



PROGRAMACIÓN
DE PROYECTOS

**PROGRAMACIÓN
DE RECURSOS**

J. Alcalá

*Departamento de Ingeniería de la Construcción
y de Proyectos de Ingeniería Civil*

Programación de Proyectos
PROGRAMACIÓN DE RECURSOS

©2025

Julián Alcalá González jualgon@upv.es



Departamento de Ingeniería de la Construcción
y de Proyectos de Ingeniería Civil
Ref.: 0023-0056-PRC-00661-0017
Documento elaborado en \LaTeX

Índice

1. Distribución de los recursos	3
2. Diagramas de carga	3
3. Métodos de nivelación	5
3.1. Fundamento del método	5
3.2. Algoritmo Burgess-Killebrew	6
3.3. Ejemplo	7
4. Asignación de recursos	11
4.1. Método de Wiest y Levy	11
4.2. Ejemplo	11
EJERCICIOS RESUELTOS	17
Referencias	29

(Página intencionadamente dejada en blanco)

1. Distribución de los recursos

Una de las aplicaciones más interesantes de la programación de proyectos es la de conocer la distribución temporal de las necesidades de los recursos que se precisan para llevar a cabo la obra. Como muchos de esos recursos serán necesarios en varias actividades, es fácil que se produzcan solapes que precisen aumentar su cantidad. Pero eso puede suponer que haya máquinas o personal parado en otros momentos en los que no hayan solapes, generando sobrecostos innecesarios.

La situación ideal es que los recursos que se consumen durante el desarrollo de las obras estén tan ajustados a las necesidades como sea posible en cada momento. Aunque debe procurarse que esto sea así durante toda la obra, es casi imposible conseguirlo, y un buen programa de trabajos será aquel en el que no hayan períodos de insuficiencia con el menor número de períodos de exceso de recursos. Esto se logra calendarizando las actividades de realización de alguna de las actividades programadas.

Los problemas surgidos por limitación de recursos pueden plantearse de formas muy diversas según la magnitud de esta limitación y el tipo de actividad sobre la cual influya. Cuando la falta de recursos afecta a actividades no críticas, un aumento de su duración o el desplazamiento de las fechas de inicio puede resolver el problema sin modificar las condiciones de abastecimiento. Pero si la limitación de recursos atañe a alguna actividad crítica, o la holgura de otra no crítica es insuficiente para resolver la carencia de recursos alargando su duración, el retraso del plazo de obra será inevitable a menos que se aumenten los recursos disponibles.

Y por el contrario, la existencia de medios sobrantes puede permitir una reducción del plazo de ejecución, si el excedente disponible hace posible que se acelere la ejecución de alguna actividad crítica. En tal caso los costes directos de esa actividad aumentarán de un modo sensiblemente proporcional al tiempo en que se reduzca su duración.

Simplificando mucho la casuística que puede darse en la realidad, hay dos tipos de problemas básicos asociados a la gestión de recursos durante una obra:

Problemas de nivelación en los que se establece como objetivo el mantener una demanda constante de recursos durante toda la obra que sea posible sin alterar el plazo total del proyecto.

Problemas de asignación en los cuales se pretende que los recursos necesarios no superen en ningún momento los disponibles, con la condición de que el retraso en el plazo total del proyecto sea mínimo.

Tanto en los casos de nivelación como en los de asignación de recursos se pueden formular matemáticamente problemas que se pueden resolver mediante algoritmos matemáticos, pues no son más que problemas de optimización. Ahora bien, si se pretende encontrar la solución óptima a estos problemas se necesita recurrir a planteamientos excesivamente complejos y costosos. Por esta razón, las técnicas de resolución que se usan en la práctica están basadas en *métodos heurísticos*, cuyo origen está en la *investigación operativa*. Se trata de métodos iterativos en los que cada iteración se decide en base a un proceso de toma de decisiones sistematizada, es decir, de acuerdo con unos criterios establecidos de antemano. Proporcionan resultados suficientemente próximos a la solución óptima, empleando un tiempo de proceso razonable, incluso para problemas complejos.

En los apartados que siguen se describen dos de los más conocidos para los dos tipos de problemas que se han citado, pero antes, veamos la forma de reflejar la demanda de recursos en un diagrama de Gantt.

2. Diagramas de carga

Los *diagramas de carga*, también llamados *histogramas de recursos*, representan gráficamente la demanda de recursos demandados a lo largo de una obra y también, en su caso, la cantidad de recursos disponibles, haciendo que sea muy sencillo detectar picos de demanda, o excesos sobre la disponibilidad. En esos casos los diagramas de carga facilitan la toma de decisiones para laminar picos de demanda de recursos, o para igualar la demanda de recursos a su disponibilidad, actuando sobre el program de trabajos de diferentes maneras:

- Modificando algunas fechas del programa sin tener que aumentar los medios disponibles ni el plazo de ejecución final, para reducir picos de demanda de algún recurso,

- alterando el programa de abastecimiento de recursos previsto inicialmente, procurando más proveedores, o reclamando más cantidad de recursos, o
- determinando el retraso mínimo del final del proyecto si los recursos disponibles lo hacen inevitable.

Veamos con un ejemplo como una recalendarización de actividades puede reducir picos de demanda en un proyecto y mantener la demanda por debajo de la disponibilidad: supongamos una obra con las actividades, duraciones, precedencias y necesidad de trabajadores dadas por la tabla 1.

Actividad	duración (semanas)	precedente	trabajadores
A	5	–	20
B	7	–	20
C	8	–	20
D	11	–	10
E	3	A	10
F	4	B	0
G	8	E, F	0
H	6	C, G	20

Tabla 1: Datos del proyecto.

Supongamos que la disponibilidad de personal es la siguiente:

- 40 trabajadores durante las 5 primeras semanas.
- 20 trabajadores durante las 9 semanas siguientes.
- 30 trabajadores durante las restantes.

El primer paso es elaborar el diagrama de Gantt, como se muestra en la figura 1, incluyendo el diagrama de carga con los recursos demandados y los disponibles. Como las actividades se han programado para las fechas más tempranas las cargas de recursos se concentran en las primeras fechas y no siempre es posible disponer de los medios necesarios.

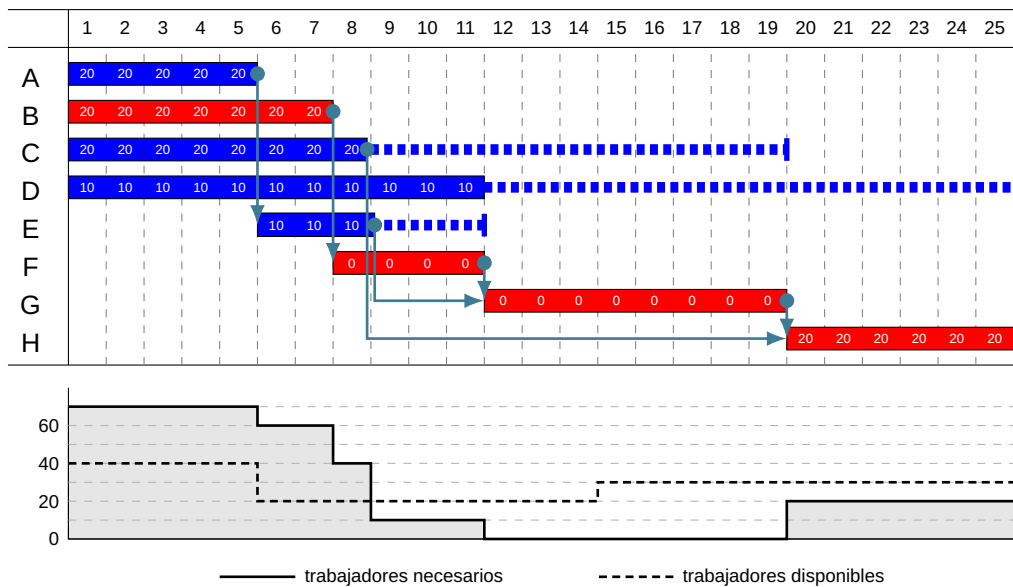


Figura 1: Diagrama de Gantt con el diagrama de carga.

Observamos que en las primeras 8 semanas los recursos necesarios superarían claramente los disponibles. Bastaría desplazar las actividades C, D y E hasta sus fechas de ejecución más tardías, para garantizar la capacidad suficiente. El nuevo diagrama de cargas representado en la figura 2 muestra como en todo momento las necesidades quedan cubiertas.

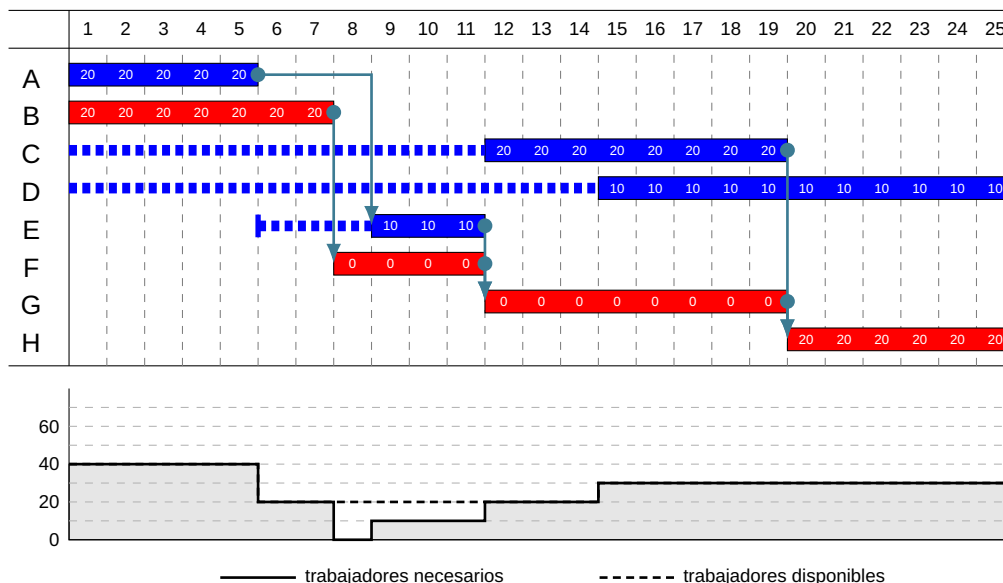


Figura 2: Diagrama de carga laminado.

Con esta nueva programación la actividad D se haría crítica, pues cualquier adelanto genera exceso de demanda de recursos. En la actividad A sus tres semanas de holgura total quedarían reducidas a dos por la misma razón. La actividad E podría iniciarse una semana antes de lo señalado en el diagrama y en ese caso también la actividad C podría adelantar su inicio en el mismo tiempo.

En el caso de que el recurso sea la mano de obra, si hay que contratar trabajadores y despedirlos hay costes adicionales que penalizan la programación de la obra. Salvo que se trate de trabajadores que puedan recolocarse en otras obras interesa siempre que el programa permita una demanda constante, es decir, que en el diagrama de carga la demanda de mano de obra sea una línea horizontal (laminación de la demanda). Pero en el caso de que sean trabajadores que se puedan utilizar en otras obras se hará necesario una programación conjunta de ambas obras, lo que añade complejidad al análisis. Algo parecido sucede con la maquinaria, porque las paradas afectan a su coste horario.

3. Métodos de nivelación

3.1. Fundamento del método

El objetivo común en los métodos de nivelación es sustituir un diagrama de carga inicial de un recurso dado por otro que tenga igual superficie (igual demanda) pero una distribución lo más aproximada posible a la óptima, entendiendo que es óptima la asignación contante, es decir, la representada por la línea horizontal en el diagrama de cargas (fig. 3), independientemente de los recursos disponibles.

El fundamento matemático de estos métodos denominados de mínimos cuadrados o del momento mínimo lo expresa el postulado de Boss¹:

«La eficacia de la forma de asignación de un determinado recurso respecto a una asignación ideal, varía en sentido inverso a la suma de los cuadrados de las diferencias entre las cargas de dicha asignación (R_i) y las de la asignación ideal (R_m), extendiendo esta suma a todas las etapas del plazo total».

Es decir, siendo R_m el valor medio de las cargas, la expresión $\sum (R_i - R_m)^2$ ha de hacerse mínima. Recordemos que los mínimos cuadrados, que se emplean en los ajustes de regresiones, por ejemplo, tiene dos

¹BOSS. , J. F. (1966) *Prise en consideration des contraintes pesant sur la disponibilité des moyens dans les methodes de chemin critique*. Revue Francaise de Recherche Operationnelle, 38.

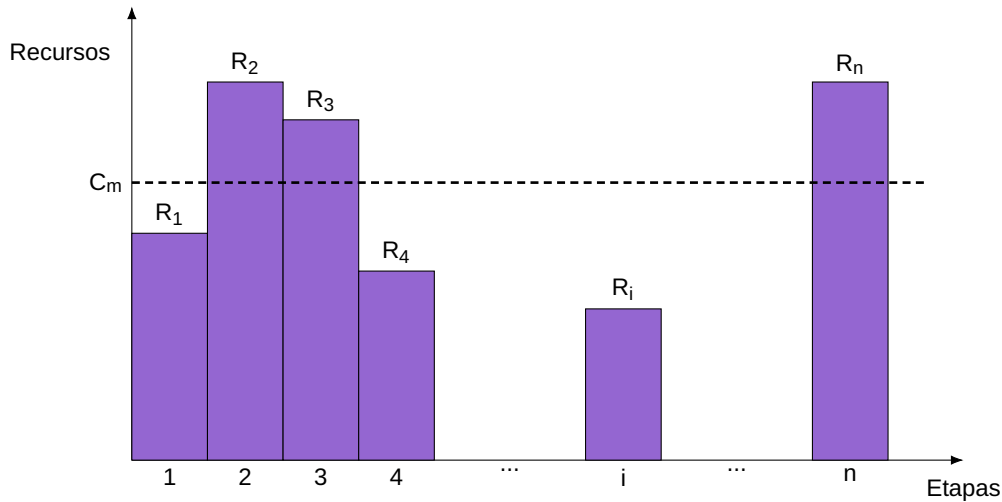


Figura 3: Diagrama de carga descompensado.

ventajas: en primer lugar la diferencia con el recurso medio siempre se agrega entre etapas, porque el cuadrado siempre es positivo, y en segundo lugar, el elevar al cuadrado exagera las diferencias importantes, y atenúa las diferencias pequeñas.

Siendo así, minimizar $\sum (R_i - R_m)^2$ equivale a hacer mínimo $\sum R_i^2$, puesto que:

$$\min \sum (R_i - R_m)^2 = \min \sum R_i^2 + \min \sum R_m^2 - 2R_m \min \sum R_i \tag{1}$$

pero como la suma de los recursos totales $\sum R_i = nR_m$ es una constante, resulta:

$$\sum R_m^2 = \text{Cte}; \sum R_i = \text{Cte} \tag{2}$$

Con lo que:

$$\min \left[\sum (R_i - R_m)^2 \right] = \min \left[\sum R_i^2 \right] \tag{3}$$

Por tanto, para laminar la asignación de recursos de un proyecto hay que resolver un problema de optimización. Para poder hacerlo de un modo sistemático se han desarrollado muchos algoritmos del tipo de las metaheurísticas que son capaces de alcanzar buenas soluciones, aunque puede que no sean las óptimas, pero lo hacen en un tiempo razonable. A continuación se verá uno de ellos.

3.2. Algoritmo Burgess-Killebrew

Uno de los primeros métodos para la laminación de recursos es el propuesto por *Burgess-Killebrew*², que además es probablemente el más difundido y eficiente. Su aplicación se lleva a cabo siguiendo los pasos que se indican a continuación:

1. Calcular el cronograma inicial sin restricciones de recursos:
 - Obtener fechas de inicio tempranas (E_i) y tardías (L_i) de cada actividad i .
 - Calcular holguras.
2. Mientras existan periodos con sobreasignación de recursos:
 - a) Identificar el periodo t con exceso de demanda.

²BURGESS, A. R.; KILLEBREW., J. B. (1962) *Variation in Activity Level on a cyclic Arrow Diagram*, Journal of Industrial Engineering, 13(2).

- b) Listar todas las tareas activas en t.
- c) Seleccionar una tarea candidata a retrasar usando reglas de prioridad:
- Regla 1: tarea con mayor holgura disponible.
 - Regla 2: si empate, elegir la de menor número de sucesores.
 - Regla 3: si empate, elegir la de menor duración..
- d) Retrasar la tarea seleccionada 1 unidad de tiempo (siempre que no viole su fecha tardía).
- e) Actualizar el cronograma:
- Recalcular fechas de inicio/fin afectadas.
 - Recalcular holguras.
3. Repetir hasta que no haya sobreasignaciones o ya no se pueda retrasar ninguna tarea sin extender la duración del proyecto.

3.3. Ejemplo

Veamos la aplicación de este método iterativo sobre las actividades del proyecto cuyos datos se muestran en la tabla 2.

Actividad	duración (semanas)	precedente	trabajadores
A	3	–	10
B	2	–	5
C	4	A	5
D	2	C	5
E	7	B	5
F	1	D	10
G	7	–	5
H	2	E, F, G	5
I	2	D	10

Tabla 2: Datos del proyecto del ejemplo.

Los pasos a seguir son:

Programa inicial Se empieza considerando la programación más temprana cuyo diagrama de Gantt se representa en la figura 4.

Paso 1 Se identifica la primera semana del programa en la que haya exceso de demanda de recursos, que resulta ser la semana 1. Las actividades en esas tres semanas son las A, B y G. De acuerdo con la «Regla 1», debe desplazarse la actividad que tenga mayor holgura. La holgura mayor la tiene la actividad G, que tiene tres semanas de holgura, mientras que la A es crítica (sin holgura) y la B tiene solamente una semana. Se retrasa la actividad G en una semana, calculando la suma de cuadrados de recursos asignados como se muestra en la figura 5.

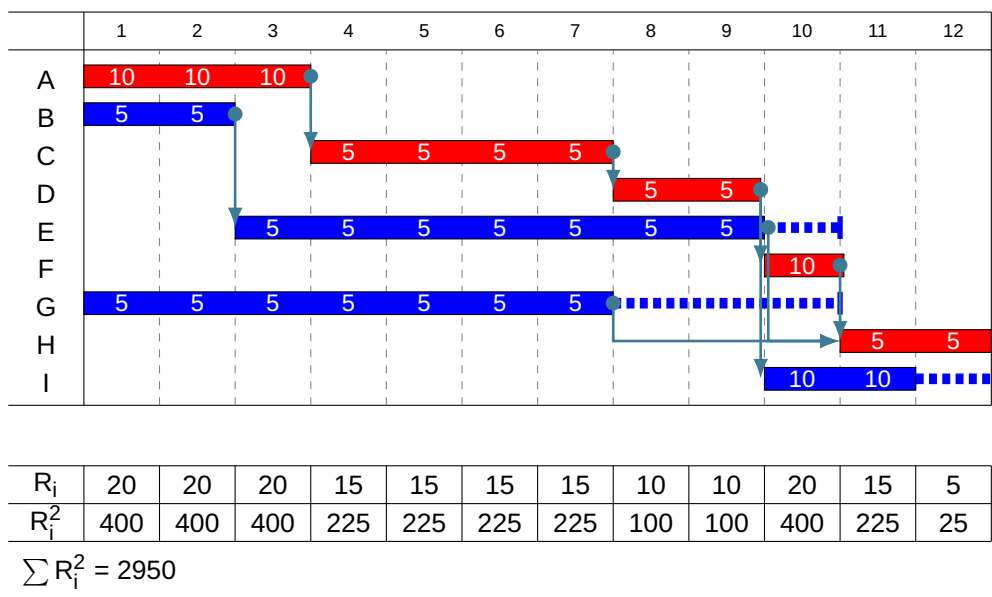


Figura 4: Programación inicial.

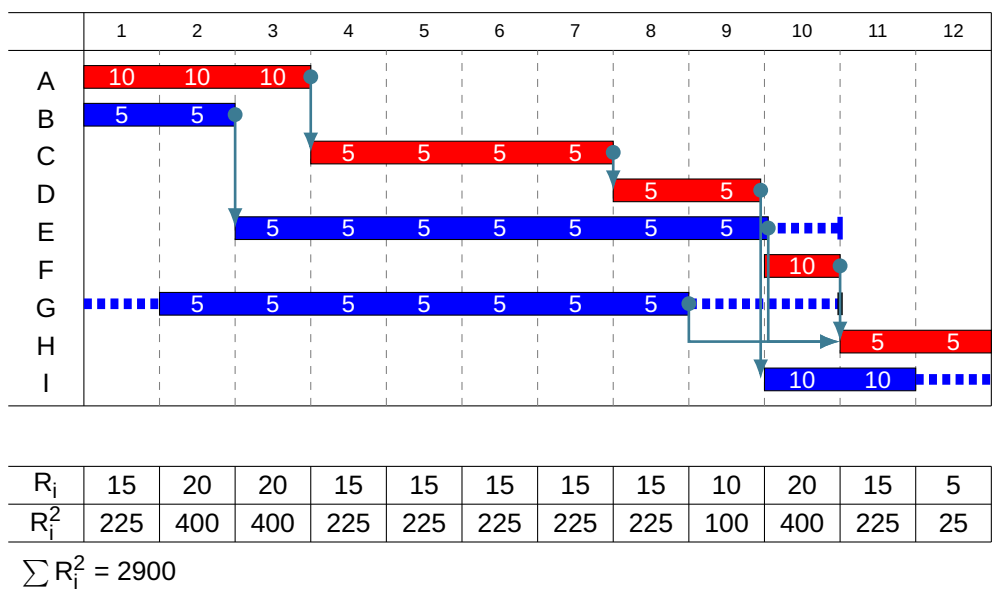
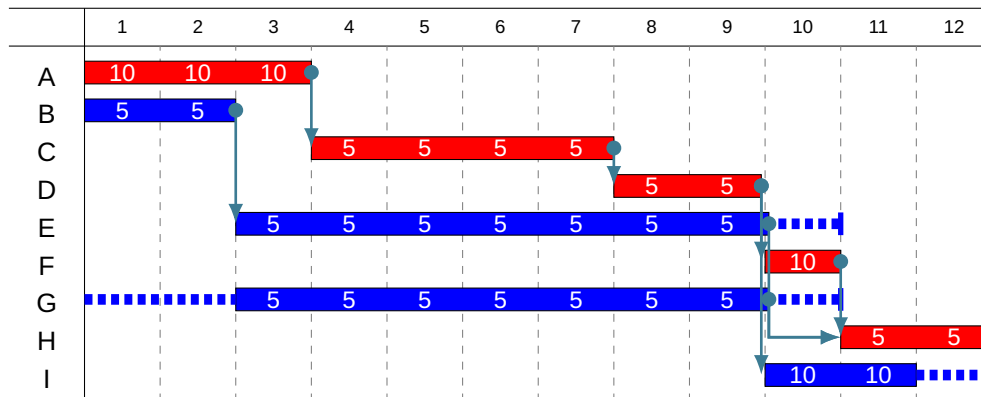


Figura 5: Programa tras el paso 1.

Paso 2 La primera semana con exceso de demanda es ahora la semana 2. Por las mismas razones que en el paso anterior, se retrasa la actividad G una semana más. El programa sería ahora el de la figura 6.

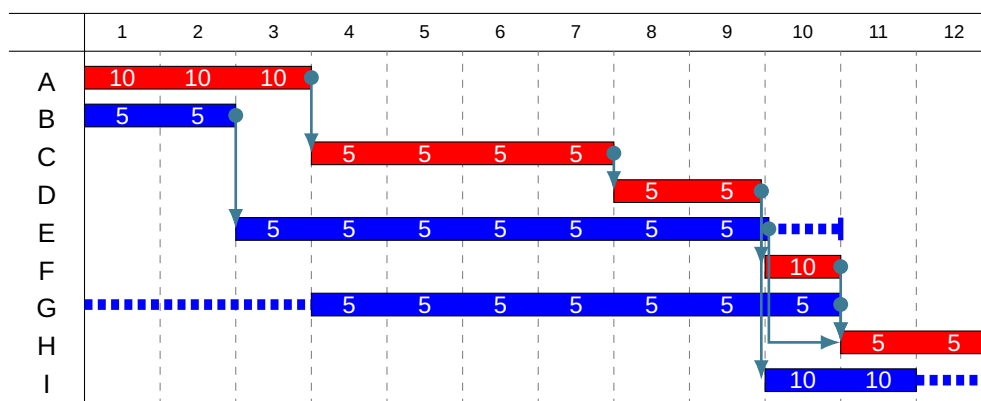


R_i	15	15	20	15	15	15	15	15	15	20	15	5
R_i^2	225	225	400	225	225	225	225	225	225	400	225	25

$$\sum R_i^2 = 2850$$

Figura 6: Programa tras el paso 2.

Paso 3 Ahora la primera semana con exceso de demanda es la 3, en la que intervienen las actividades A, E y G. De acuerdo con la «Regla 1» Debe desplazarse la actividad que tenga mayor holgura, pero aparte de la actividad A que es crítica, las otras dos actividades tienen la misma holgura, porque G ya ha consumido dos semanas las tres que tenía de holgura inicial. En este caso se aplica la «Regla 2», eligiendo la actividad que tenga menos sucesores, lo cual sucede de nuevo con la actividad G, que no tiene precedencias con ninguna actividad, mientras que la actividad E la tiene con B. Desplazando la actividad G queda el programa de la figura 7.

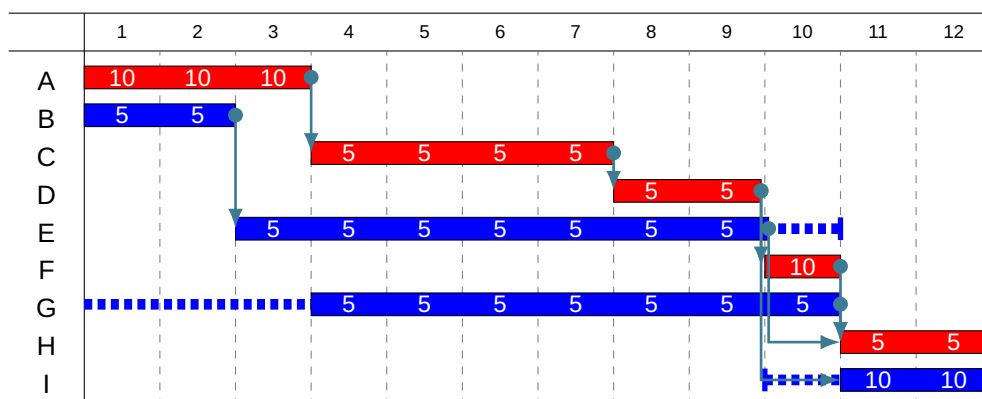


R_i	15	15	15	15	15	15	15	15	15	25	15	5
R_i^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	625	225	25

$$\sum R_i^2 = 2900$$

Figura 7: Programación tras el paso 3.

Paso 4 Ahora el primer exceso de demanda de recursos se produce en la semana 10. En esa semana intervienen las actividades F (que es crítica), la G y la I. Como la G ya no tiene holgura, aplicando la «Regla 1» la actividad a desplazar es la I. El programa queda como se muestra en la figura 8.



R_i	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
R_i^2	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225

$$\sum R_i^2 = 2700$$

Figura 8: Programación tras el paso 4.

En este paso ya se ha laminado completamente la demanda de recursos, por lo que se ha encontrado una solución óptima.

4. Asignación de recursos

4.1. Método de Wiest y Levy

La asignación de recursos pretende encontrar el programa de trabajos que consiga ejecutar la obra con el menor plazo posible pero adaptando la demanda de recursos a los disponibles.

Para la asignación de recursos también existen diversos métodos heurísticos basados en un conjunto de reglas que conducen progresivamente hacia una solución sub-óptima aceptable. Muchos de ellos pueden implementarse en programas informáticos, y todos ellos se basan en reglas heurísticas, en las que se siguen pasos de manera iterativa hasta mejorar la solución tanto como se pueda.

Uno de los más sencillos y más eficaces es el propuesto por *Wiest y Levy*³. Consiste básicamente en:

1. Calcular cronograma CPM sin restricciones de recursos:
 - Fechas de inicio (E_i) y fin (E_f) más tempranas de cada actividad i .
 - Fechas de inicio (L_i) y fin (L_f) más tardías de cada actividad i .
 - Holgura total de las no críticas.
2. Comenzar un proceso iterativo por etapas. Para cada etapa:
 - a) Se elabora una lista de actividades ordenadas con estos criterios:
 - Regla 1: Menor L_j (fecha de fin tardía más próxima).
 - Regla 2: Si empate: menor holgura.
 - Regla 3: Si empate: mayor número de sucesores.
 - b) Asignar recursos a las actividades según el orden anterior. Si en algún momento el consumo de recursos excede a la disponibilidad, el resto de actividades se retrasan la etapa siguiente.
 - c) Avanzar a la siguiente etapa.
 - d) Al completar alguna actividad liberar los recursos consumidos por la actividad
3. Termina el proceso cuando todas las actividades puedan ejecutarse con los recursos disponibles.

Nótese que a diferencia del método anterior empleado para la nivelación de recursos, ahora las Reglas 1, 2 y 3 no determinan la actividad que se desplaza, sino la actividad a la que se asignan recursos en primer lugar, y por tanto la que preferiblemente NO se desplaza.

Los criterios que utiliza el método para priorizar las actividades a las que asignar los recursos pretenden que no se tengan que retrasar actividades críticas o casi críticas. Una actividad con L_i cercano tiene poco margen, por lo que si se pospone se puede alargar el proyecto entero. El criterio de priorizar actividades con menor holgura pretende no consumir holgura de más. Si una actividad tiene mucha holgura, puede desplazarse más sin afectar el plazo global. En cambio, las de baja holgura están más expuestas a generar retrasos.

Finalmente, si se retrasa una actividad con muchos sucesores se provoca un efecto en cadena: su retraso puede retrasar varias ramas del proyecto. Priorizarlas reduce la posibilidad de cuellos de botella más adelante.

Es importante señalar que el método no contempla el fraccionamiento de actividades, lo cual en muchos casos podría mejorar los resultados proporcionando un plazo más corto y una nivelación mayor.

4.2. Ejemplo

Veamos sobre un ejemplo el planteamiento expuesto. Consideremos el programa de la figura 9.

Supongamos que para la ejecución de la obra del ejemplo anterior sólo se dispone invariablemente de 2 excavadoras. Asimismo, supongamos que todas las actividades necesitan una excavadora, salvo la A, que necesita 2.

³WIEST, J. D.; LEVY, F. K. (1969) A management guide to PERT/CPM. Ed. Prentice-Hall. Englewood Cliffs NJ

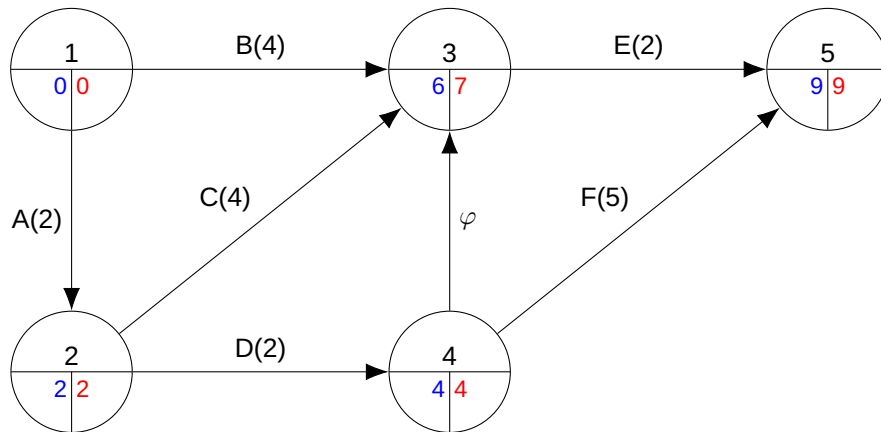


Figura 9: Programación de un proyecto.

Lo que se busca es determinar una programación del proyecto que permita ejecutar la obra en el mínimo plazo posible con las 2 excavadoras disponibles.

El proceso es el siguiente de acuerdo con el algoritmo de Wiest y Levy:

Paso inicial Se parte de la programación más temprana. El diagrama de Gantt y el de cargas sería el dado en la figura 10

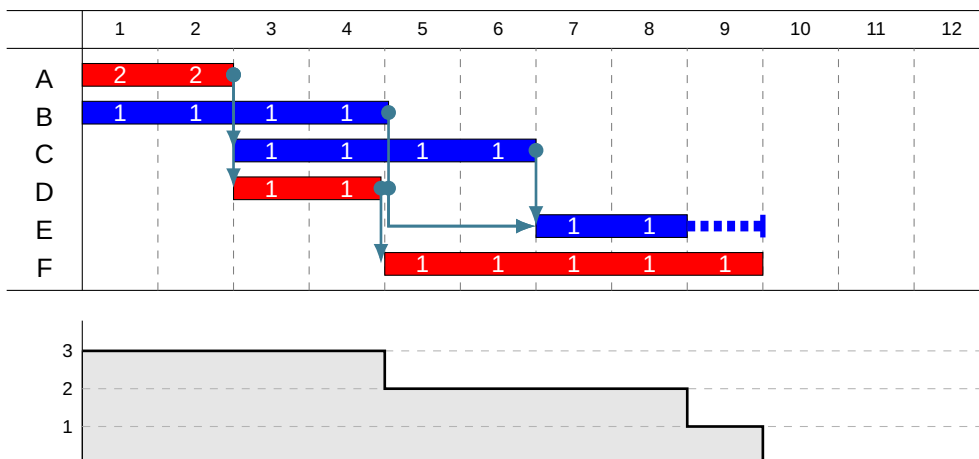


Figura 10: Programa inicial.

Paso 1 Se comienza un proceso iterativo etapa a etapa del programa. En la etapa 1 las actividades involucradas son la A y la B. De acuerdo con la «Regla 1» las actividades ordenadas serían A primero, y B después, porque la A tiene un final más temprano.

Se asignan las excavadoras por orden primero a la A y después a la B. Al haber disponibles solo dos excavadoras, y la actividad A las consume, la actividad B hay que retrasarla una etapa. Se tiene entonces el programa de la figura 11.

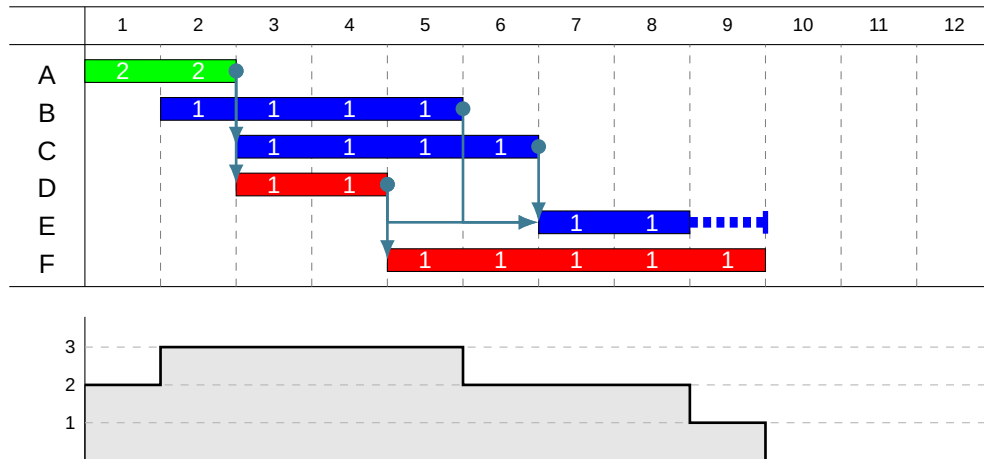


Figura 11: Programa tras el paso 1.

Paso 2 En la etapa 2 las actividades involucradas siguen siendo la A y la B, y de nuevo, la actividad B debe retrasarse, porque la actividad A ya tiene las excavadoras asignadas, y una vez asignado un recurso a una actividad, ya no se pueden retirar de esa actividad hasta que no termina.

Como la actividad B tiene holgura todavía, no se afecta a la duración del proyecto de momento. El programa quedará como se muestra en la figura 12.

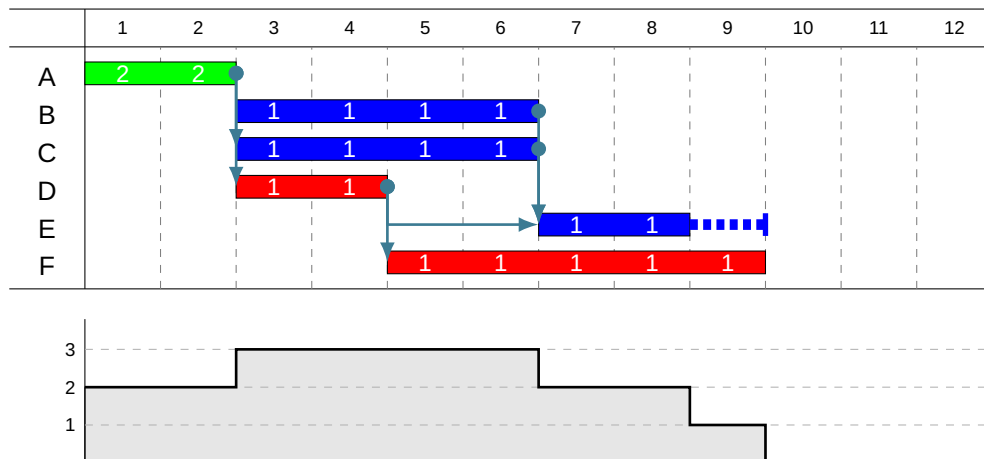


Figura 12: Programa tras el paso 2.

Paso 3 En la etapa 3 la actividad A ya ha terminado, y se tienen las dos excavadoras libres para asignar. Las actividades involucradas son la B, la C y la D. Aplicando la «Regla 1», la actividad prioritaria para asignar recursos es la D, porque tiene el final más temprano. Las actividades B y C empatan con este criterio pero la «Regla 2» (menor holgura) deshace el empate, porque la actividad B tenía tres etapas de holgura total, mientras que C solo tiene una etapa. Por tanto el orden es D–B–C. Como hay dos excavadoras, la actividad D y la B las consumen, y hay que desplazar la actividad C. Al retrasar la actividad C ésta se hace crítica. Además, hay que retrasar la actividad E –que también se hace crítica–, porque tiene a aquella como predecesora. El programa quedará como se muestra en la figura 13.

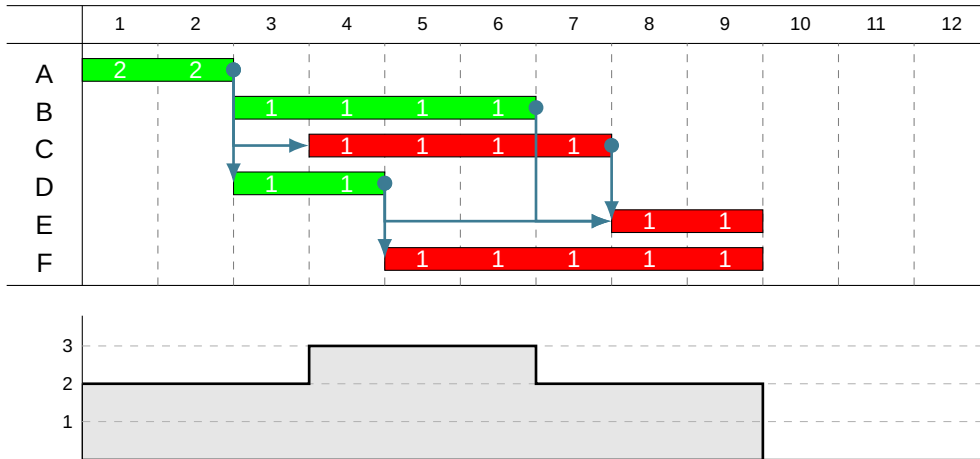


Figura 13: Programa tras el paso 3.

Paso 4 En la etapa 4 las actividades implicadas siguen siendo la B, la C y la D. Como las actividades B y D tienen las excavadoras asignadas, la actividad C se queda sin recursos disponibles de nuevo, y por tanto, hay que retrasarla una etapa. Por supuesto, se afecta de nuevo a la actividad E. El programa quedará como se muestra en la figura 14. En este paso la duración del proyecto ha aumentado en una etapa, y las actividades D y F dejan de ser críticas y adquieren holguras.

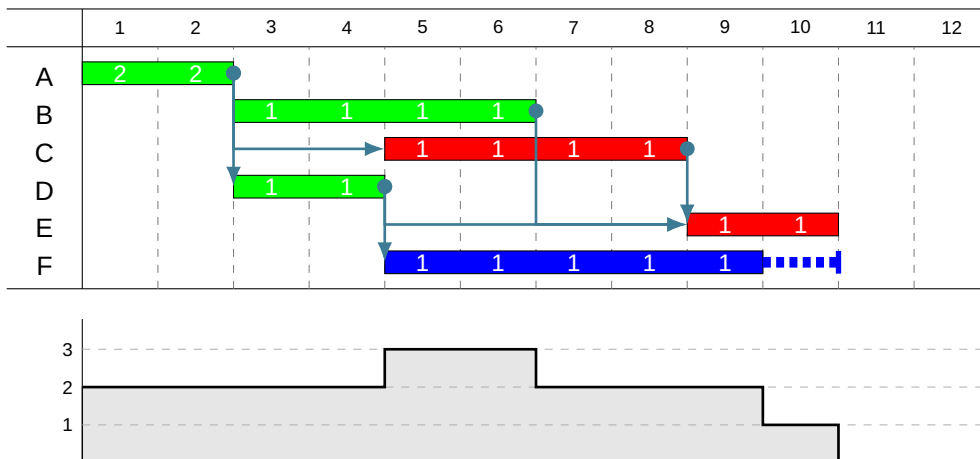


Figura 14: Programa tras el paso 4.

Paso 5 En la etapa 5 las actividades implicadas son la B, la C y la F. La actividad D ya ha terminado, y libera una excavadora, pero la B la conserva porque al tenía asignada de pasos anteriores. Entre la C y la F la «Regla 1» hace que tenga prioridad la actividad F, por tener el final más tardío, por lo que hay que retrasar de nuevo la actividad C, con un nuevo retraso en la fecha de finalización del proyecto, y un incremento de holguras en las actividades no críticas. El programa quedará como se muestra en la figura 15.

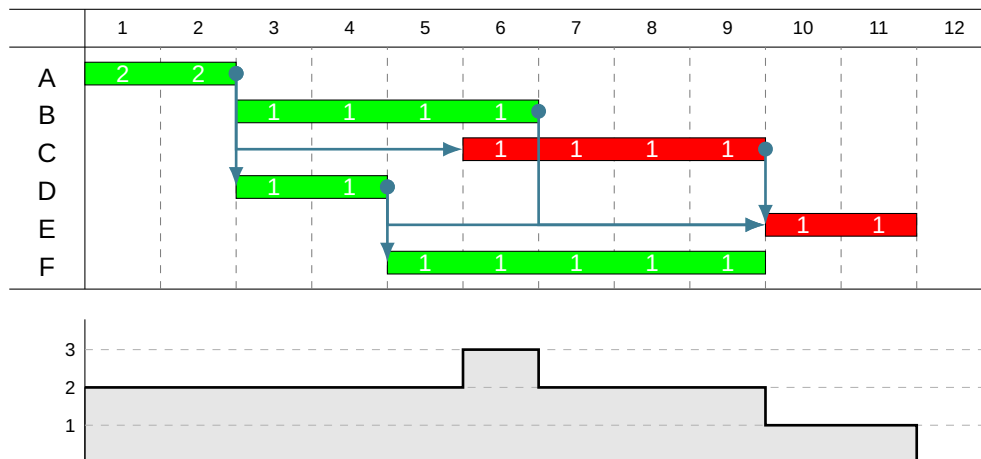


Figura 15: Programa tras el paso 5.

Paso 6 En la etapa 6 las actividades implicadas siguen siendo la B, la C y la F. Como no hay excavadoras libres (están asignadas a las actividades B y F), la actividad C debe retrasarse de nuevo. El programa quedará como se muestra en la figura 16.

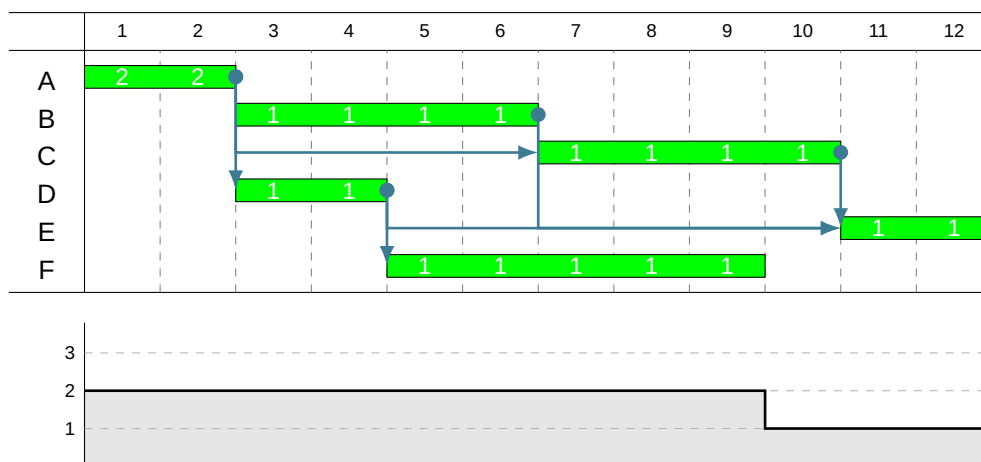


Figura 16: Programa tras el paso 6.

No es necesario continuar el proceso porque ya se ha alcanzado una solución que tiene las dos excavadoras asignadas sin que haya ningún momento con exceso de demanda. Esta solución cumple esa condición, y en este caso no parece que pueda mejorarse. Es cierto que las actividades D y F podrían retrasarse (tienen holgura de 3 etapas), pero se producirían semanas intermedias con menos demanda de recursos que los disponibles, dejando una de las excavadoras parada, como se muestra en la figura 17. Con el programa anterior una excavadora deja de ser necesaria en la etapa 10, y puede devolverse si es un equipo alquilado, o puede llevarse a otra obra si es de la empresa.

Por casos como éste las empresas constructoras que tienen parques de maquinaria y/o trabajadores propios suelen hacer programas de trabajos simultáneos a varias obras, donde consideran las necesidades de equipos. De este modo pueden optimizar el empleo de sus recursos reduciendo sobrecostes por demandas excesivas o excesivamente bajas.

La programación de obras alcanza así un nuevo escalón de dificultad, que solo puede abordarse con software específico para ello.

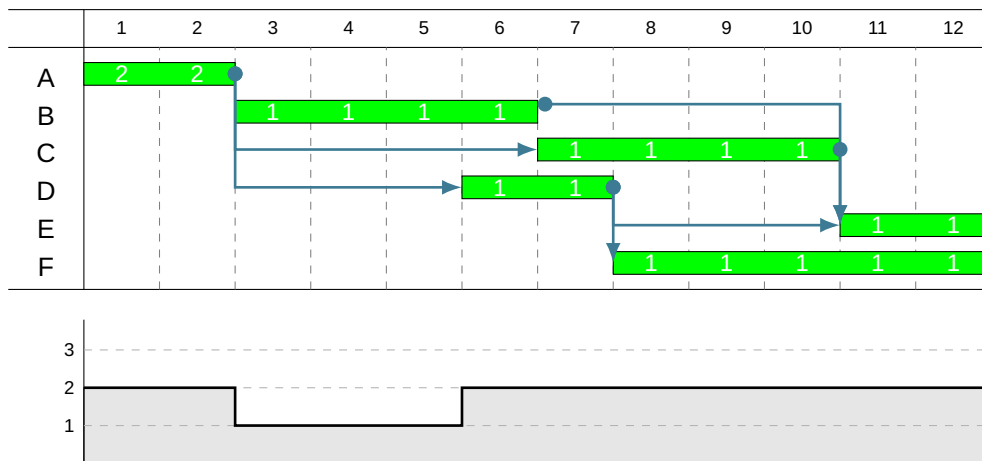


Figura 17: Solución alternativa.

EJERCICIOS RESUELTOS

Ejercicio 1

Una obra, cuyo programa de trabajos viene dado por el diagrama de precedencias que se adjunta en la figura 18, requiere del uso de camiones en casi todas sus actividades. La cantidad de camiones que se necesitan viene dada por la tabla que sigue.

Actividad	nº de camiones
A	4
B	1
C	1
D	4
E	2
F	1
G	1
H	3
I	3
J	1

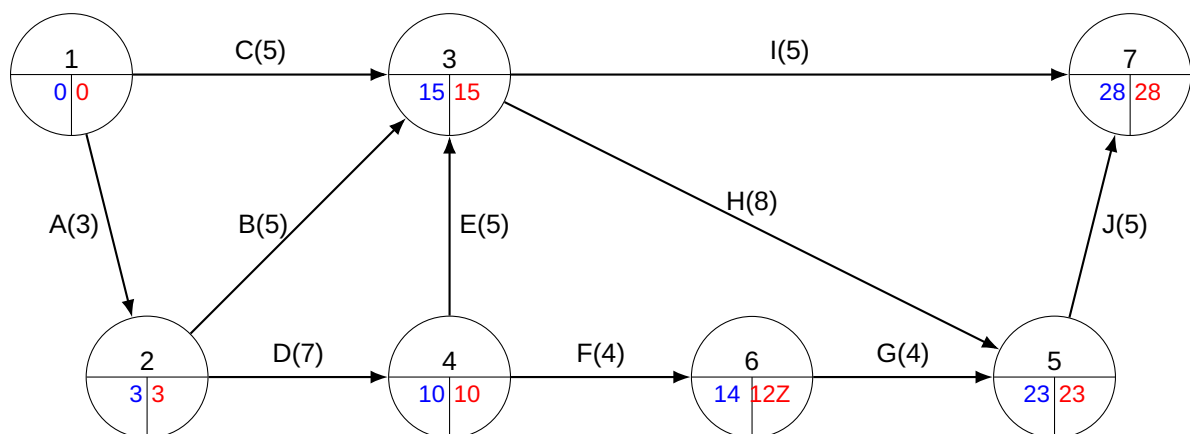


Figura 18: Diagrama de flechas Ejercicio 1.

Buscar el programa de trabajos que minimice el número de camiones necesarios en la obra.

Solución Se trata de un problema de nivelación, en el que se procura que la necesidad de recursos (camiones en este caso) sea lo más constante posible durante las obras.

Para resolverlo se van a aplicar los fundamentos del algoritmo de Burgess-Killebrew. Para ello se comienza haciendo un programa de trabajos considerando las fechas más tempranas (figura 19). A continuación se irán retrasando actividades no críticas para que la suma de cuadrados del recurso asignado se reduzca tanto como sea posible.

Paso 1 El pico de demanda de recursos más acusado está en las etapas 16 a 18. Durante este período están en ejecución las actividades G, H e I. De acuerdo con la regla 1 del método de Burgess-Killebrew, se debe comenzar retrasando la actividad cuya finalización sea más tardía, que en este caso es la I. Aunque habría que ir retrasando la actividad etapa a etapa e ir viendo como proceder, en este caso es evidente que la mejor alternativa se obtiene si se retrasa a su final más tardío. El programa sería el que se muestra en la figura 20,

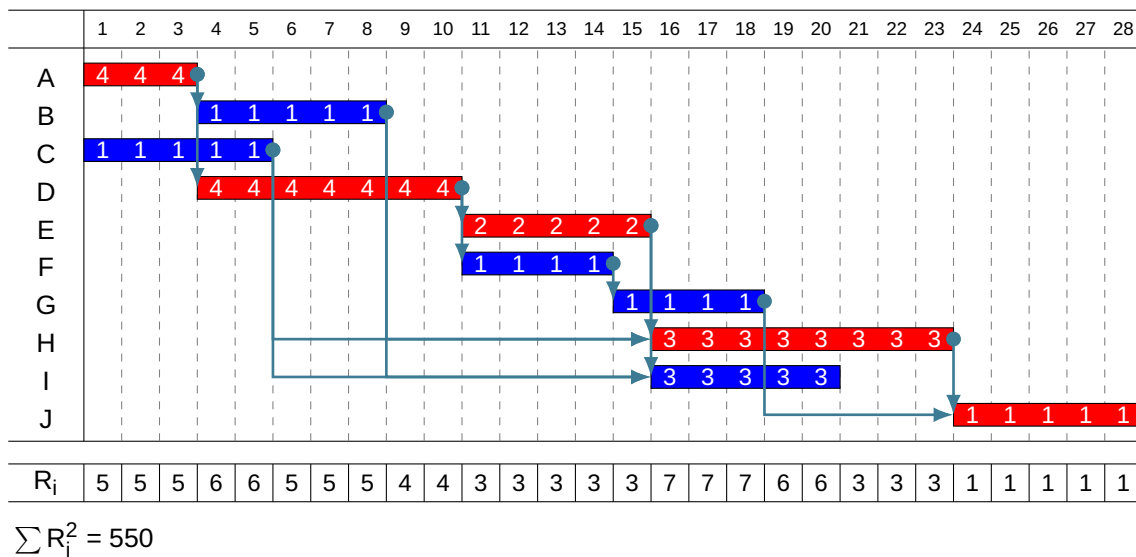


Figura 19: Ejercicio 1. Programación inicial.

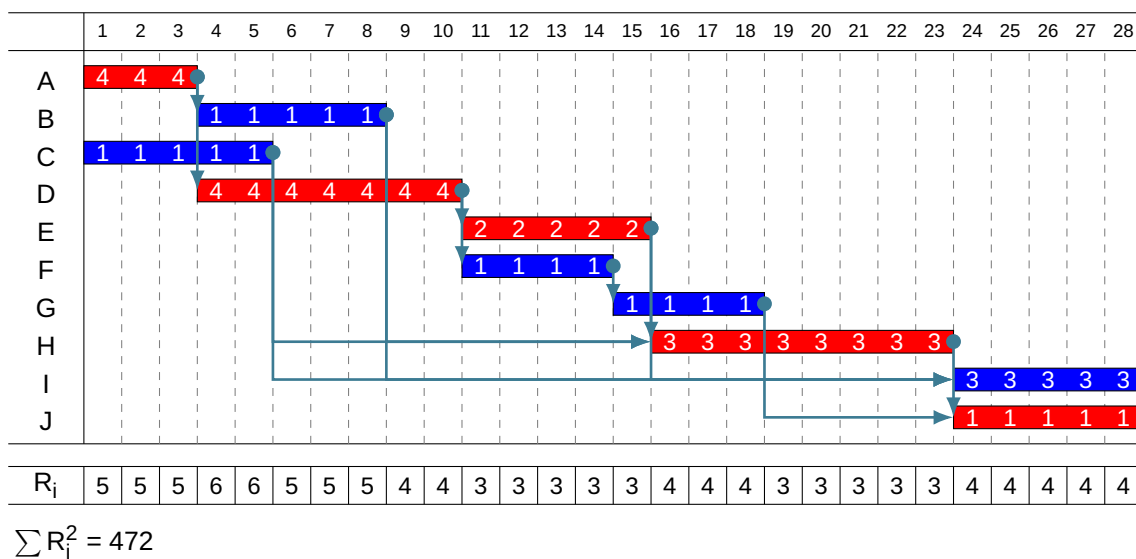


Figura 20: Ejercicio 1. Programación tras el paso 1.

Paso 2 Ya se ha laminado ese pico de demanda, y el siguiente más intenso se produce en las etapas 4 y 5, cuando se están ejecutando las actividades B, C y D. En este caso la regla 1 del método de Burgess-Killebrew haría que se retrase la actividad C, por tener más holgura. Para conseguir el efecto de laminación, hay que llevar su inicio a la etapa 9, para lo cual tiene holgura suficiente. El programa se muestra en la figura 21.

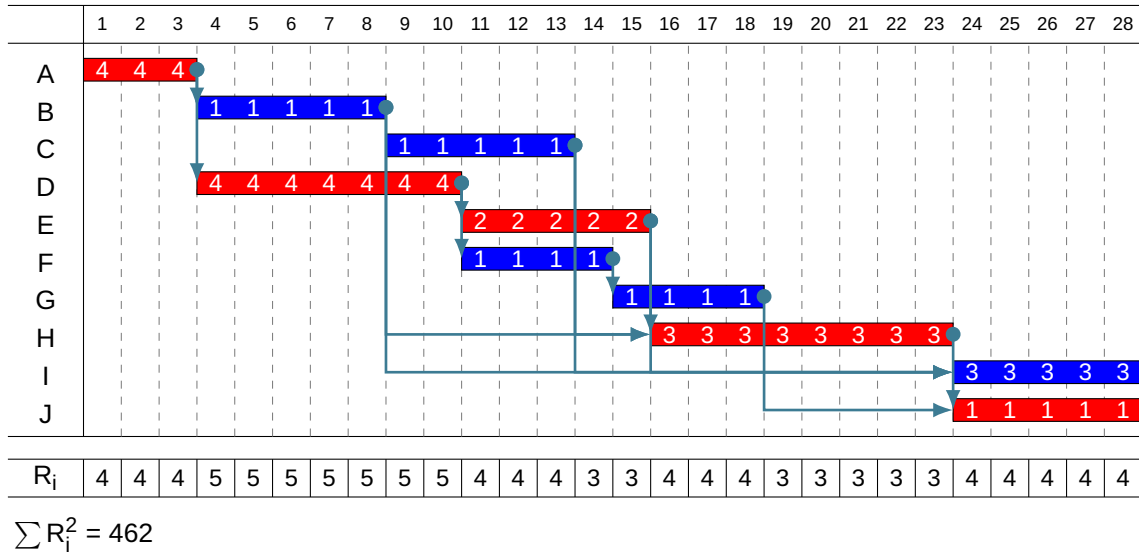


Figura 21: Ejercicio 1. Programación tras el paso 2.

Paso 3 Aunque se ha reducido el pico de demanda a solo 5 camiones, sigue habiendo un pico en las etapas 4 a 10. En las cinco primeras intervienen las actividades B y D, siendo D crítica, por lo que hay que retrasar la actividad B. Es evidente que hay que retrasarla hasta el final de D, para que el pico de demanda se lamine. El programa quedaría como se muestra en la figura 22.

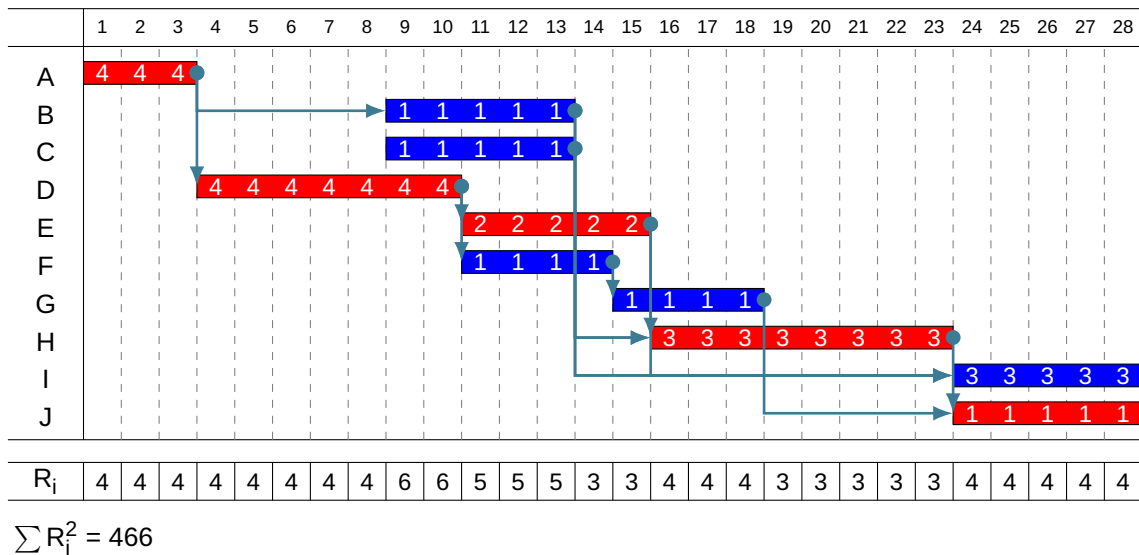


Figura 22: Ejercicio 1. Programación tras el paso 3.

Paso 4 Ahora el pico se ha retrasado a las etapas 9 y 10. Como las actividades involucradas son de nuevo la B, C y D, siendo D crítica, hay que desplazar la C, por tener más holgura. Se desplaza hasta agotar su holgura, en dos etapas. El programa quedaría como se muestra en la figura 23.

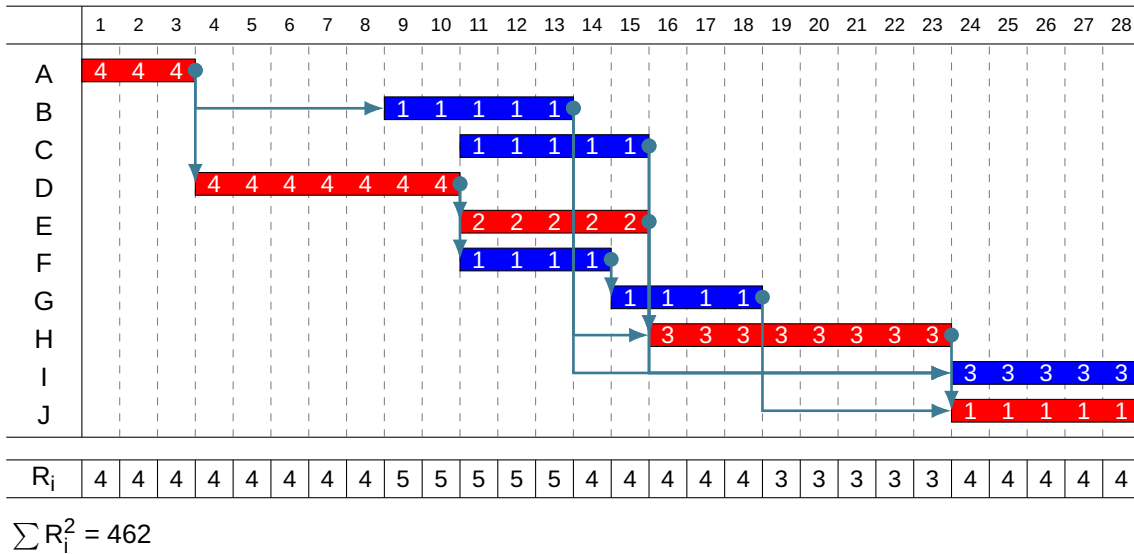


Figura 23: Ejercicio 1. Programación tras el paso 4.

Paso 5 El siguiente paso es eliminar el pico de demanda de las etapas 11 a 14. Las actividades involucradas son la B, C, E y F. Como las actividades B y C han agotado su holgura, y E es crítica, solo queda retrasar la actividad F, lo cual implica retrasar la G que es subordinada de aquella en la precedencia. Aunque se podría retrasar en una etapa y replantear el caso, es evidente que hay que retrasarla en cinco etapas, es decir, agotar su holgura. El programa quedaría como se muestra en la figura 24.

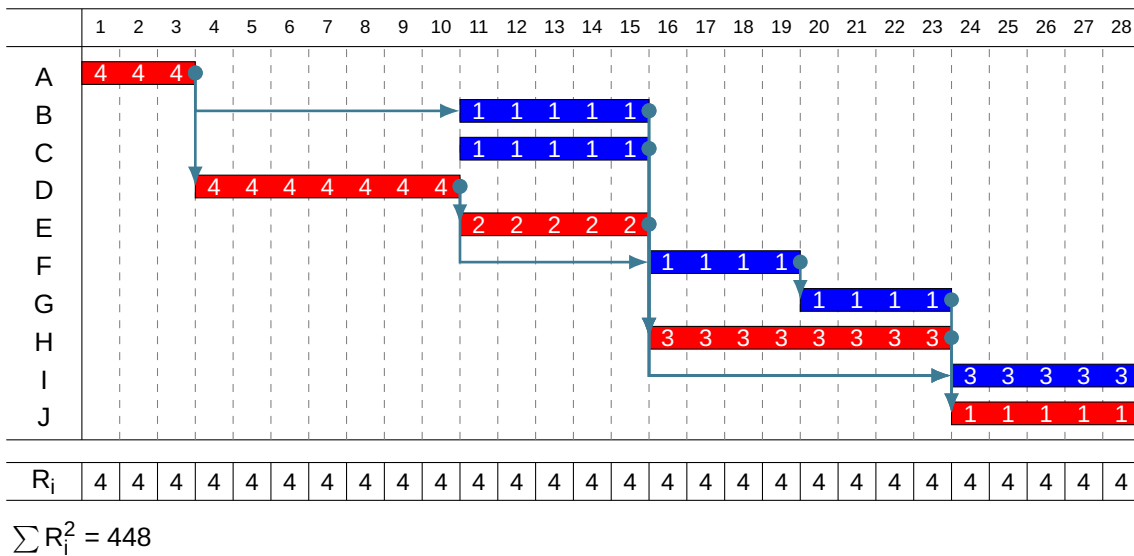


Figura 24: Ejercicio 1. Programación tras el paso 5.

La programación final es la que menor valor de $\sum R_i^2$, y por tanto es la solución del problema. La obra puede hacerse con solo 4 camiones.

Ejercicio 2

De un proyecto se tiene el programa dado por la red de flechas de la figura 25, donde las duraciones están dadas en semanas.

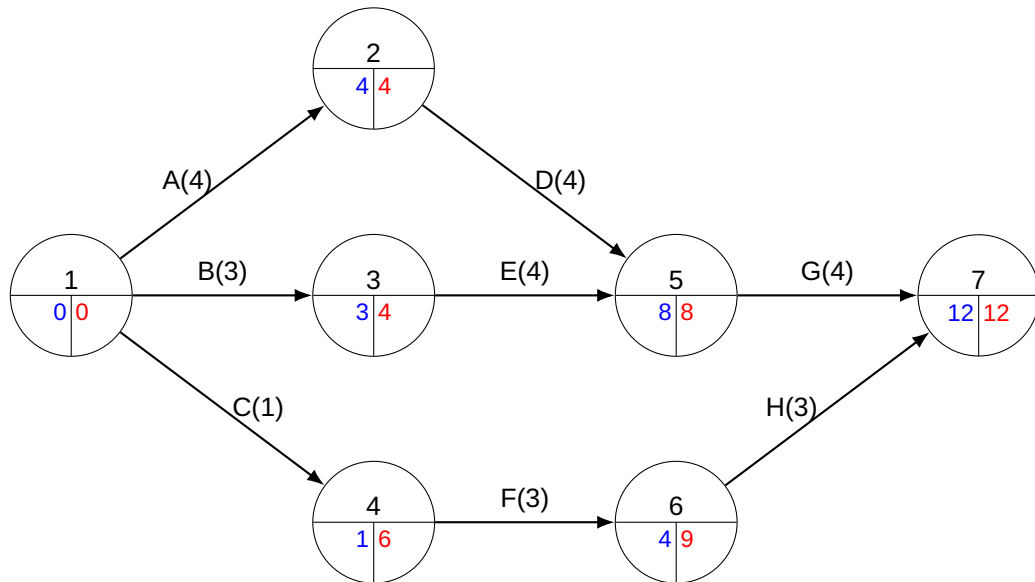


Figura 25: Diagrama de flechas Ejercicio 2.

La actividad A requiere del uso de tres excavadoras. Las actividades B, E y F requieren de una sola excavadora y las actividades C, D, G y H requieren de dos excavadoras.

Se dispone de tres excavadoras sólo durante las primeras 9 semanas, y de dos excavadoras el resto de las obras.

Se pide encontrar el programa de menor duración que pueda ejecutarse con las excavadoras disponibles.

Solución Se trata de un problema de asignación de recursos, que podemos resolver usando el algoritmo de Wiest y Levy. Para ello se comienza programando las actividades a sus fechas más tempranas, y a partir de ahí ir asignando recursos, retrasando las actividades que no tengan disponibilidad para ello. El programa inicial es el dado por la figura 26.

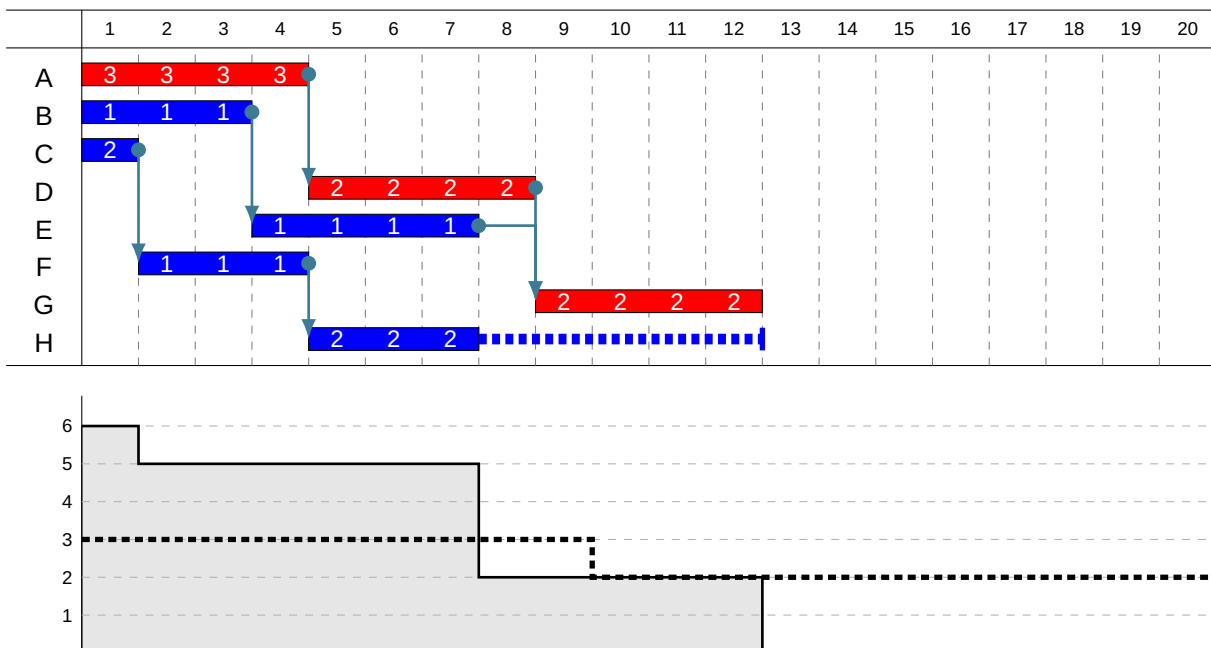


Figura 26: Ejercicio 2. Programación inicial.

Paso 1 El procedimiento a seguir consiste en ir asignando recursos semana a semana, y si no hay suficientes, asignarlos a las que tengan prioridad, retrasando las demás. Las prioridades se fijan con las tres reglas que se han descrito en el apartado 4.1.

En este caso, se compara la fecha de finalización de las actividades programadas para esta semana, que son las A, B y C. La fecha de finalización tardía más próxima la tienen las actividades A y B, cuya fecha de terminación más tardía es la semana 4, frente a la C, que es la semana 6. Como hay empate, y no hay recursos para las dos, la segunda regla a aplicar es la de priorizar las actividades con menor holgura, y eso sucede con la actividad A, que no tiene holgura. Por tanto, la prioridad la tiene la actividad A, que consume todos los recursos (las tres excavadoras), y hay que retrasar las otras actividades una semana.

Se observa que la misma situación se va a seguir produciendo hasta que A no termine, y libere las tres excavadoras, porque durante el período en el que A está ejecutándose no hay más excavadoras. Por tanto, las actividades B y C pueden retrasarse hasta el momento en que A finalice. El programa resultante queda como se muestra en la figura 27.

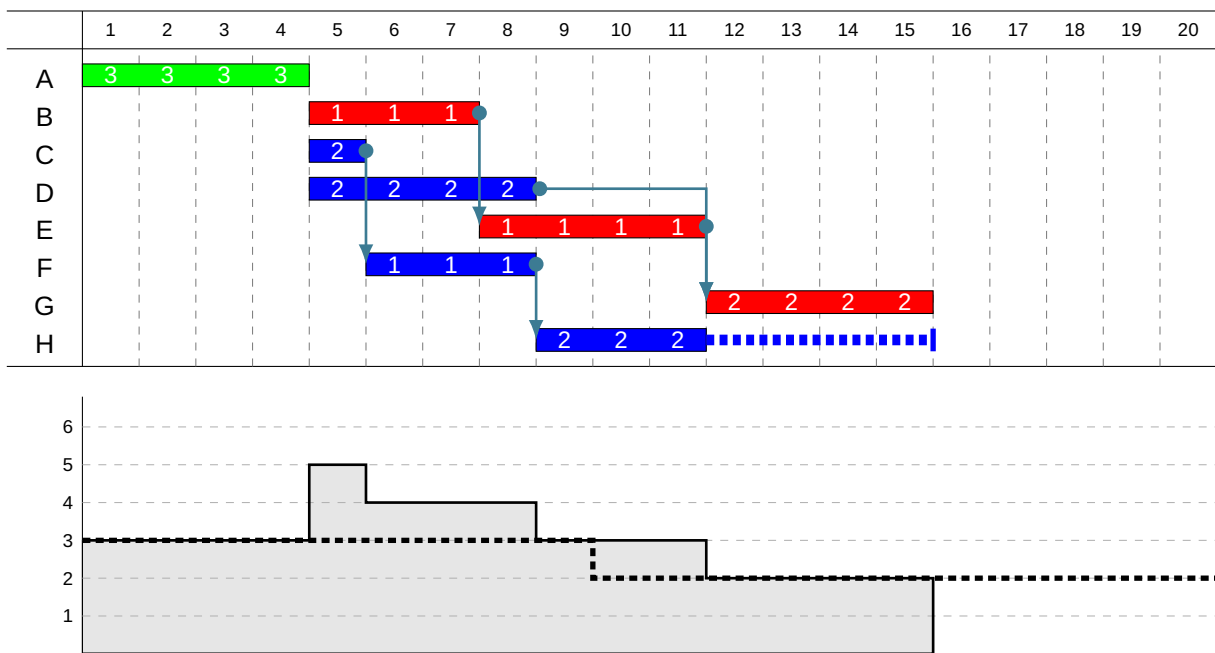


Figura 27: Ejercicio 2. Programación tras el paso 1.

Paso 2 En la semana 5 estarían programadas las actividades B, C y D. La actividad A ha liberado tres excavadoras, y se tienen para esas actividades. Como se demandarían 5 excavadoras pero solo hay tres, hay que priorizar la asignación.

Las fechas de fin más tardías de estas actividades son la semana 7 para la actividad B, la semana 9 para la C y la semana 11 para la actividad D. Por tanto, las tres excavadoras se van a aplicar a las actividades B y C, y la actividad D se retrasa en una semana. El programa resultante queda como se muestra en la figura 28.

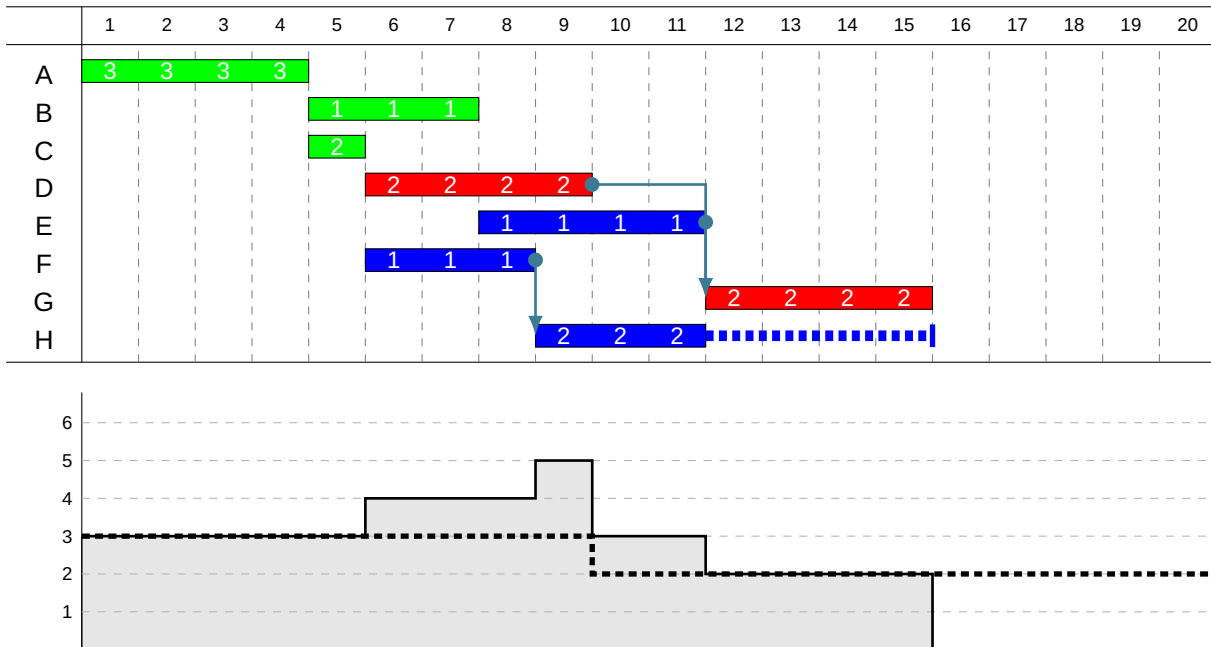


Figura 28: Ejercicio 2. Programación tras el paso 2.

Paso 3 En la semana 7 la actividad C ha liberado dos excavadoras. La actividad B ocupa una, y las actividades D y F son las que estarían programadas. De estas dos el final más tardío más temprano es el de la actividad D, que puede terminar la semana 11, frente a la D, que puede terminar la semana 12. Por tanto, se asignan las dos excavadoras a la actividad D, y se retrasa la actividad F en una semana.

El caso se repite en la semana 7, por lo que la actividad F debe retrasarse también esa semana. El programa resultante queda como se muestra en la figura 29.

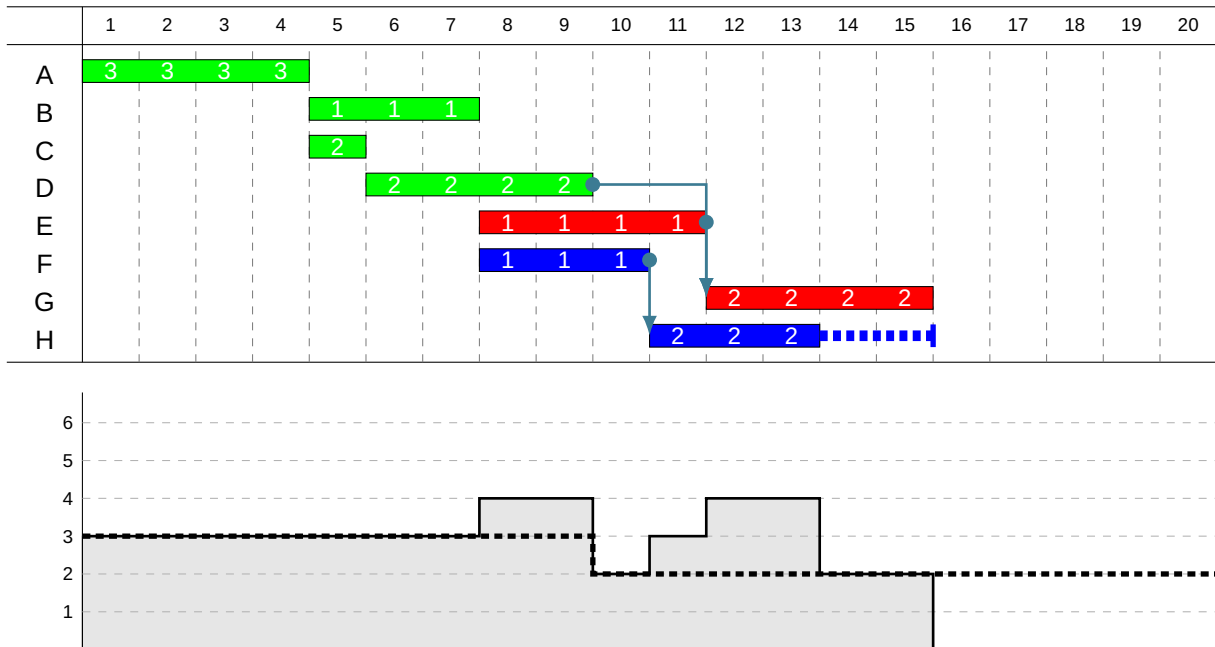


Figura 29: Ejercicio 2. Programación tras el paso 3.

Paso 4 En la semana 8 la actividad B ha liberado una excavadora. La actividad D ocupa dos, y las actividades E y F son las que estarían programadas. De estas dos el final más tardío más temprano es el de la actividad E, que puede terminar la semana 11 (porque ha consumido su holgura), frente a la F, que puede terminar la semana 12. Por tanto, se asignan la excavadora libre a la actividad E, y se retrasa la actividad F en una semana.

De nuevo, el caso se repite en la semana 9, por lo que la actividad F debe retrasarse también esa semana. El programa resultante queda como se muestra en la figura 30.

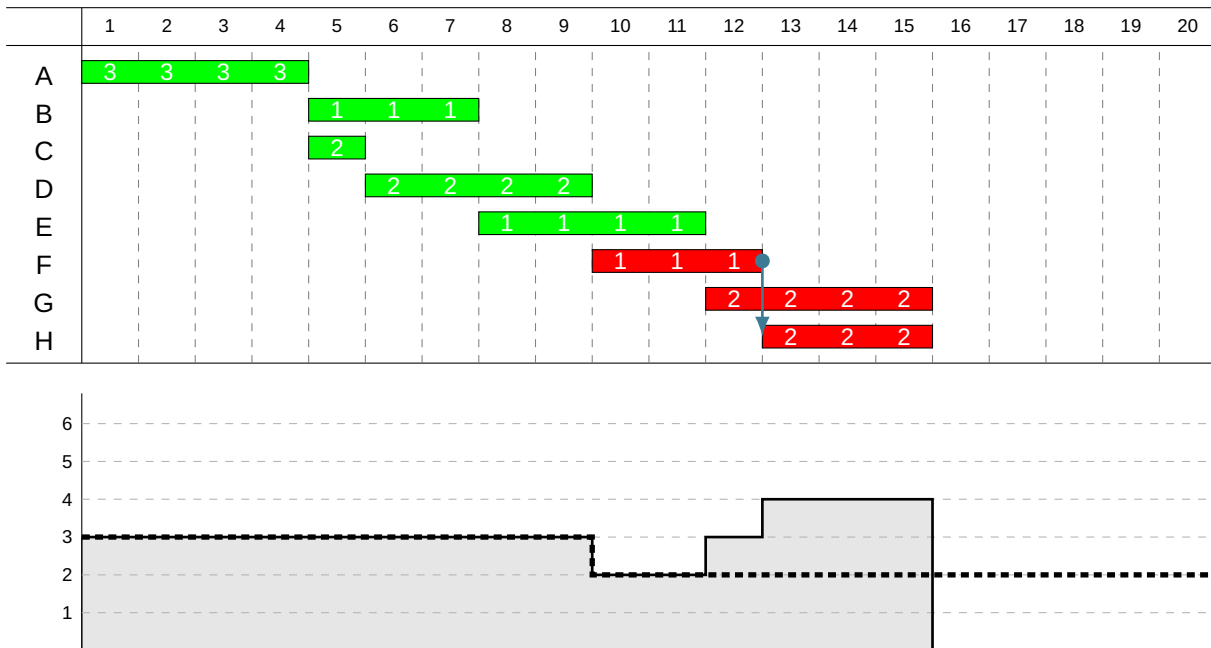


Figura 30: Ejercicio 2. Programación tras el paso 4.

Paso 5 En las semanas 9 y 10 la asignación de excavadoras no supera la disponibilidad. Por tanto, se asigna una excavadora a la actividad E y otra a la F.

La semana 12 sí hay exceso de excavadoras asignadas, pero solo se puede retrasar la actividad G. El programa resultante queda como se muestra en la figura 31.

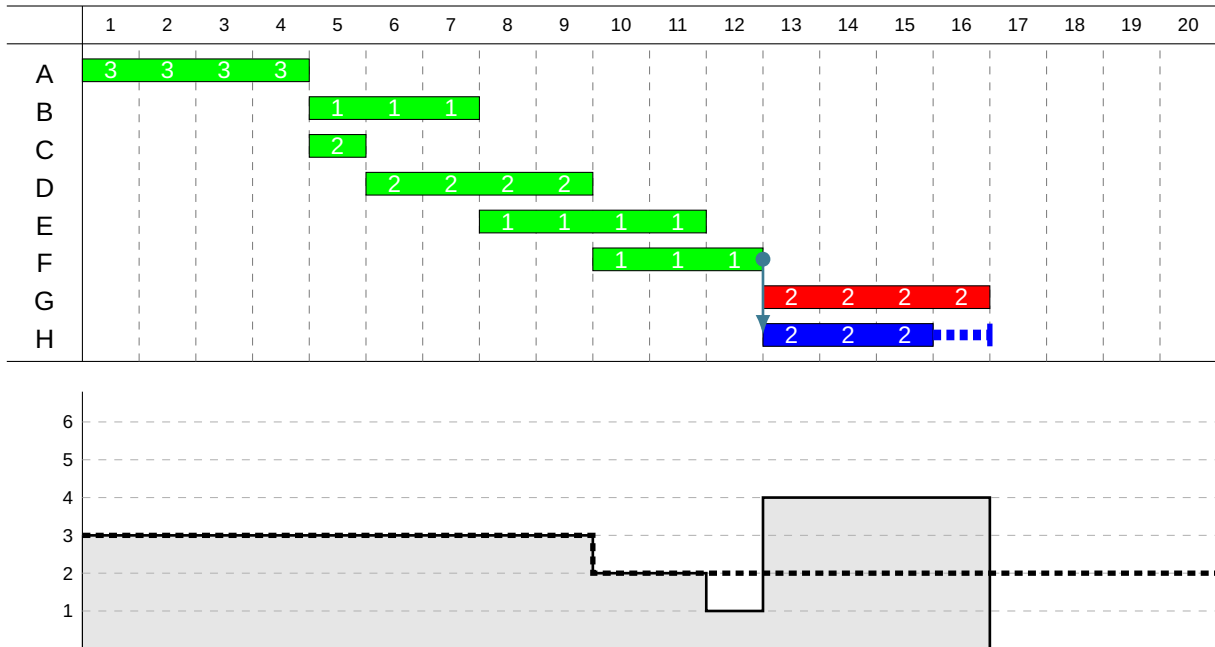


Figura 31: Ejercicio 2. Programación tras el paso 5.

Paso 6 Finalmente, las semanas 13, 14 y 15 hay asignadas cuatro excavadoras, pero la disponibilidad es de dos. La solución es desplazar la actividad H cuatro semanas, para usar las excavadoras de la actividad G cuando esta termine. La actividad G no tiene holgura, y es prioritaria por eso. En todo caso, si se retrasara la actividad G cuatro semanas, el plazo final del proyecto sería el mismo. El programa resultante queda como se muestra en la figura 32.

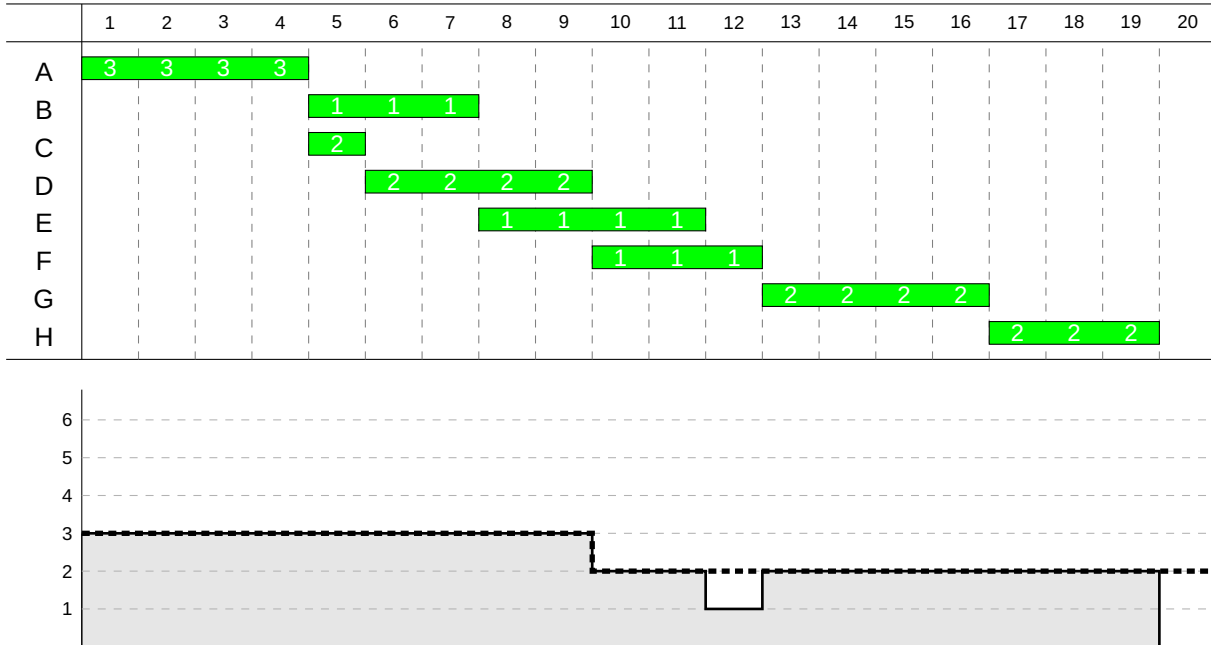


Figura 32: Ejercicio 2. Programación tras el paso 6.

Referencias

- [1] H. Kerzner. *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*. Wiley, 2025. ISBN: 9781394290031. URL: <https://books.google.es/books?id=JR1HEQAAQBAJ>.
- [2] David R. Pierce. *Project scheduling and management for construction*. eng. Fourth edition. RSMears ; v.89. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013. ISBN: 9781118417171.
- [3] Erik Leuven Demeulemeester y Willy S Herroelen. *Project scheduling*. en. International Series in Operations Research & Management Science. New York, NY: Springer, abr. de 2013.

