objetivo (con dos decimales, el resultado coincide con el de la fase 2). En todos los casos en los que se presenta mejora excepto en dos, dicha mejora se produce en el componente asociado a la preferencia de los horarios y, por lo tanto, su repercusión en la función objetivo se presenta en el cuarto decimal y no se aprecia en la tabla; la excepción corresponde a los casos  $\{W/J/C\} = \{100/2/2\}$  y  $\{100/2/4\}$ , donde la optimización local mejora todos los componentes de la función objetivo.

**Tabla 1.** Resultados del experimento con 18 ejemplares y las tres fases de la heurística.

<i>W</i>	<i>C</i>	<i>J</i>	Mejor solución			Tiempo (s)			Resultado del PLM
			Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 1	Fase 2	Fase 3	
25	2	2	640.883.244	10.136.576	mejora	71,68	0,26	1.071,56	39.996
25	2	3	230.740.570	50.146.077	mejora	100,30	0,27	398,53	40.018
25	2	4	1.183.116.378	864,52	mejora	122,49	0,08	1.388,14	93
25	3	3	140.722.982	140.721.743	mejora	69,97	0,09	1.382,90	50.465.238
25	3	4	471.106.278	31.106.266	no mejora	92,98	0,08	785,17	20.000.089
25	4	4	2.296.394.302	335.229.223	no mejora	52,94	0,09	815,50	181.237.945
50	2	2	1.462.380.791	861.768.694	mejora	642,50	0,08	2.481,09	51
50	2	3	1.245.393.079	64.704	mejora	857,44	0,09	2.689,26	56
50	2	4	9.876.935.102	50.000.182	mejora	1.130,76	0,30	1.986,48	37
50	3	3	59.624.947	10.810.661	mejora	562,29	0,31	3.314,66	369.808
50	3	4	310.303.761	50.359.893	no mejora	701,12	0,29	1.019,05	39.995
50	4	4	5.236.859.387	1.009.693.655	mejora	330,62	0,30	3.300,23	309.494.093
100	2	2	6.068.330.051	4.254.784.736	3.215.703.853	5.158,70	0,09	4.993,79	104
100	2	3	3.272.527.825	642.188	mejora	7.464,40	0,10	4.672,17	79
100	2	4	38.146.829.726	19.060	19.058	9.428,89	0,13	4.330,11	27
100	3	3	1.657.564	1.657.562	mejora	4.523,14	0,11	4.055,11	179.560
100	3	4	1.034.791.904	392.859.149	no mejora	5.928,66	0,12	2.110,59	13.355
100	4	4	24.766.148.197	64.289.792	mejora	2.355,33	0,10	4.016,09	723.049

La fase 2 de reasignación se realiza en un tiempo muy corto (véase tabla 1). Se propone mejorar la fase 1 del procedimiento heurístico como se expone a continuación, probarlo en los mismos ejemplares y analizar los resultados.

La mejora consiste en introducir la fase de reasignación de tareas de forma dinámica en la acción de la fase 1 que evalúa el horario de cada trabajador de la categoría elegida que realiza la tarea a cubrir. De esta manera, se propicia un correcto reparto de tareas en cada período de tiempo. Algunos de los resultados obtenidos para la fase 1 y 3 se presentan en la tabla 2.

Analizando todas las pruebas realizadas se puede concluir que en el 80% de las pruebas, los resultados mejoran los presentados en la tabla 1, aunque con un incremento de tiempo de cálculo importante.

**Tabla 2.** Resultados con la fase 1 mejorada.

<i>W</i>	<i>C</i>	<i>J</i>	Mejor solución		Tiempo (s)	
			Fase 1'	Fase 3	Fase 1'	Fase 3
25	2	2	10.040.016,05	mejora	1.118,989	1.095,50
25	3	3	200.159.906,87	no mejora	897,78	1.337,60
25	4	4	347.328.960,46	347.328.942,36	579,48	1488,72
50	2	2	72,90	no mejora	3.788,67	1113,07
50	3	3	61.114.505,73	mejora	4.100,34	3.185,68
50	4	4	310.108.717,14	no mejora	1.990,05	1537,311
100	3	3	2.544.534,82	mejora	14.463,43	4.102,48
100	4	4	41.703.189,82	mejora	6.632,70	3.972,16

#### 4. Conclusiones

Las conclusiones son las siguientes:

- Los resultados obtenidos son de muy mala calidad comparados con los obtenidos con el PLM.
- En las pruebas correspondientes al procedimiento heurístico básico, la fase 3 de optimización local no mejora apreciablemente los resultados obtenidos en las fases anteriores y consume un tiempo notable comparado con las fases 1 y 2. El tiempo de cálculo para 50 trabajadores en el conjunto de las fases 1 y 2 se sitúa en promedio en 900 segundos.
- En las pruebas realizadas con el procedimiento heurístico mejorado, los resultados obtenidos son de valor inferior pero siguen siendo de muy mala calidad comparados con los obtenidos con el PLM, con un incremento de tiempo de cálculo importante.

Se puede concluir que los resultados del procedimiento heurístico, incluso mejorado, son de peor calidad que los obtenidos con PLM, lo que confirma el procedimiento mediante programación matemático como el más adecuado.

## **Agradecimientos**

Trabajo derivado del proyecto DPI2001-2176 “Organización del tiempo de trabajo, con jornada anualizada, en la industria y en los servicios”.

Este trabajo se ha desarrollado con el soporte del Centre CIM ICT-UPC.

## **Referencias**

- Corominas, A., Ojeda, J., Pastor, R. (2003). *Multi-objective allocation of polyvalent workers with lower bounded capacity*. Documento técnico editado por el Instituto de Organización y control industrial de la Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Ojeda, J., Corominas, A., Pastor, R. (2003a). *Programación de horarios de trabajo de trabajadores polivalentes y asignación simultánea de tareas a las categorías*. V Congreso de Ingeniería de Organización, Valladolid, España.
- Ojeda, J., Corominas, A., Pastor, R. (2003b). *Programación de horarios de trabajo semanales de operarios polivalentes con presencia deseada no uniforme*. XXVII Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa, Lleida, España.
- Thompson, G.M. (1997). *Labor staffing and scheduling models for controlling service levels*. Naval Research Logistics, 44, 8, 719-740.
- Velasco, V. (2002). *Un método para la programación de horarios de trabajo semanal y preasignación de tareas del personal en un centro de servicios*. Proyecto Final de Carrera, ETSEIB, UPC. Barcelona.