



5.- Resultados

A continuación se analizan los resultados de la resolución de un problema relajado y se realizan algunas observaciones y comentarios respecto al presente proyecto.

Para poder evaluar el beneficio que reporta la aplicación del modelo de este proyecto, se necesita realizar una comparación en términos económicos con la situación anterior que se vive en Andalucía de Aeronáutica.

Para realizar una comparación directa se necesitaría resolver un de dimensiones más realistas, de unas 50 tareas. Se plantea, como posible proyecto, la resolución de este problema de dimensiones realistas.

En adelante se presentan los diferentes resultados aportados por el problema relajado.

5.1. Consideraciones.

Se consideran tres tareas para la resolución del problema relajado: la tarea 1 del programa A, la tarea 1 del programa B, y la tarea 3 del producto AA-I02 del programa I.

Se estiman los valores de los pesos de la función objetivo en $\alpha = 1$ y $\gamma = 200$. El valor del parámetro restante utilizado, la cota superior M es de $M = 10000$.

Para simplificar el tratamiento de las variables, se reasignan índices a cada tarea: la tarea 1 del programa 1, de índices $i=1$ y $j=1$, pasa a tener índice $i'=1$; la tarea 1 del programa 2, de índices $i=2$ y $j=1$, pasa a tener índice $i'=2$; la tarea 3 del programa 9.2, de índices $i=11$ y $j=3$, pasa a tener índice $i'=3$. De esta forma, las variables a las que se aplica el algoritmo de exploración dirigida se denominan $V_{1'2'}$ - $V_{2'1'}$, $V_{1'3'}$ - $V_{3'1'}$ Y $V_{2'3'}$ - $V_{3'2'}$.



5.2. Presentación de resultados

Se inicia la primera iteración con los valores nulos para las seis variables binarias. Es el caso más desfavorable, de mayor flujo de recursos necesarios.

Los resultados principales se muestran en la tabla 5.1 siguiente (se han omitido las soluciones incompatibles):

Variable en Matlab	Variable en el modelo	Prueba			
		1	2	3	4
X_1	S_1	150	150	150	150
X_2	S_2	0	0	0	0
X_3	S_3	240	240	240	240
X_4	V_{12}	0	0	0	0
X_5	V_{13}	0	0	0	1
X_6	V_{21}	0	1	1	1
X_7	V_{23}	0	0	1	0
X_8	V_{31}	0	0	0	0
X_9	V_{32}	0	0	0	0
X_{10}	f_1	2	0	0	0
X_{11}	f_2	3	3	6	3
X_{12}	f_3	2	2	0	0
X_{13}	h_1	2	3	3	1
X_{14}	h_2	3	0	0	0
X_{15}	h_3	2	2	3	2
X_{16}	F	7	5	6	3
Función objetivo		1790	1390	1590	990

Tabla 5.1. Principales resultados de la solución del problema relajado.



5.3. Interpretación de resultados.

Para apreciar la respuesta aportada por el modelado revisado, a continuación se estudia cada solución por separado.

Toda solución se acompaña de un grafo de la solución con la leyenda de colores siguiente: en verde aparecen todos los flujos del nodo fuente a los nodos o puestos de trabajo, en negro aparecen los flujos entre nodos y en rojo aparecen los flujos que parten de los nodos hacia el nodo sumidero.

Junto a la flecha que simboliza cada flujo se escribe, del mismo color, el flujo sobre cada arco del grafo.



5.3.1. Solución 1

En la figura 5.1. se muestra el grafo de la solución 1:

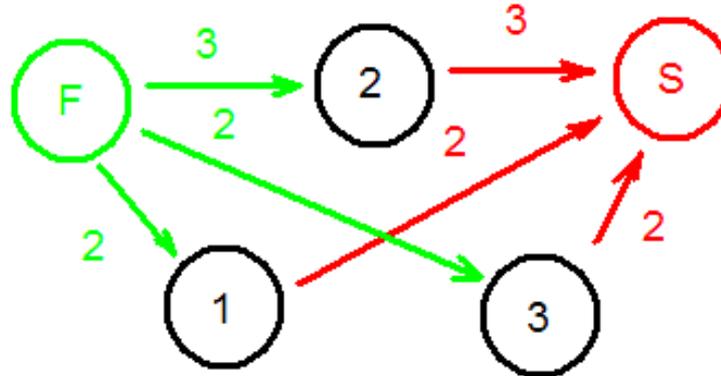


Figura 5.1. Grafo de la solución 1. Todas las tareas se inician en el primer momento posible según los datos de producción.

De color verde son los flujos del nodo fuente hacia los diferentes centros de trabajo. De color rojo se muestran los flujos de recursos desde los distintos nodos hacia el nodo sumidero “ficticio”. Se recuerda que el nodo 1 se corresponde con el programa A, el nodo 2 se corresponde con el programa B y el nodo 3 se corresponde con el programa I, con su producto AA-I02.

Se puede apreciar que la solución 1 es la situación actual que se vive en la empresa Andaluza de Aeronáutica. Su necesidad de recursos es la máxima de todas las soluciones: 7 unidades de recursos. Es el tope de recursos a emplear porque no hay flujo de recursos entre nodos diferentes. La bondad de las siguientes soluciones se comparará con esta primera solución.



5.3.2. Solución 2

En este apartado se presenta la siguiente solución del problema relajado.

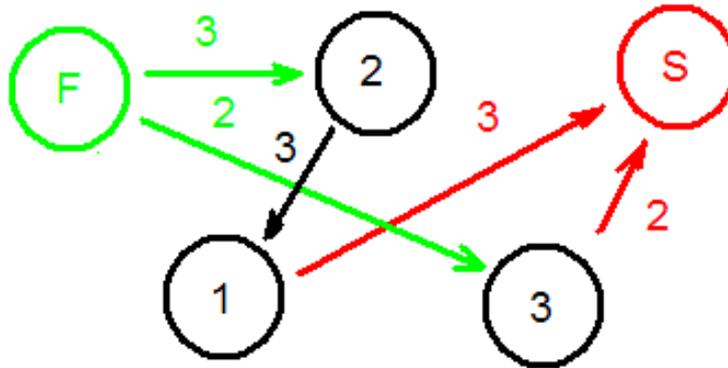


Figura 5.2. Grafo de la solución 2. Las tareas 2 y 3 se inician en el primer momento posible y la tarea 2 reenvía sus recursos a la tarea 1. Esto es posible porque la tarea 2 comienza a los 0 minutos (véase tabla 5.1), su duración es de 120 minutos (véase tabla 2.2) y por producción el comienzo de la tarea 1 no puede ser antes de los 150 minutos (véase tabla 5.1).

El flujo total de recursos es de 5 unidades. Comparando esta solución con la primera (correspondiente a la solución actual), se obtiene una reducción de recursos necesarios del 28%.

Comentar que el modelado da como solución que al nodo 1 se dirigen 3 recursos mientras que el número necesario de recursos es 2. Las características del modelado aseguran que la cantidad de recursos será siempre mayor o igual que la necesaria.

Se debe por tanto de realizar un post-procesado de toda solución del modelado. Es responsabilidad del ingeniero supervisor que interpretar correctamente la solución aportada por el modelado: en este caso, sólo se necesitan 2 recursos en el nodo 1 y el recurso restante termina su jornada laboral al terminar la actividad del nodo 2.

5.3.3. Solución 3

En este apartado se presenta la tercera solución al problema relajado.

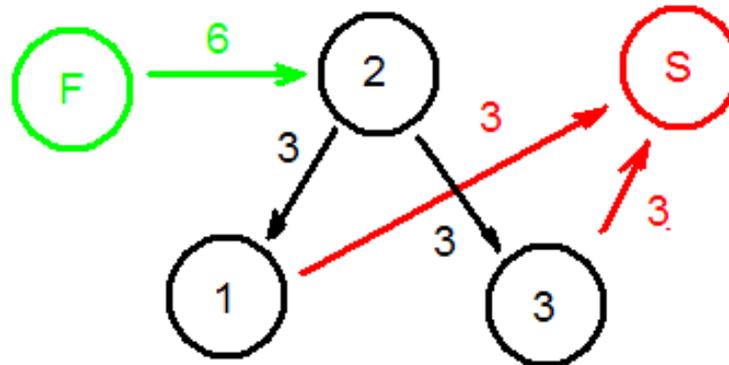


Figura 5.3. Grafo asociado a la solución 3. Nótese que la tarea 2 se inicia a los 0 minutos y tiene una duración teórica de 120 minutos (como se manifiesta en el apartado 5.3.2), siendo posible que a continuación se dirijan recursos a los demás nodos del grafo: según datos de producción (véase tabla 5.1), la tarea 1 y la tarea 3 no pueden comenzar antes de 150 y 240 minutos, respectivamente. Además, según la tabla 3.1 se necesitan 4 y 6 minutos para desplazarse desde el programa B al A e I respectivamente.

Como se puede observar en la figura 5.3, en este caso el flujo es de 6 recursos que inician su actividad en el nodo 2. Al término de su actividad en este nodo se dirigen, a partes iguales, a los nodos 1 y 3 a completar otra tarea antes del término de su jornada.

Esta tercera solución no es muy precisa porque dirige más recursos de los necesarios a los nodos 1 y 3 (3 en lugar de los 2 necesarios). Cumple con las restricciones (III) con holgura penalizando la bondad de la solución. El flujo total de recursos resulta de 6 unidades: un ahorro del 14'5 % respecto a la situación actual en Andalucía de Aeronáutica (solución 1).

Se observa también que el tiempo de finalización de las tareas se produce antes de la hora exigida para todas las tareas, como ocurre en todas las soluciones. La actividad 2 se inicia en el minuto cero y las actividades de los nodos 1 y 3 se inician a los 150 y 240 minutos del inicio de la jornada, respectivamente.



5.3.4. Solución 4

A continuación se presenta la 4ª y última solución obtenida mediante el procedimiento de *branch & bound*.

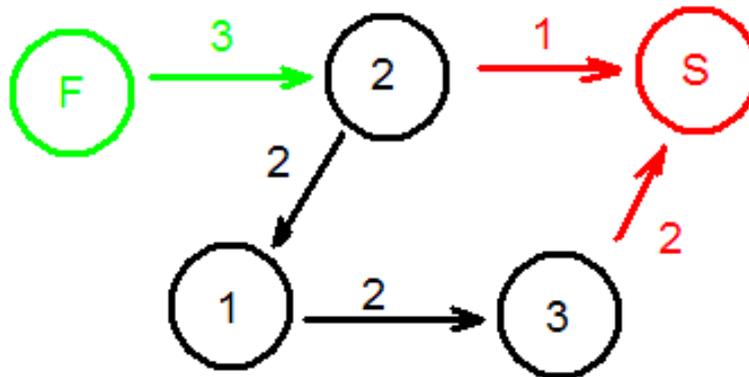


Figura 5.4. Grafo de la solución 4 del problema relajado. Al igual que en la solución 3, la actividad 2 se inicia a los 0 minutos pudiendo abastecer al resto de nodos. En este caso se envían recursos únicamente al nodo 1. La tarea de éste nodo comienza a los 150 minutos. Como su duración es de 45 minutos (véase la tabla 2.1) y sólo se necesitan 6 minutos más (ver tabla 3.1) para desplazarse del programa A al programa I, se pueden dirigir éstos recursos antes de los 250 minutos que fija producción para poder iniciar la tarea del tercer nodo.

En este caso, el flujo máximo de recursos se reduce hasta las 3 unidades de recursos. En comparación con la primera solución (que refleja la situación actual), se reducen los recursos necesarios en un 57%. Es la solución óptima al problema relajado planteado.

En primer lugar se dirigen 3 recursos al nodo 2 (procedentes del nodo fuente F) donde inician una tarea el minuto cero de la jornada laboral. Al término de esta tarea, 2 de los recursos se dirigen al nodo 1 a realizar otra tarea mientras que el recurso restante ha terminado su jornada (entra en el nodo sumidero S). Por último, los 2 recursos que han terminado la tarea del nodo 1, se dirigen al nodo 3 para realizar otra tarea y posteriormente terminar su jornada.



5.4. Características computacionales

En este apartado se muestra el comportamiento del modelo en aspectos computacionales de tiempo y capacidad.

En primer lugar, se muestran los datos con los que se ha realizado el estudio:

Dimensión del problema (nº de tareas)	Tiempo de resolución (s)
3	3.14
4	3.27
5	3.40
6	3.62
10	3.56
15	4.21
25	5.33

Tabla 5.2. Datos generados al cambiar las dimensiones del problema.

A continuación se presenta la gráfica dimensión/tiempo de resolución de la herramienta Solver[®] para el modelo matemático desarrollado:

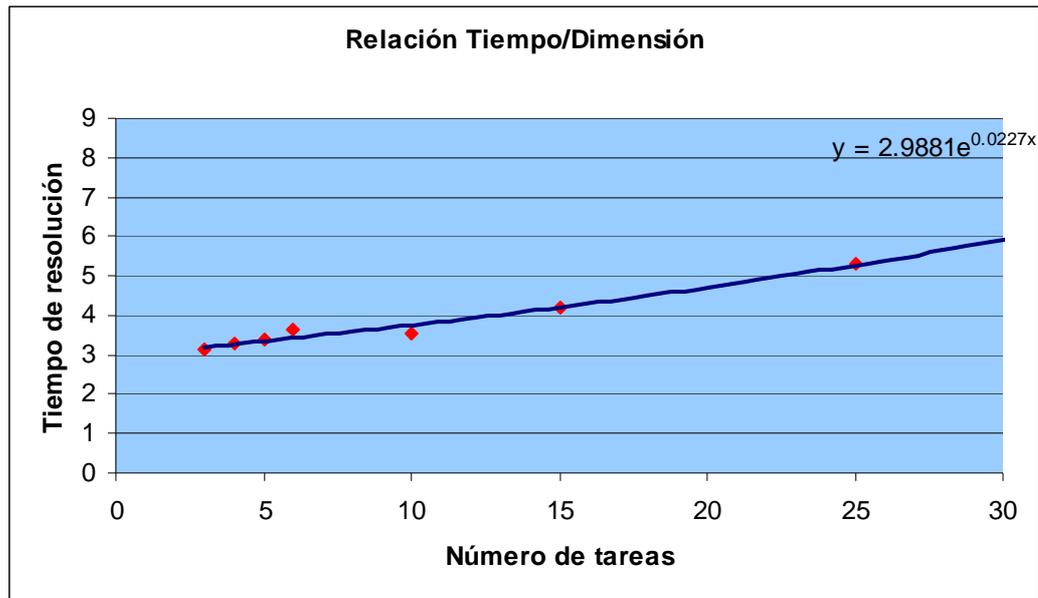


Figura 5.5. Gráfica dimensión tiempo de resolución del modelo matemático

Como se puede observar en la figura 5.5, la curva es convexa y a mayor dimensión del problema, mayor es el incremento del tiempo de resolución. La curva tiene una asíntota vertical donde se alcanza el límite físico del ordenador utilizado. Sin embargo, esta asíntota no se muestra porque depende del equipo empleado.

Obsérvese que el tiempo de resolución no depende única y exclusivamente de la dimensión del problema. Esto se puede comprobar en la tabla 5.1. Para un problema de una dimensión de 10 tareas el tiempo de ejecución del Solver[®] es de 3'56 segundos, mientras que para un problema de 6 tareas, el tiempo es superior, 3'62 segundos.

De este hecho se concluye que el tiempo de ejecución de la herramienta Solver[®] depende también de los valores de a_{ij} y d_{ij} . Estos datos son la hora límite de finalización de la tarea y hora mínima para el comienzo de la misma, respectivamente. Sus diferentes valores dan lugar a un rango diferente de combinaciones y por tanto, a un número diferente de iteraciones y de tiempo empleado.