



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**CAMINOS  
UPV**

PROGRAMACIÓN  
DE PROYECTOS

**INTRODUCCIÓN A  
A LA PROGRAMACIÓN  
DE PROYECTOS**

J. Alcalá

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

Programación de Proyectos  
INTRODUCCIÓN DE LA PROGRAMACIÓN DE PROYECTOS

©2025

Julián Alcalá González [jualgon@upv.es](mailto:jualgon@upv.es)



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

# Índice

<b>1. La planificación de obras</b>	<b>3</b>
<b>2. Elementos de un programa de trabajos</b>	<b>5</b>
2.1. Actividades . . . . .	5
2.2. Sucesos . . . . .	8
2.3. Restricciones . . . . .	9
<b>3. Diagrama de Gantt</b>	<b>11</b>
3.1. Holguras y camino crítico . . . . .	12
3.2. Ventajas e inconvenientes del diagrama de Gantt . . . . .	12
<b>4. Programación de obras lineales o repetitivas</b>	<b>14</b>
4.1. Diagramas espacio-tiempo . . . . .	14
4.2. Líneas de balance . . . . .	15
<b>EJERCICIOS RESUELTOS</b>	<b>19</b>
<b>Referencias</b>	<b>29</b>

*(Página intencionadamente dejada en blanco)*

## 1. La planificación de obras

Todas las actividades humanas se planifican. Estamos permanentemente planificando lo que vamos a hacer en el futuro: el día que tenemos por delante al levantarnos por la mañana, lo que haremos el fin de semana, las vacaciones, el curso,... Además, tratamos de calendarizar nuestras actividades para prever el momento del tiempo en que se llevarán a cabo (qué día tenemos un examen, la cita con el médico, a qué hora debo recoger el coche del taller). Es normal que así sea, porque de lo contrario viviríamos en una continua improvisación, lo que haría imposible alcanzar ningún objetivo a medio o largo plazo.

Imaginemos que para pasar unos días de vacaciones no preparamos con antelación todo lo necesario: billetes de avión, reservas de hotel, etc. Nadie hace las maletas de repente y se traslada al aeropuerto sin más. Antes deberá haber previsto las fechas del viaje, conseguido billetes para el avión, consultará horarios y probablemente conseguirá información sobre lugares de interés a visitar, cómo trasladarse por el lugar de destino. Incluso podría conseguir con antelación entradas para sus visitas programadas. Esta es otra importante ventaja de la planificación, que permite prever con suficiente antelación las cosas que podremos necesitar para tenerlas cuando las necesitemos. Así organizamos las compras, por ejemplo.

Las obras de construcción no son una excepción, y en ellas se hace aún más patente la necesidad de preparar las actividades con suficiente antelación. Debemos saber cuándo vamos a estar haciendo qué cosas en la ejecución del proyecto, porque se emplean medios que no es sencillo ni rápido de conseguir, y porque se trata de actividades complejas que requieren de la coordinación de numerosos agentes.



Figura 1: Hormigonado de zapata en el Pont del Candí (fuente: Angel Barba)

Por ejemplo, para colocar el hormigón de una zapata (figura ??) hay que tener a nuestra disposición la planta que lo fabrica, el número necesario de camiones y bombas y el equipo de puesta en obra: suficiente personal, vibradores para la compactación, herramientas auxiliares, compresores o grupos electrógenos, equipo de control de calidad, etc. Saber qué día se tiene previsto hacer ese hormigonado es indispensable para poder coordinar todos estos agentes.

Pero además, para poder colocar el hormigón se tendrá que haber completado todo lo necesario en el propio tajo: los encofrados deberán estar colocados y afianzados y la armadura totalmente terminada. Si es necesario los topógrafos habrán tenido que colocar lienzas o marcas para señalar el nivel que debe alcanzar el hormigón dentro del encofrado. Se tendrá que haber supervisado que todo está correctamente dispuesto, y aprobado por la Dirección de Obra. Hasta que todo esto no se haya terminado no se podrá colocar el hormigón. Por tanto la fecha del hormigonado no vendrá dada tan sólo por un acuerdo entre los agentes implicados (planta, camiones, equipo de obra, ...), sino también por el momento en el que se prevea estar en condiciones de verter el hormigón, porque todas las actividades previas estén concluidas.

Y a su vez, las actividades previas dependen de otras que hay que completar con anterioridad: bajo el encofrado debe estar vertido y fraguado el hormigón de limpieza, que a su vez requiere que la excavación esté terminada y nivelada, y así sucesivamente durante toda la obra.

La programación que hagamos nos permitirá determinar en qué momento podremos estar en condiciones de hormigonar esa zapata, pero también nos permite organizarnos al revés. Si interesa aprovechar la parada del fin de semana para que el hormigón endurezca, podemos programar el hormigonado para un viernes, y podemos programar el resto de actividades hacia atrás en el tiempo. Eso nos permitirá saber el día que tenemos que comenzar la excavación, colocar a tiempo el hormigón de limpieza, el encofrado, la ferralla, etc.

Las *técnicas de programación de proyectos* permiten organizar todas las actividades de un proyecto de acuerdo con sus duraciones y sus interrelaciones para calendarizarlas. Aunque casi todas estas técnicas surgieron en el mundo de la industria, en la construcción son totalmente aplicables y muy útiles.

La correcta programación es necesaria para poder acometer las obras, y de hecho, la Ley de Contratos del Sector Público<sup>1</sup>, en su artículo 233, establece que todos los proyectos de construcción que se redactan para la administración deben incluir «*un programa de desarrollo de los trabajos o plan de obra de carácter indicativo, con previsión, en su caso, del tiempo y coste*». También las administraciones distribuyen el coste de cada proyecto en anualidades en función de ese plazo previsto, y a su vez los contratistas ofertan un plazo en sus propuestas cuando acuden a una licitación, que puede reducir el plazo previsto en la licitación o no, pero que deben justificar con un programa de trabajos propio. Las administraciones valoran no sólo el plazo, sino también la coherencia de ese programa de trabajos a la hora de elegir la empresa a la que se adjudicará el contrato.

La información que puede asociarse al programa de trabajos es muy variada y facilita la gestión de la obra. Gracias a la programación se conocerá de antemano la necesidad de recursos que se van a padecer (cuantos trabajadores o máquinas se necesitarán en cada momento), y se puede laminar esa necesidad optimizando los recursos. Si se observa que un mes harán falta quince trabajadores, y al siguiente solo cinco, pueden pasarse actividades del primer mes al segundo y tratar de hacerlo todo con diez trabajadores.

Se puede conocer también el ritmo al que se va a certificar la obra, es decir, el volumen de obra que se hace mes a mes expresado en dinero, y así se pueden planificar también las finanzas. Por supuesto se puede conocer el plazo mínimo que se necesita para completar la obra, o el plazo que resulta económicamente más interesante porque reduce costos y maximiza beneficios. Esto ocurre cuando se asignan equipos a una tarea: imaginemos que durante la construcción de una carretera tenemos a nuestra disposición dos equipos para hacer un terraplén, y uno es un 50% más costoso que el otro, pero el doble de rápido. Supongamos que ese terraplén es necesario para poder acceder más rápidamente al resto de tajos, y si se termina pronto se puede acelerar la obra. En este caso, utilizar el primer equipo podría ser ventajoso. Pero si por el contrario el tener acabado ese terraplén no reporta ningún beneficio, porque el acceso al resto de la obra depende de, por ejemplo, un gran viaducto cuya construcción es más lenta, emplear el primer equipo solo supondrá un mayor coste de ejecución, sin ningún beneficio a cambio.

Y finalmente, como toda predicción, un programa de trabajos encajado al comienzo de la obra sufrirá variaciones y desviaciones respecto a las fechas inicialmente previstas. El uso de las técnicas de programación y de algún software que las maneje permite tomar las decisiones adecuadas para recuperar el tiempo perdido en caso de que una actividad sufra un retraso, y para conocer el alcance de ese retraso en el resto del proyecto.

Por estas razones todas las obras de construcción se programan antes de su inicio, y se lleva a cabo el seguimiento y actualización de ese programa durante las obras para poder tener un correcto control sobre éstas. Son la principal herramienta de los responsables de su gestión. Y puesto que los programas de trabajos suelen ser complejos diagramas llenos de interrelaciones entre las tareas, y puesto que calcular correctamente los plazos y fechas es complejo, la forma adecuada de elaborar y actualizar los programas de obras es hacerlo con software comercial. Actualmente existen numerosos programas informáticos de gestión de proyectos en el mercado que permiten la programación de proyectos, y cuyo uso se ha extendido con el mundo de la construcción.

---

<sup>1</sup>Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público.

## 2. Elementos de un programa de trabajos

### 2.1. Actividades

En la programación de proyectos la unidad de medida mínima de un proyecto es la *actividad*. Puede definirse como una tarea que debe ser llevada a cabo para completar una parte de los trabajos involucrados en un proyecto.

**Características de las actividades** Las *actividades* que se definan para programar un proyecto deben consumir tiempo. Como ejemplos típicos se pueden citar la excavación de una zanja, la colocación de un encofrado, el pintado de una pared, o el extendido de una capa de zahorra en un camino. Una actividad tiene una fecha de inicio y una fecha de finalización, y la diferencia entre ambos es la duración de la actividad. Las técnicas de programación de proyectos permiten calcular estas fechas a partir de las duraciones previstas, y de las interrelaciones entre actividades.

La suma de todas las actividades de la obra debe suponer la completa ejecución de la misma. Otra cosa es que algunas tareas de la obra no forman parte de la ejecución -por tanto no determinan los plazos- y no se consideran en la programación. Por ejemplo, las tareas de replanteo se adaptan al ritmo de la obra, y pocas veces es al revés, por lo que no se tienen en cuenta en la programación.

Y lo mismo sucede al contrario. Nunca se puede programar sólo una parte de la obra, pues si esto es posible, es decir, si esa parte de la obra es totalmente independiente del resto, es porque en realidad no forma parte de la obra, sino que es otra obra diferente.

Las actividades deben ser continuas en el tiempo. Si se interrumpe momentáneamente, y posteriormente se reanuda, no se trata de una actividad sino de dos. Por ejemplo, la apertura de un tramo de 200 m de zanja, y la apertura de otro tramo de 200 m a continuación sólo será una actividad si se ejecutan de forma ininterrumpida, pero si se detiene la excavación para poner la tubería en el primer tramo, entonces deben ser consideradas como dos actividades diferentes.

Normalmente en la programación se asignan recursos a las actividades para poder hacer un control de la cantidad de los mismos que se requieren durante el tiempo que dura la obra, y del momento en que son necesarios. Estos recursos son consumidos mientras se ejecuta la actividad. Los recursos son horas de máquinas y de mano de obra que participan en la ejecución de la actividad (los materiales no suelen ser recursos a efectos de programación). Si los recursos van a ser tenidos en cuenta en la programación interesa que la asignación de los mismos sea homogénea, y ello condiciona en alguna medida la forma en que se deben definir las actividades. Por ejemplo, en la construcción de un edificio una actividad puede ser la ejecución de los pilares de una planta. Si se va a asignar la *bomba de hormigón* a esa actividad, debe considerarse que el encofrado y ferralla de los pilares sea una actividad y el hormigonado otra, pues de lo contrario el recurso *bomba de hormigón* estará asignado a los pilares desde que se comienza el encofrado del primero, cuando ésto, evidentemente, no es así. Si se separa en dos actividades encadenadas, la bomba se podrá asignar únicamente al hormigonado, que es cuando efectivamente va a ser utilizada.

Las actividades deben ser definidas de acuerdo con la escala temporal del programa de trabajos. Así por ejemplo si se está haciendo el programa de trabajos para la planificación de la línea de Alta Velocidad entre dos capitales de provincia, con una duración de varias decenas de años, la construcción de un viaducto entero podrá ser considerada como una actividad que duraría, por ejemplo, 15 meses. Si se está programando solamente uno de los tramos, el viaducto podrá ser desglosado en más actividades de duraciones más cortas. Así se puede ir aumentando la escala, hasta que el viaducto sea en sí mismo un proyecto a programar.

**Actividades de espera y ficticias** En ocasiones, y dependiendo del método de programación que se emplee, puede ser necesario considerar actividades sin consumo de recursos (actividades de espera) siempre que haya consumo de tiempo, como por ejemplo un fraguado del hormigón, la obtención de un permiso, un traslado de máquinas, etc. A veces estos tiempos de espera se consideran simplemente como retrasos en las relaciones entre actividades, y a veces interesa considerarlas como actividades en sí mismas.

Otras veces, en algunas técnicas de programación es necesario definir actividades ficticias, que realmente no existen, pero permiten representar correctamente algunas interrelaciones entre actividades, y así conseguir que el programa tenga la lógica adecuada.

**Actividades y unidades de obra** Es importante señalar que las *actividades* no son *unidades de obra*, y es importante no confundirlas. Las unidades de obra se utilizan para presupuestar y valorar la obra, y aunque tienen un reflejo físico, no son más que asientos contables. Las *unidades de obra* permiten simplificar la obra en partes pequeñas a las que es posible asignar un precio y una medición. Las *actividades* no tienen medición, sino duración, y aunque ambos conceptos se relacionan mediante el rendimiento, no deben confundirse. Esto no significa que las actividades no soporten una valoración, porque se puede deducir de la asignación de recursos y del consumo de materiales, pero éstos a su vez se deducen de la unidades de obra en la que intervienen, y no al revés.

Por ejemplo, una unidad de obra puede ser la siguiente:

m.l. Tubería de hormigón armado de 700 mm de diámetro, clase 135, con junta estanca de goma, incluso parte proporcional de excavación de zanja, hormigón de asiento y relleno posterior con material de la propia excavación, compactado, colocada y probada.



Figura 2: Tubería colocada en zanja (fuente: Prefabricados Alberdi)

Evidentemente la colocación de esta tubería supone la ejecución de varias actividades diferentes: primero habrá que excavar la zanja, verter el hormigón de asiento, colocar la tubería, rellenar la zanja y compactar el relleno, etc . Y estas actividades se pueden llevar a cabo en momentos diferentes del tiempo, y con equipos diferentes (figura ??).

Por el contrario, en un proyecto pueden aparecer las unidades de obra siguientes:

m <sup>3</sup>	Excavación con medios mecánicos en todo tipo de terreno, incluso carga y transporte a lugar de empleo.
m <sup>3</sup>	Extendido y nivelación de núcleo de terraplén con suelos tolerables procedentes de la excavación en obra, incluso refino de taludes.
m <sup>3</sup>	Riego y compactación de núcleo de terraplén mediante rodillo vibratorio autopulsado hasta el 100% PM.

Ahora ocurrirá lo contrario que en el caso anterior, porque es habitual coordinar los equipos de carga, transporte, extendido y compactación de tierras para hacerlo todo simultáneamente. Una sola actividad puede aglutinar las tres unidades de obra: se excava con una giratoria que carga un grupo de dúmpers, éstos llevan el material al terraplén y lo descargan para que una motoniveladora lo extienda en tongadas, y un equipo de

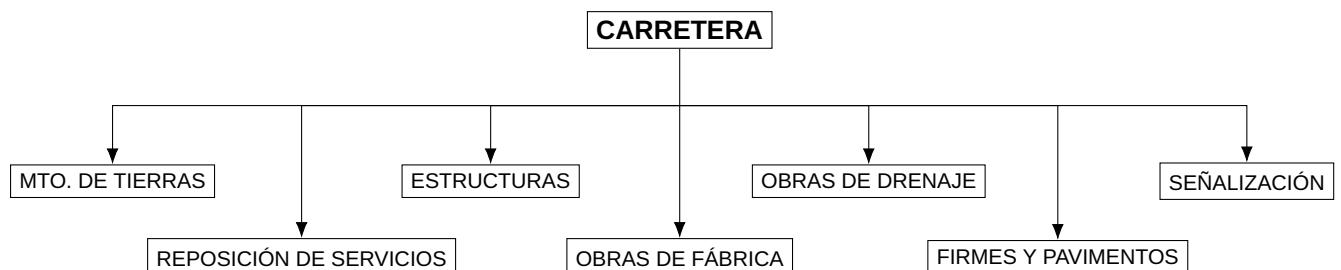
compactadores y una cuba de agua lo compactan (figura ??). Y todo eso de forma coordinada, para obtener un rendimiento conjunto, es decir, una continuidad de todos los equipos que permanecen asignados a la actividad mientras ésta dura.



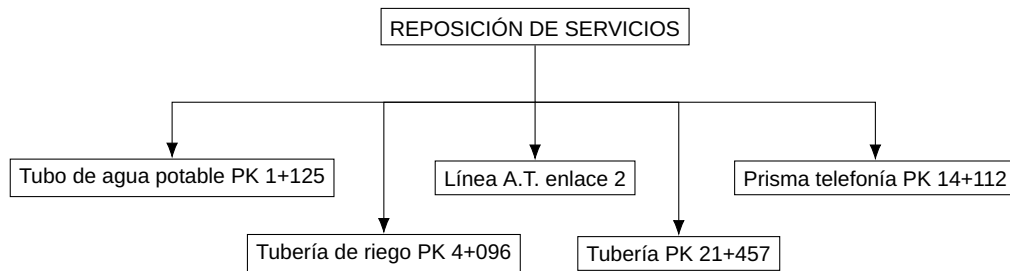
Figura 3: Operaciones de extendido y nivelación de un terraplén (fuente: Macías Flores)

**Estructuras de descomposición del trabajo** En los ejemplos que se han ido viendo hasta ahora las actividades venían dadas según una secuencia lógica, determinada por el orden temporal en que deben ejecutarse: primero se excava, después se vierte el hormigón, después se coloca la tubería, etc. En las obras reales estas secuencias sólo pueden intuirse hasta un cierto punto. Una carretera, por ejemplo, comienza con los replanteos y trabajos previos de implantación, luego vienen el despeje y desbroce del terreno, pero pronto comienzan a aparecer actividades aparentemente independientes entre sí, cuya secuencia de ejecución ya no estará tan clara.

Una buena forma de definir las actividades es mediante *Estructuras de descomposición del trabajo* ó *EDT* (*WBS Work Breakdown Structure*). Consiste básicamente en ir dividiendo la obra en unas cuantas tareas generales, que a su vez se subdividen en otras más concretas, para ir poco a poco alcanzando las tareas básicas que definirán las actividades. Por ejemplo, en una obra de carreteras es habitual dividir el proyecto del modo siguiente:



Cada una de estas partes puede subdividirse de diversas formas. Por ejemplo, las reposiciones de servicios afectados pueden subdividirse por cada uno de los servicios:



La tubería de agua potable que debe ser repuesta puede ahora dividirse en actividades más sencillas:

- Excavación de zanja.
- Cama de asiento.
- Colocación del tubo.
- Enganche de ventosa.
- Enganche de acometida inicial.
- Pruebas de estanqueidad y presión
- Rellenos de zanja
- etc.

Haciendo esto con todas las reposiciones, y con todas las partes en las que el proyecto pueda dividirse y subdividirse, se completará la lista de actividades. Este modo de proceder hace más difícil olvidar actividades, lo que supondría un serio problema cuando el programa comienza a tomar cierto tamaño. Además permite una programación por fases. Tal vez en un primer momento no se necesite mucha precisión para programar las obras, pero a medida que vaya siendo necesario puede ir afinándose la lista de actividades con más subdivisiones. Una vez programada la obra completa se podrá determinar como interfieren estas actividades con el resto de la obra, y programarlas para el momento adecuado.

## 2.2. Sucesos

Los sucesos son otro de los elementos típicos de un programa de trabajos. Son instantes en el tiempo, en los que se han completado algunas actividades y se comienzan otras. Son como hitos en el desarrollo de las obras.

En algunas técnicas de programación se usan mucho, pues determinan el paso de una actividad a otra. En otras técnicas no son necesarios, pero pueden ser útiles para enfatizar al momento clave en el que parte de la obra este terminada, o pueda dar comienzo, o instantes en los que algo importante debe suceder.

En cualquier caso, todo proyecto tiene dos sucesos siempre: el suceso *inicio de las obras*, y el suceso *fin de las obras*. Además estos sucesos son únicos, pues no puede haber más de un instante en el que den comienzo las obras, ni más de un instante en el que terminen.

Algunos ejemplos pueden ser:

- Fecha límite para el suministro de las vigas prefabricadas.
- Inicio del extendido de firmes.
- Fecha límite para conseguir una autorización.
- Puntos de Parada o Puntos de Inspección de acuerdo con el Plan de Calidad que se siga en la obra.
- etc.

## 2.3. Restricciones

Las restricciones determinan las interrelaciones temporales entre actividades, es decir, la imposibilidad de que coincidan en el tiempo, o la manera en que pueden coincidir. Como se indicaba en un ejemplo anterior, una restricción es la imposibilidad de colocar el hormigón en tanto no se haya concluido la colocación de la ferralla. Este tipo de relaciones se denominan restricciones IF (*inicio-fin*), y son las más frecuentes en la práctica. Así la restricción IF(A) aplicada a la actividad B significa que la actividad B no puede comenzar hasta que la actividad A no ha terminado, es decir, el *inicio* de B viene dado por el *final* de A. A la actividad A se le denomina *actividad principal*, y a la actividad B se le denomina *actividad subordinada*. En el caso de la zapata que se ha visto antes (figura ??), sería algo como lo que se muestra en la tabla ??.

Actividad	Descripción	Restricción
A	Excavación	–
B	Hormigón de limpieza	IF(A)
C	Encofrados y ferralla	IF(B)
D	Hormigonado	IF(C)

Tabla 1: Actividades y restricciones en la ejecución de una zapata.

Existen cuatro tipos de restricciones:

IF (*inicio-fin*): la actividad subordinada no puede comenzar hasta que la actividad principal no ha terminado. A esta restricción se le denomina *relación de precedencia*.

II (*inicio-inicio*): la actividad subordinada no puede comenzar hasta que la actividad principal no ha comenzado.

FF (*fin-fin*): la actividad subordinada no puede terminar hasta que la actividad principal no ha finalizado. Este tipo de restricción es muy raro en la práctica, pero existen al menos teóricamente.

FI (*fin-inicio*): la actividad subordinada no puede terminar hasta que la actividad principal no ha comenzado.

Las razones por las que se dan restricciones entre actividades pueden ser debidas a diferentes motivos:

- Restricciones físicas: como el hormigonado posterior al ferrallado, porque una vez hormigonada la pieza, no se puede colocar ferralla.
- Restricciones de seguridad: la seguridad de los trabajadores puede condicionar el orden de diferentes tareas. No se puede trabajar en las inmediaciones de una zona donde se está preparando una voladura, por ejemplo.
- Restricciones administrativas: No se puede utilizar un préstamo hasta no disponer de las autorizaciones correspondiente.
- Restricciones por limitación de recursos: No se pueden excavar dos terraplenes simultáneamente si solamente hay una excavadora.

Entre las dos actividades relacionadas por la restricción puede haber una espera o un desfase. Si para mover un encofrado trepante (figura ??) hay que esperar tres días desde el hormigonado de la fase anterior, se puede emplear una actividad de espera de tres días, o más sencillo, indicar que entre el movimiento del encofrado (actividad B) y el hormigonado de la fase anterior (actividad A) hay una relación de precedencia IF-3. Esto significa que B no puede comenzar hasta que no termina A, y pasan 3 días (si las duraciones se expresan en días).

No es habitual, pero entre actividades simultáneas puede haber más de una restricción. Pensemos por ejemplo en el extendido de una capa de aglomerado en la capa de rodadura sobre una capa de base. No se puede comenzar a colocar la rodadura hasta que la base no lleve ya algún tiempo extendida, aunque tampoco es necesario que esté toda la base del tramo colocada para comenzar a extender la capa de rodadura, sino que basta con que lleve un cierto tiempo de adelanto (desfase). Pero si por alguna razón el extendido de la rodadura es más rápido que el extendido de la base, teóricamente podría terminar antes. Como esto no es físicamente posible, hay que imponer entre ambas actividades una restricción FF, además de la restricción II. Si además el desfase es el mismo en ambas restricciones, podrían incluso ser consideradas la misma actividad.



Figura 4: Encofrado trepante en la construcción de la pila de un puente (*fuentes: Ulma*)

Las diferentes técnicas de programación representan estas restricciones de diferentes formas, e incluso algunas de ellas no son capaces de representarlas todas.

### 3. Diagrama de Gantt

La primera técnica de programación de proyectos que se desarrolló dentro del mundo de la industria fue la idea del ingeniero norteamericano Henry Laurence Gantt (1861-1919), y por eso se llama *diagrama de Gantt*. Se basa en una representación gráfica del proyecto en unos ejes cartesianos. En su representación habitual, el eje horizontal representa una escala temporal, que puede ser un calendario, y en el eje vertical se listan las actividades del proyecto. Cada actividad es representada por una barra que comienza en el punto indicado por el eje temporal, y que se alinea con su orden en la lista del eje vertical. La longitud de la línea corresponde con su duración, de manera que finaliza en la fecha en la que la actividad este concluida. La figura que sigue representa un diagrama de Gantt:

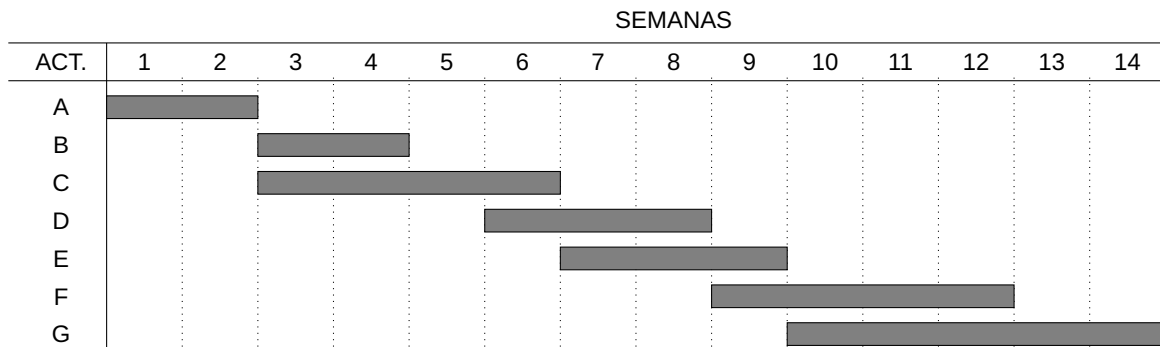


Figura 5: Ejemplo de diagrama de Gantt.

El diagrama muestra un programa de trabajos expresado en forma de diagrama de Gantt para una obra con siete actividades. Se observa que la duración de las obras es de 14 semanas, porque la escala temporal está dada en semanas, aunque podría estar en días, meses, etc. Más adelante se comentará esta escala temporal.

No cabe duda de que esta representación de los trabajos es extraordinariamente útil, pues permite conocer con antelación qué actividades estarán en marcha en cada momento. Gracias al programa es posible conocer el inicio y final de cada actividad: la actividad A por ejemplo comienza al principio de las obras, y dura dos semanas, por lo que se prevé que esté concluida al final de la segunda semana. Se sabe también qué actividades se desempeñan simultáneamente: la semana 7 por ejemplo se estará trabajando en las actividades D y E.

Como es habitual que hayan desviaciones, es necesario que el diagrama se vaya adaptando sobre la marcha a la situación real de los trabajos en cada momento. Si hay restricciones entre las actividades, como es lo normal, conviene que las restricciones se representen en el diagrama, de forma que si el diagrama sufre alguna alteración, la restricción permita saber qué actividades van a ser afectadas por ello. La forma más sencilla de representar las restricciones en un diagrama de Gantt es mediante flechas, que indiquen la actividad principal y la subordinada. Supongamos que el diagrama de Gantt del caso anterior se representa ahora con las restricciones, como se muestra en la en la figura ??.

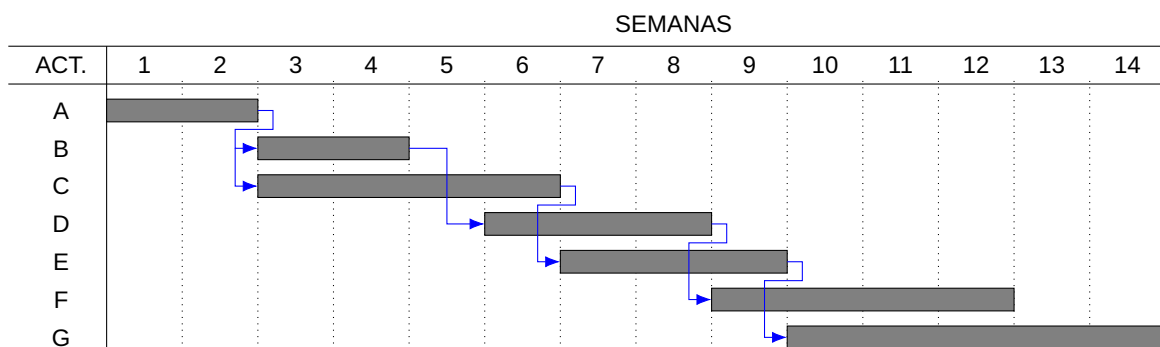


Figura 6: Diagrama de Gantt con representación de restricciones.

El diagrama muestra ahora porqué el inicio de la actividad B, por ejemplo, está programado para la semana 3, y es porque requiere que la actividad A haya finalizado. No puede programarse para una fecha anterior

porque hay una restricción IF entre ambas, siendo la actividad A la principal, y la actividad B la subordinada. Si se indican expresamente las restricciones de este proyecto se tendría la tabla ??.

ACTIVIDAD	RESTRICCIÓN
A	-
B	IF (A)
C	IF (A)
D	IF-1 (B)
E	IF (C)
F	IF (D)
G	IF (E)

Tabla 2: Restricciones del Diagrama de Gantt del ejemplo.

En este ejemplo existen seis restricciones en total, y animamos al lector a que las analice. Una restricción interesante es la que existe entre las actividades B y D. La flecha indica que la actividad D comienza una semana después de que finalice la actividad B, es decir, hay una espera entre ambas de una semana (para desplazar unas máquinas a otra parte de la obra, por ejemplo). Esta espera podría haber sido considerada como una actividad más, pero si durante esa espera no hay consumo ni gasto en la obra por ello, simplifica el diagrama no colocar una actividad de espera.

### 3.1. Holguras y camino crítico

Es interesante también observar que la actividad F se ha programado para que dé comienzo la novena semana por la restricción que tiene con la actividad D, pero ya no es actividad principal de ninguna restricción, por lo que no condiciona el inicio de ninguna otra actividad. Esto quiere decir que sería posible ejecutar la actividad la décima semana, o incluso la undécima, y el proyecto acabaría en las 14 semanas previstas. Esto sucede también con las actividades B o D si la F se retrasa. Sin embargo, esto no sucede con el resto de actividades, en las que cualquier retraso conlleva retrasar el final de las obras si no se acorta su duración. A estas actividades se les denomina *camino crítico*, pues forman una sucesión (camino) de tareas que son las que en realidad han determinado la duración del proyecto.

Las actividades B, D y F no son actividades críticas, y pueden retrasarse en un cierto período de tiempo. A este período se denomina *holgura*. El diagrama de Gantt puede representar ambas cosas, camino crítico y holguras de diferentes modos, por ejemplo, como se muestra en la figura ??.

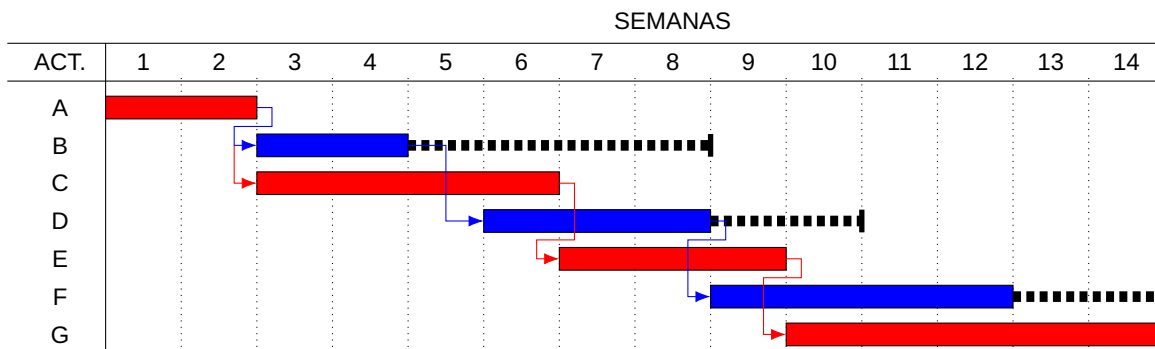


Figura 7: Camino crítico del proyecto y holguras.

La decisión de cuál es el mejor momento para completar esta actividad dependerá de la disponibilidad de recursos, del balance económico, del riesgo que haya de que se incumpla la duración de esa actividad, etc.

### 3.2. Ventajas e inconvenientes del diagrama de Gantt

El diagrama de Gantt es la forma más habitual para representar programas de obras con mucha diferencia, y muestra el estado de las obras de un modo tan claro e intuitivo, que incluso personas sin conocimientos



## 4. Programación de obras lineales o repetitivas

### 4.1. Diagramas espacio-tiempo

Los diagramas espacio-tiempo son otra de las formas de representar gráficamente un proyecto. En este caso cada actividad se representa en unos ejes cartesianos, que en su versión más habitual son una referencia geográfica o geométrica del proyecto en el eje de abscisas, y el tiempo en el de ordenadas.

Al introducir la posición en la geometría de la obra este tipo de diagramas se emplean en obras que tienen un carácter lineal muy marcado: carreteras, ferrocarriles, canalizaciones, túneles, puentes de cierta longitud, etc. También se han empleado para obras en altura, como torres o rascacielos, en los que los ejes se invierten para representar el carácter vertical de la obra.

La figura ?? es un ejemplo de un diagrama espacio-tiempo. Cada actividad está representada por una línea que conecta el punto inicial, en el instante inicial de comienzo de la actividad, y el final, en su posición e instante temporal.

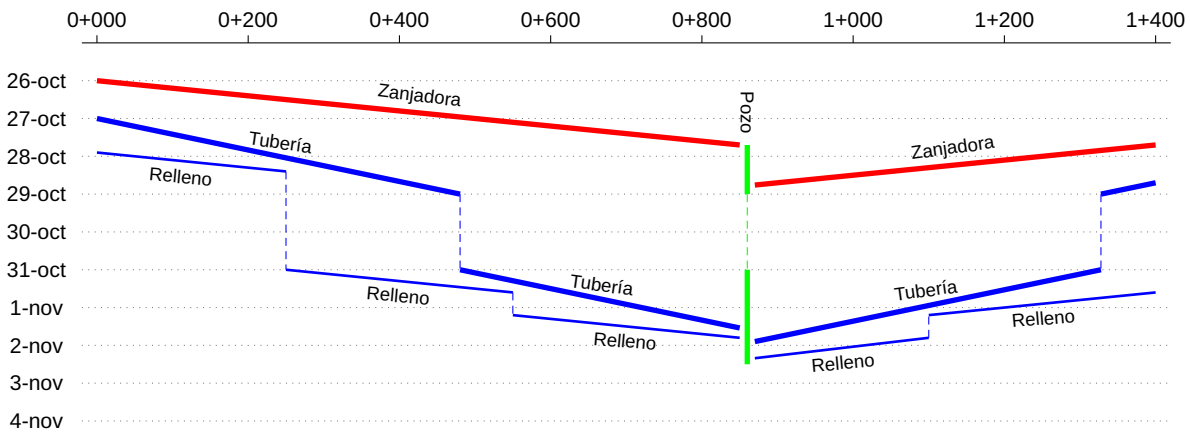


Figura 10: Ejemplo de diagrama espacio-tiempo.

Supongamos que en este ejemplo se está representando un proyecto consistente en abrir una zanja con una máquina zanjadora (figura ??), colocar un tubo y rellenar la zanja. En el PK 0+860 hay que construir un pozo de registro. En rojo grueso se representa el trabajo de la zanjadora. La pendiente de la línea depende del rendimiento de la actividad, en este caso 500 m/día. Efectivamente, empieza en el PK 0+000 y al cabo de un día está en el PK 0+500. El trabajo de la máquina empieza en el origen de la zanja y se realiza de manera continua hasta el pozo de registro. Una vez allí la máquina se desplaza al final de la zanja y trabaja en sentido contrario hasta el pozo.

Es interesante observar que todas las actividades se detienen los días 29 y 30 de octubre, que puede ser el fin de semana. La actividad representada en azul grueso es la colocación de la tubería, que tiene un rendimiento menor (240 m/día), por lo que la pendiente de la línea es mayor. Esta actividad se realiza con dos equipos, porque el día 27 de octubre comienza un equipo por el principio de la obra, y el día 28 de octubre por el final.

La línea azul fina sería el relleno de la zanja, que es una actividad más rápida, que se hace con un solo equipo que va trabajando por tramos de forma alterna. Finalmente, la línea verde vertical es la construcción del pozo de registro. Al ser una obra situada en una ubicación fija no tiene desarrollo horizontal.

Las reglas de un diagrama espacio tiempo son muy sencillas, pero es una representación muy visual de la forma en que se quiere hacer que avancen los trabajos. Si dos líneas se cortan, significa que coinciden en el tiempo y en el espacio, lo cual puede ser posible, pero puede que no. Si se conocen los rendimientos se conocen las pendientes, y eso permite hacer una programación desde el inicio o desde el final de una actividad. También las direcciones en las que se avanza quedan perfectamente reflejadas, así como los recursos sobre asignados. En la figura ?? la línea azul grueso aparece el día 31 de octubre simultáneamente en torno al PK 0+600 y al PK 1+000, lo que es posible si se han previsto dos equipos.

Obsérvese que no sería fácil representar esta obra en un diagrama de Gantt si no se separan las actividades por tramos (figura ??).



Figura 11: Zanjadora (fuente: Cubica zanjadoras)

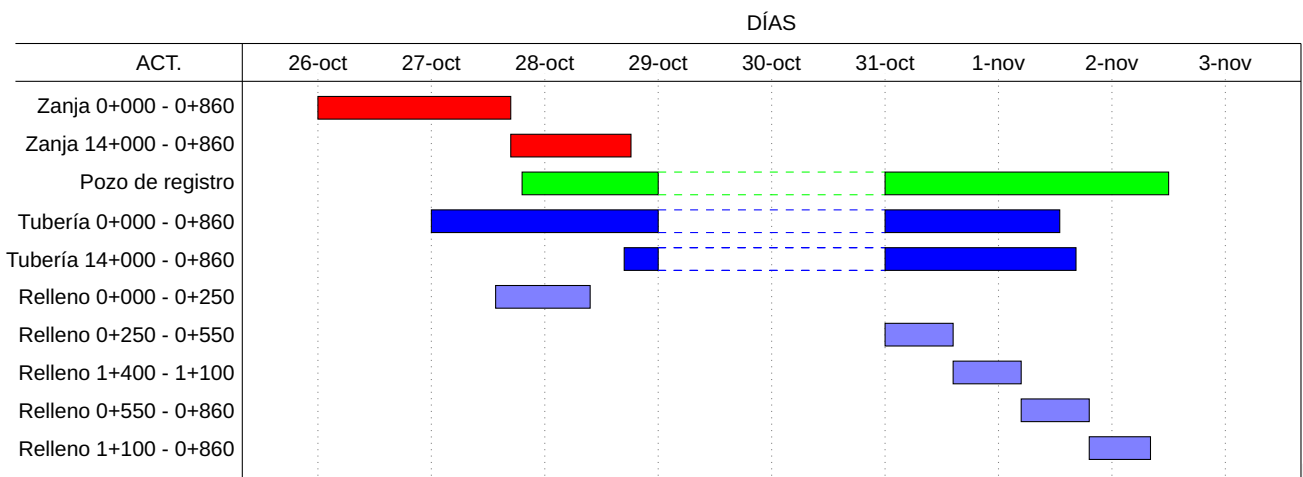


Figura 12: Diagrama de Gantt del ejemplo anterior.

A diferencia del diagrama espacio-tiempo en un diagrama de Gantt no están reflejados los sentidos de trabajo, lo cual puede ser un aspecto importante del proyecto en una obra lineal.

Por lo demás, el diagrama espacio-tiempo tiene los mismos inconvenientes que el diagrama de Gantt, y es que depende de una escala temporal y de una escala espacial, lo que hace que en proyectos de gran envergadura es difícil manejar estos diagramas sin la ayuda de un software para ello (figura ??).

## 4.2. Líneas de balance

Las líneas de balance son una generalización de los diagramas espacio-tiempo adaptadas a obras repetitivas, pero que no tienen necesariamente una dimensión física. Por ejemplo, imaginemos que se van a instalar paneles solares en un campo (figura ??), y en cada panel se tendrán que hacer una serie de actividades como podrían ser:

- Excavación de la cimentación.

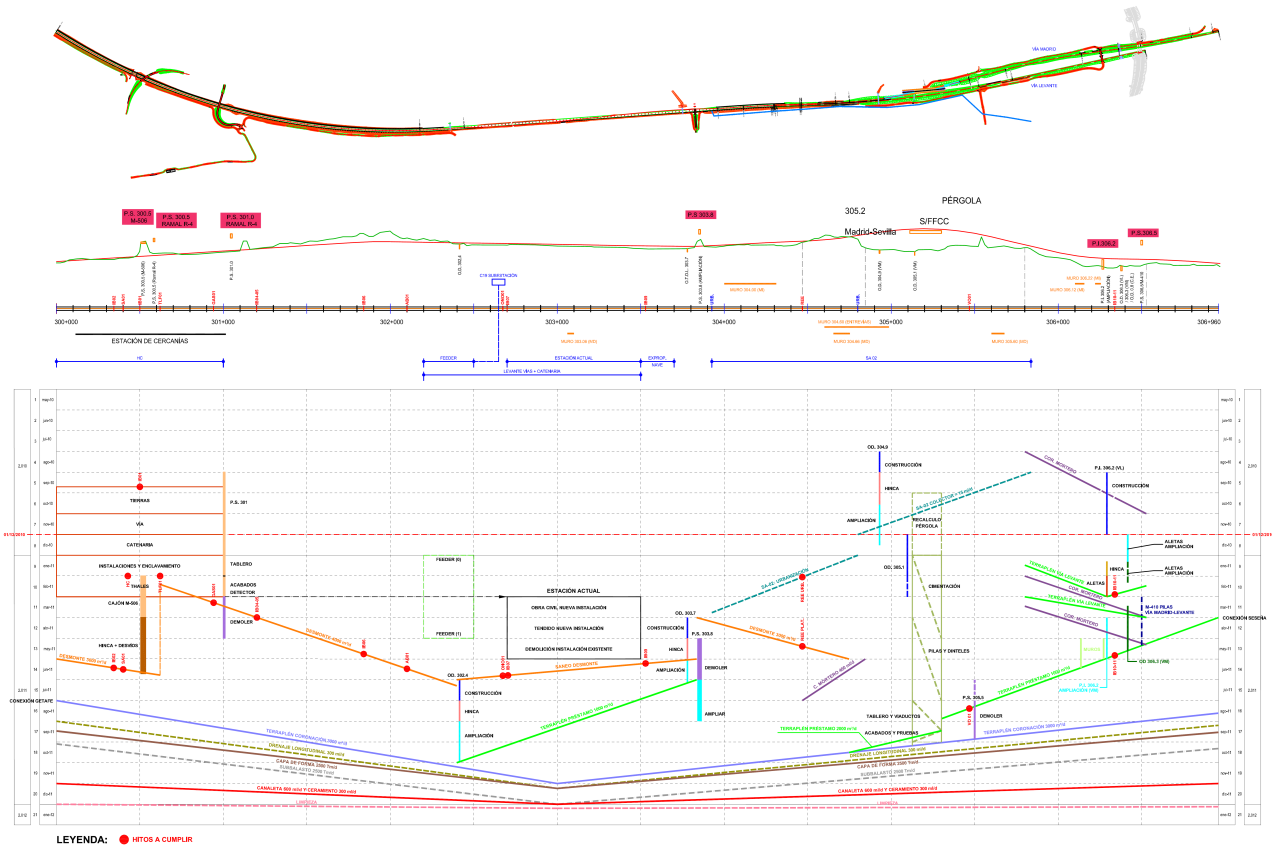


Figura 13: Diagrama espacio-tiempo de una obra real (fuente: Rover-Iberovías)

- Hormigonado de la zapata.
- Montaje de pies y bastidor de los paneles.
- Montaje de las placas solares.
- Conexión de las acometidas eléctricas.

Si hay 15 paneles solares, el diagrama de líneas de balance de la figura ?? está indicandola siguiente secuencia de construcción:

- Las excavaciones se hacen de forma ordenada desde el panel #1 hasta el #15, en una secuencia ininterrumpida a razón de cinco paneles cada 3 días, ocupando 9 días en total.
- Los hormigonados de las cimentaciones se concentran en tres días, hormigonando cinco paneles en cada jornada: los días 4 (paneles #1 a #5), 7 (paneles #6 a #10) y 10 (paneles #11 a #15).
- El día 6 se inicia el montaje de los bastidores. Un primer equipo de montadores empieza en el panel #1, y avanza consecutivamente. El día 8 se incorpora un segundo equipo de montadores que coloca los bastidores de los paneles empezando por el #6. El primer equipo llega hasta el #5 y «salta» al #11, mientras que el segundo equipo termina en el #10, y pasa a montar las placas solares del panel #1.
- El primer equipo de montadores comienza a montar placas solares el día 18, cuando termina de montar bastidores. Este equipo comienza por el panel #6. El otro equipo termina en en panel #5, y «salta» al #11.
- Finalmente, las acometidas eléctricas las comienza el primer equipo, cuando termina de colocar las placas solares del panel #10, empezando por el panel #1, y el segundo equipo comienza las acometidas desde el panel #15, en el que ha terminado el montaje de las placas solares, y avanza en sentido inverso hasta el panel #11.

Las obras duran 34 días, pero se requieren dos equipos de montadores.



Figura 14: Instalación de energía solar fotovoltaica (fuente: Poweringsc)

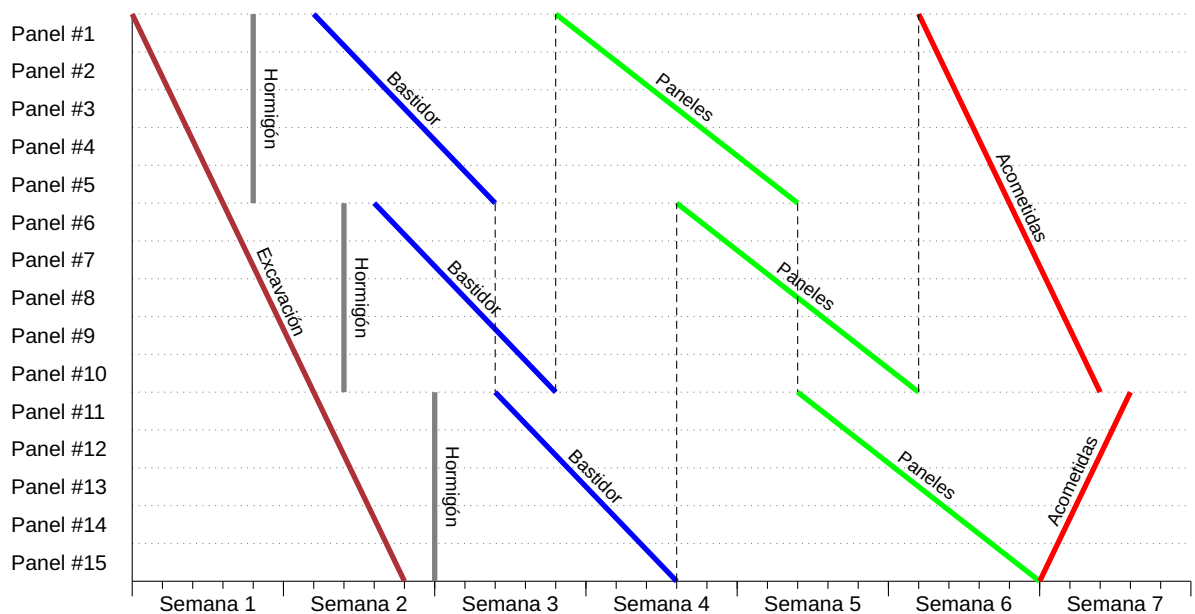


Figura 15: Ejemplo de diagrama de líneas de balance.

Como se ve es una representación muy similar a los diagramas espacio-tiempo, y rigen las mismas reglas: si dos líneas se cortan, significa que dos actividades coinciden en el tiempo y en el espacio, lo cual puede no ser posible. Si se conocen los rendimientos se conocen las pendientes, y eso permite hacer una programación desde el inicio o desde el final de una actividad. También las direcciones en las que se avanza quedan perfectamente reflejadas, así como los recursos sobre asignados. De nuevo, en los diagramas de carga se depende de una escala temporal y de una escala física, lo que dificulta su aplicación en proyectos de más envergadura. Basta imaginar una instalación de cientos de placas solares.



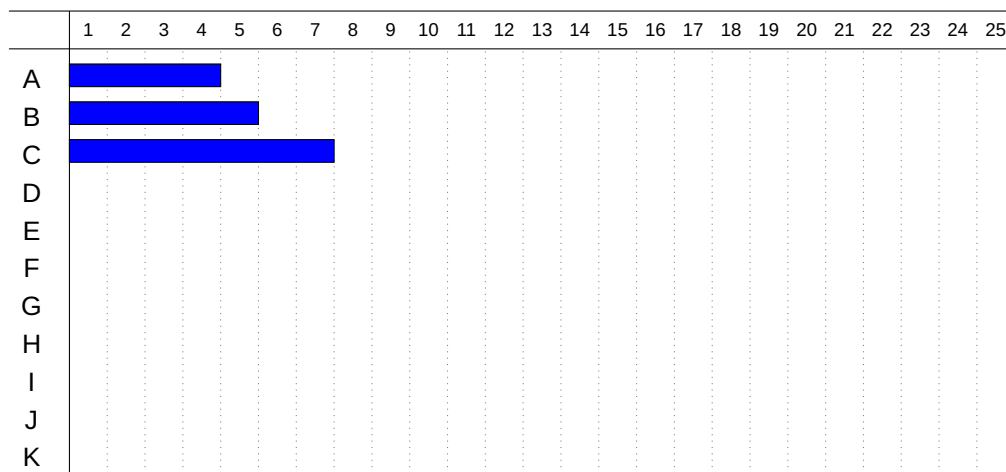
## EJERCICIOS RESUELTOS

### Ejercicio 1

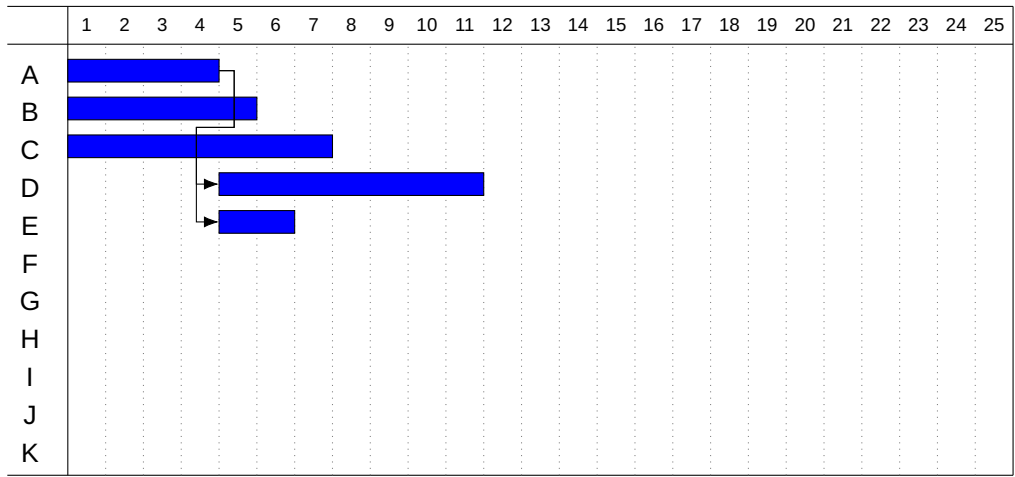
Dibujar el diagrama de Gantt correspondiente a las actividades cuyas duraciones y restricciones se dan a continuación:

Actividad	Duración	Precedencia
A	4	–
B	5	–
C	7	–
D	7	A
E	2	A
F	4	B,E
G	5	B,D,E
H	2	B,C,D,E
I	2	F
J	3	F
K	4	G,H,I,J

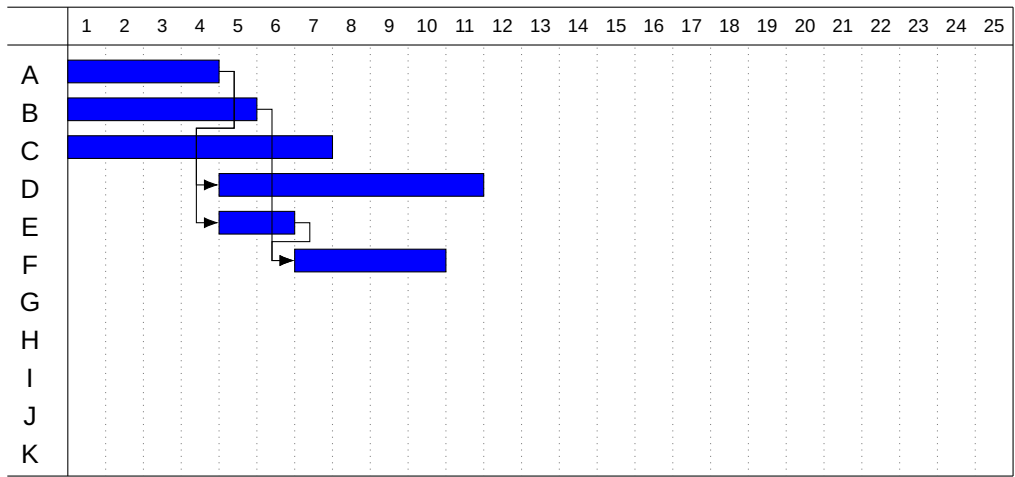
**Solución** En las figuras que siguen se construye el diagrama de Gantt paso a paso. En primer lugar se pueden colocar en el diagrama las actividades que no tienen precedencia. En este caso son las actividades A, B y C como rectángulos tan largos como sus duraciones:



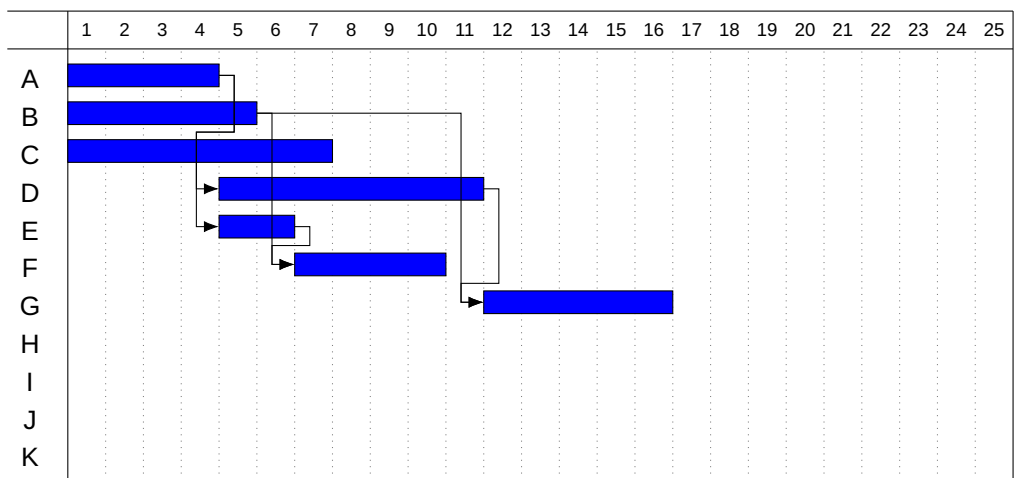
A continuación se pueden representar las actividades D y E, que están subordinadas al final de la actividad A. Por ello deben comenzar el día 5:



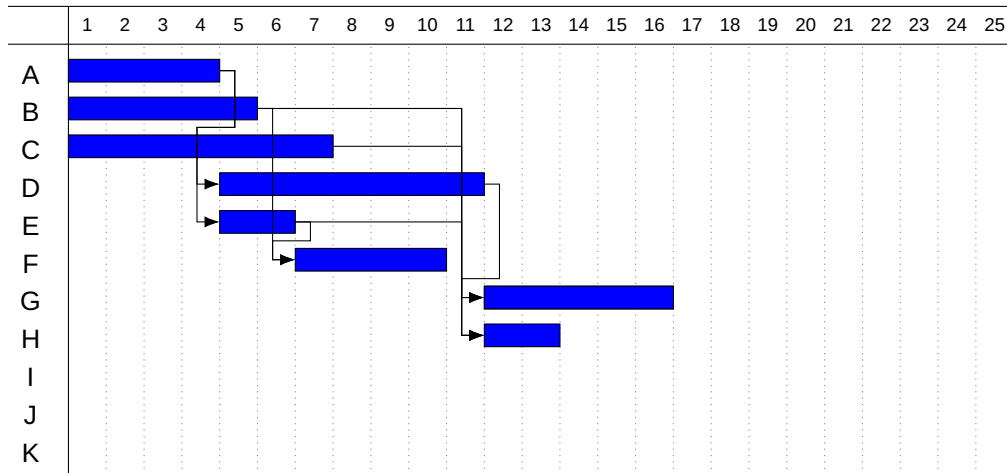
La actividad F está subordinada a las actividades B y E. Dado que la E termina más tarde será la que determine la posición del inicio de F:



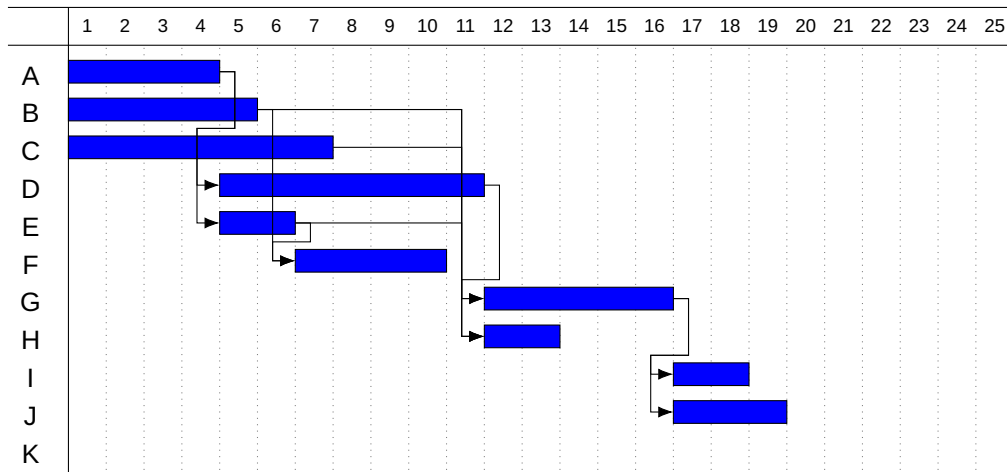
La actividad G comienza cuando termine la D, porque la B termina mucho antes.



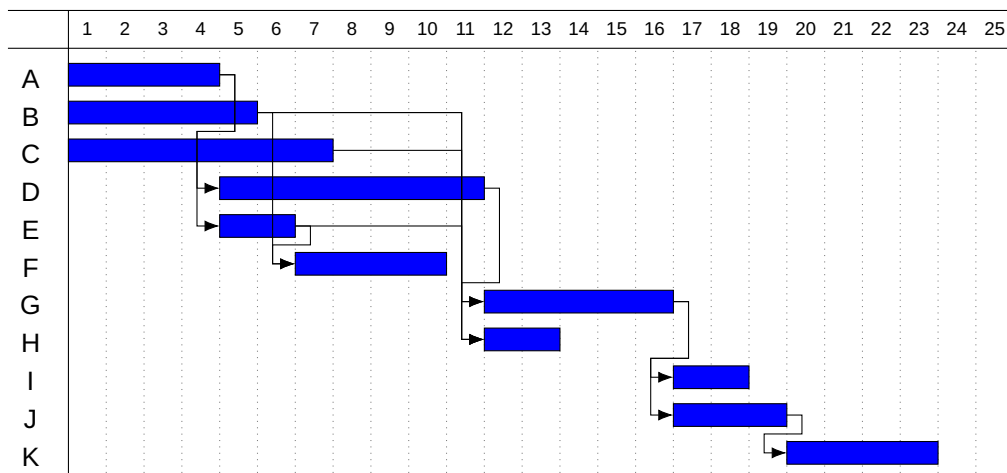
Lo mismo sucede con la actividad H, que aunque su inicio depende de B, C, D y E, es la actividad D la que determina el comienzo de H.



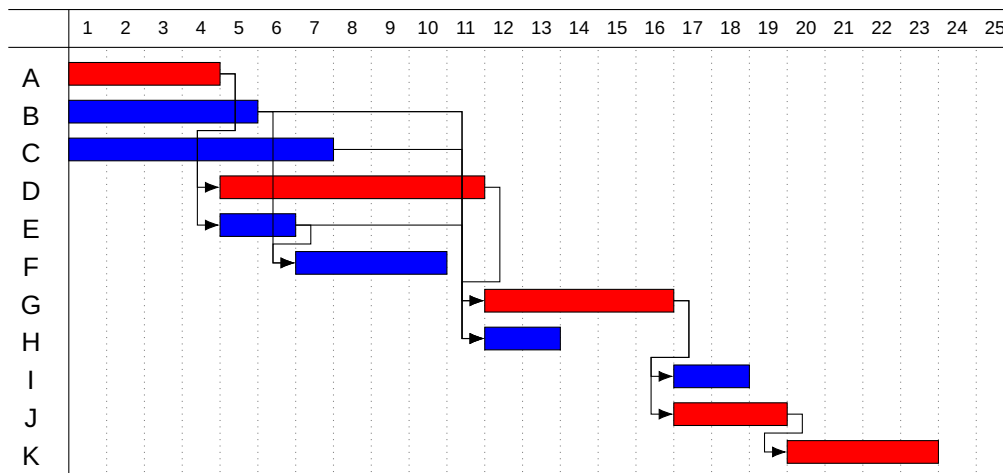
Las actividades I y J están condicionadas por la actividad G.



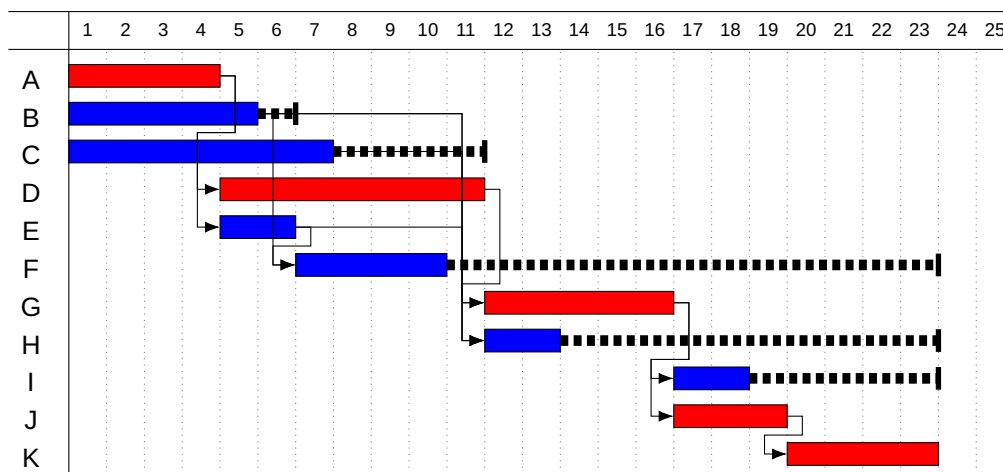
Y finalmente, la actividad K lo está por la J, porque finaliza ésta antes que la G, la H o la I.



En el diagrama final se observa que el proyecto tiene una duración de 23 días. Además, se observa que el camino crítico viene dado por las actividades A, D, G, J y K.



Podemos representar también las holuras de las actividades no críticas:

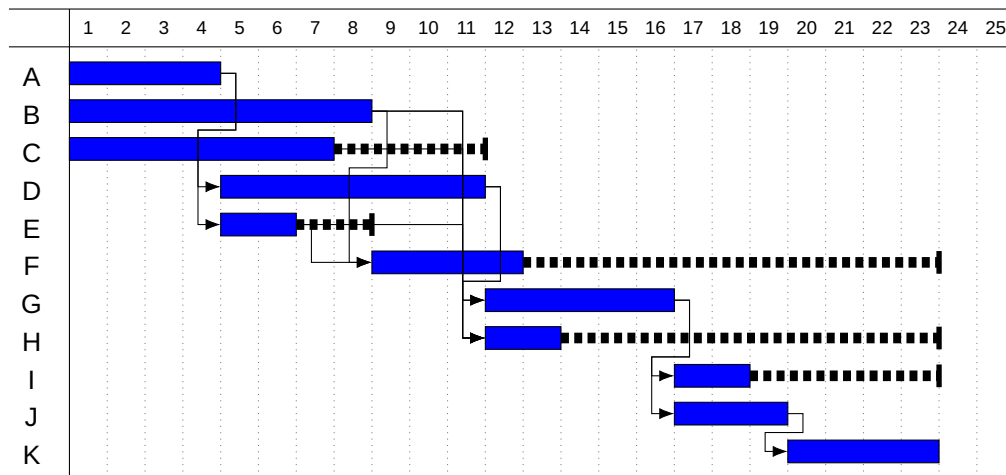


## Ejercicio 2

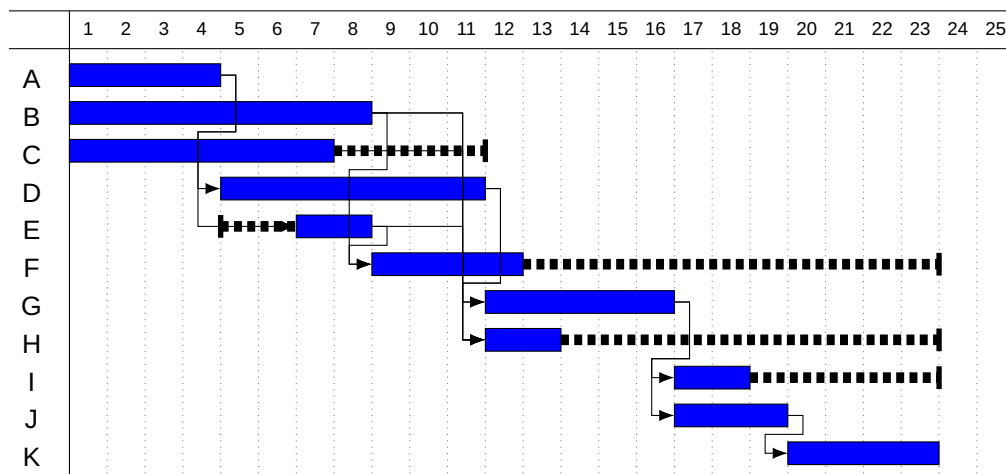
Averiguar qué pasaría en el programa de trabajos del ejercicio anterior, si la actividad B dura 3 días más de los previsto. Averiguar en ese caso cuánto podría demorarse el inicio de la actividad E, sin afectar al resto del proyecto.

**Solución** La actividad B es la actividad principal de tres restricciones, con las actividades F, G y H. En el diagrama del ejercicio anterior se puede observar que el día 6 la actividad B ha terminado, pero las subordinadas no han comenzado, porque están condicionadas por el resto de actividades. La primera actividad de las tres que comienza es la F, que lo hace el día 7. Por tanto, si la actividad B se retrasa un solo día no afectaría al resto de trabajos, pero al retrasarse tres, los otros dos días hace que se retrase el inicio de la actividad F, que comenzará ahora al día 9 en lugar del 7. Dado que ya no hay ninguna actividad con restricciones con F, basta retrasar dos días esta actividad.

El diagrama final quedaría como sigue:



En cuanto a la actividad E es fácil ver que puede demorar su inicio dos días, puesto que la primera restricción que depende de ella es la actividad F, que no puede comenzar de ningún modo antes del día 9. Por tanto la actividad E tiene dos días de holgura, como se ve a continuación:



### Ejercicio 3

En una vía de ferrocarril se están montando barreras antiruido (figura ??) en un tramo de 4.0 km, para lo cual se usa una máquina sobre la vía que perfora un agujero cada 5 metros. Por detrás una cuadrilla coloca una armadura y las esperas en los agujeros, y los rellena de hormigón. Más tarde, cuando el hormigón lleva un par de días fraguado se sueldan postes metálicos y se colocan los paneles entre ellos.



Figura 16: Muro antiruido sobre pilotes de hormigón (fuente: INSAMETAL)

Las tareas y rendimientos son:

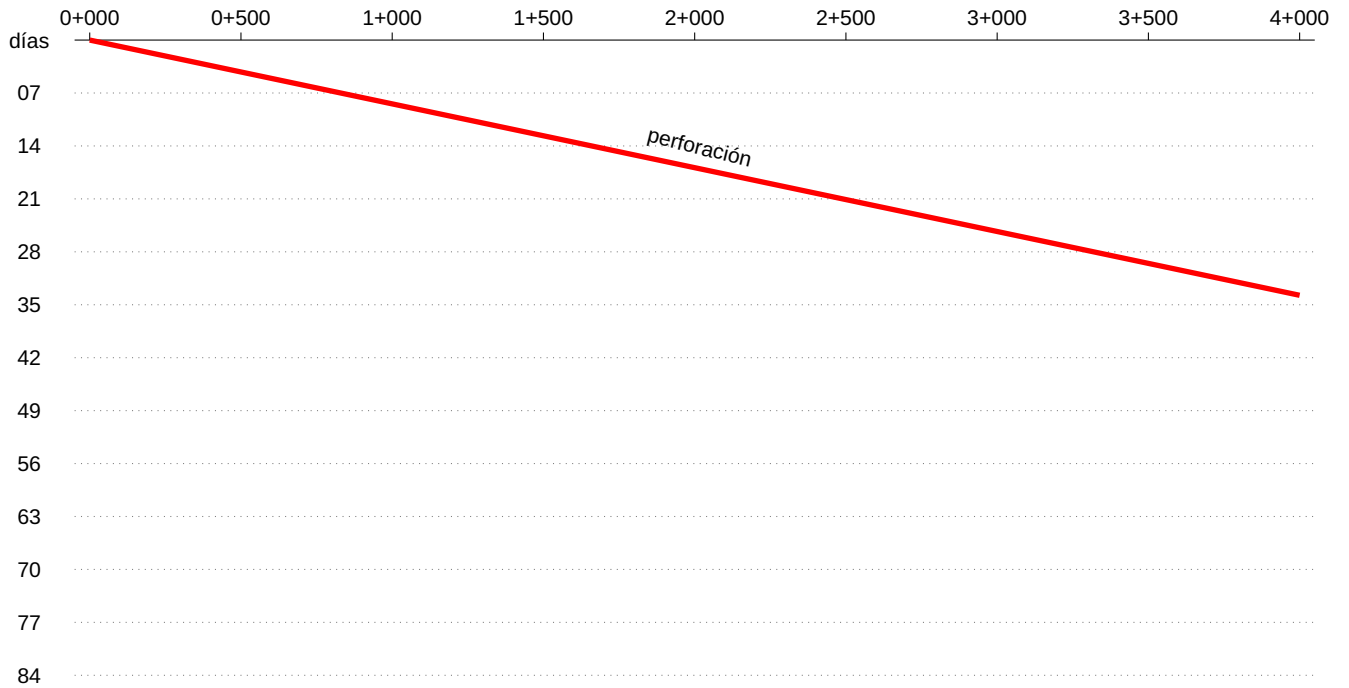
- Perforación de las cimentaciones: 24 pilotes/día
- Armado y hormigonado de las cimentaciones: 12 pilotes/día
- Aplomo y soldadura postes: 40 pilotes/día
- Colocación de los paneles: 25 tramos/día.

Se pide: programar el proyecto en diagrama espacio tiempo para completarlo en el menos tiempo posible, sabiendo que todas las actividades se hacen por la vía, es decir, solo se puede acceder a la obra por un extremo. Suponer también que se trabaja 7 días a la semana.

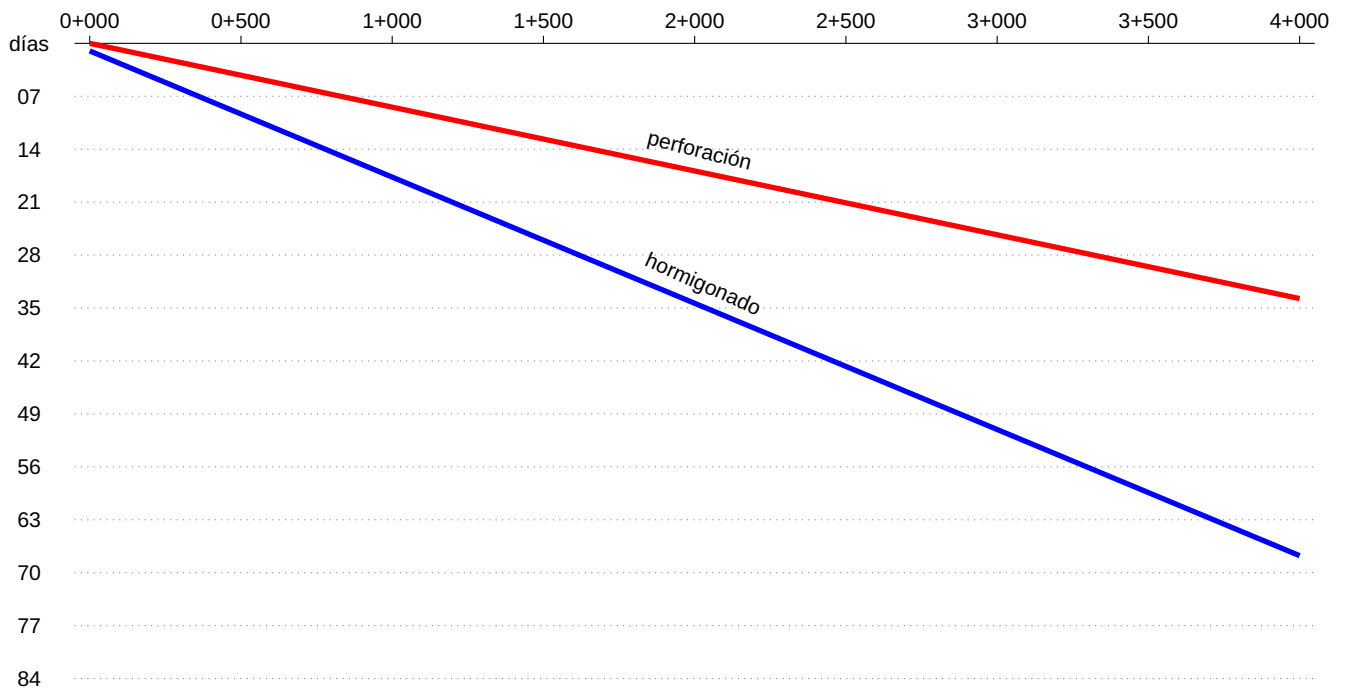
**Solución** Lo primero que hay que determinar es el número de pilotes, postes y tramos a ejecutar. En 4 km se tendrá:

$$N_{\text{tramos}} = \frac{4000}{5} = 800$$

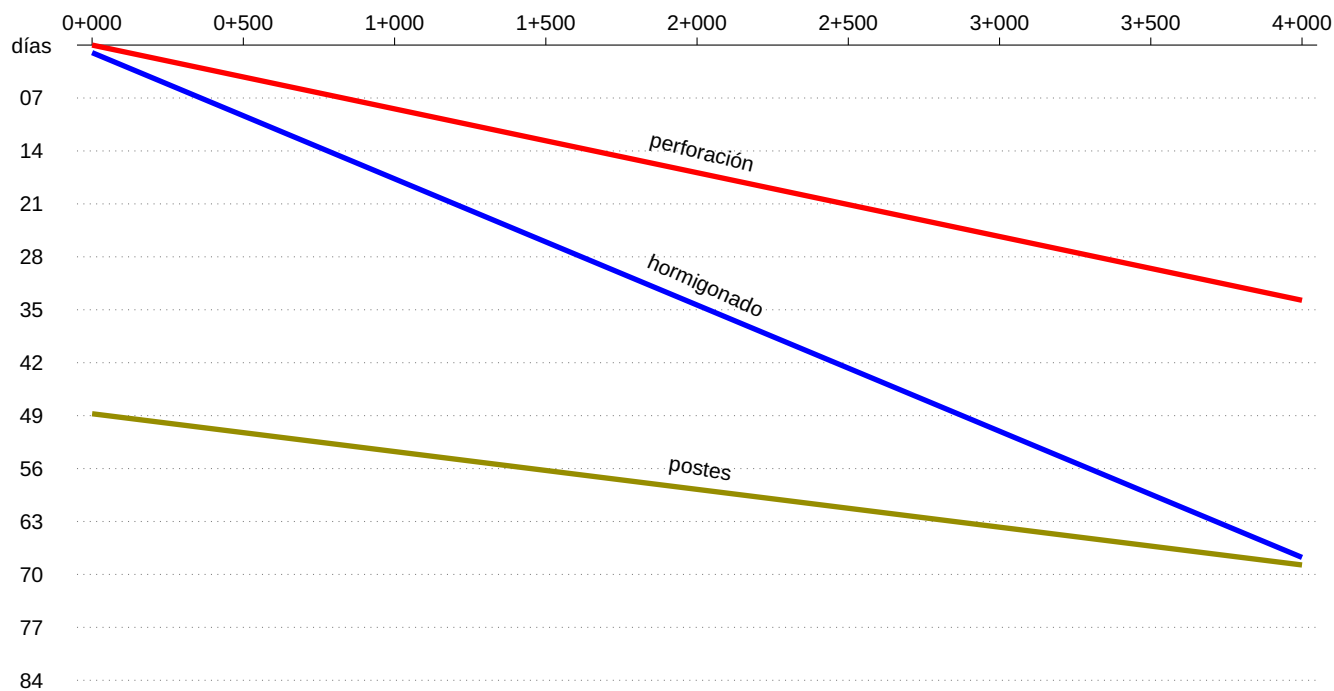
y  $N_{\text{postes}} = N_{\text{tramos}} + 1$ . Con los rendimientos que se tienen la actividad más lenta es el armado y hormigonado de los pilotes. Todas las demás actividades se deben calendarizar para adaptarse a ella. La primera actividad es más rápida, por lo que puede comenzar desde el principio no detenerse hasta completarla:



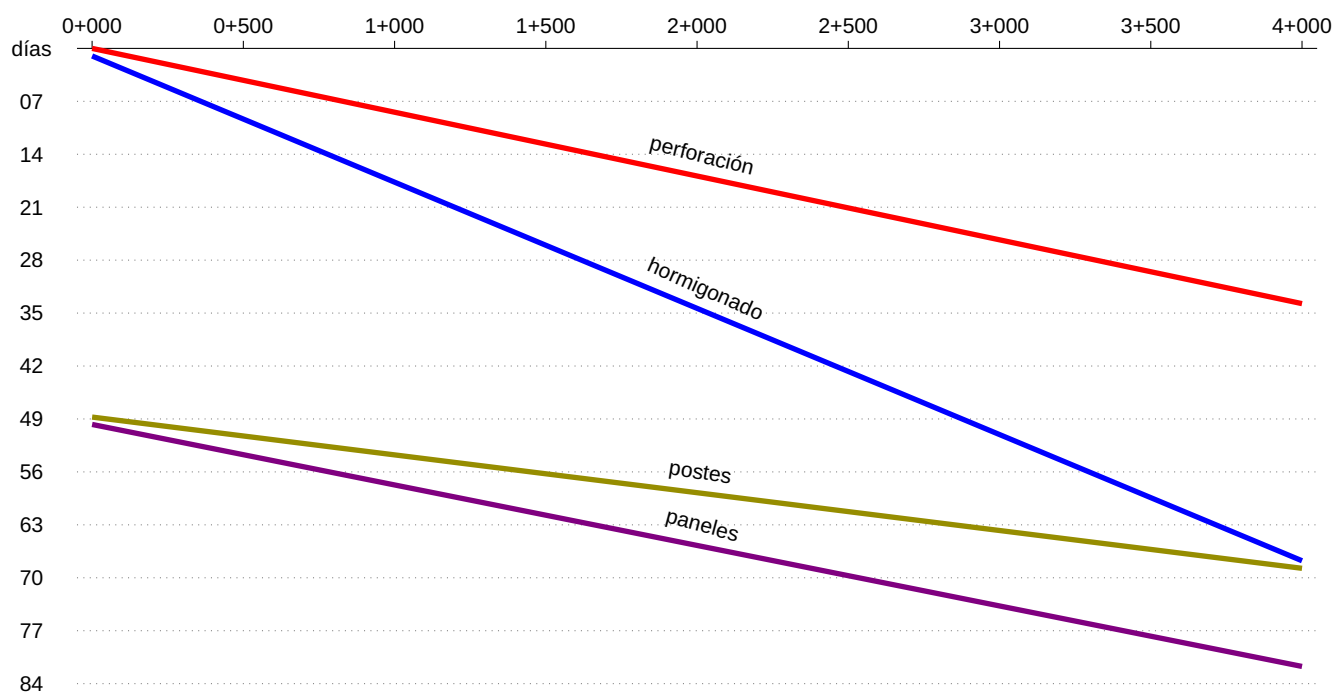
La segunda actividad, más lenta, comienza al día siguiente de la primera, y tampoco se interrumpe hasta el final:



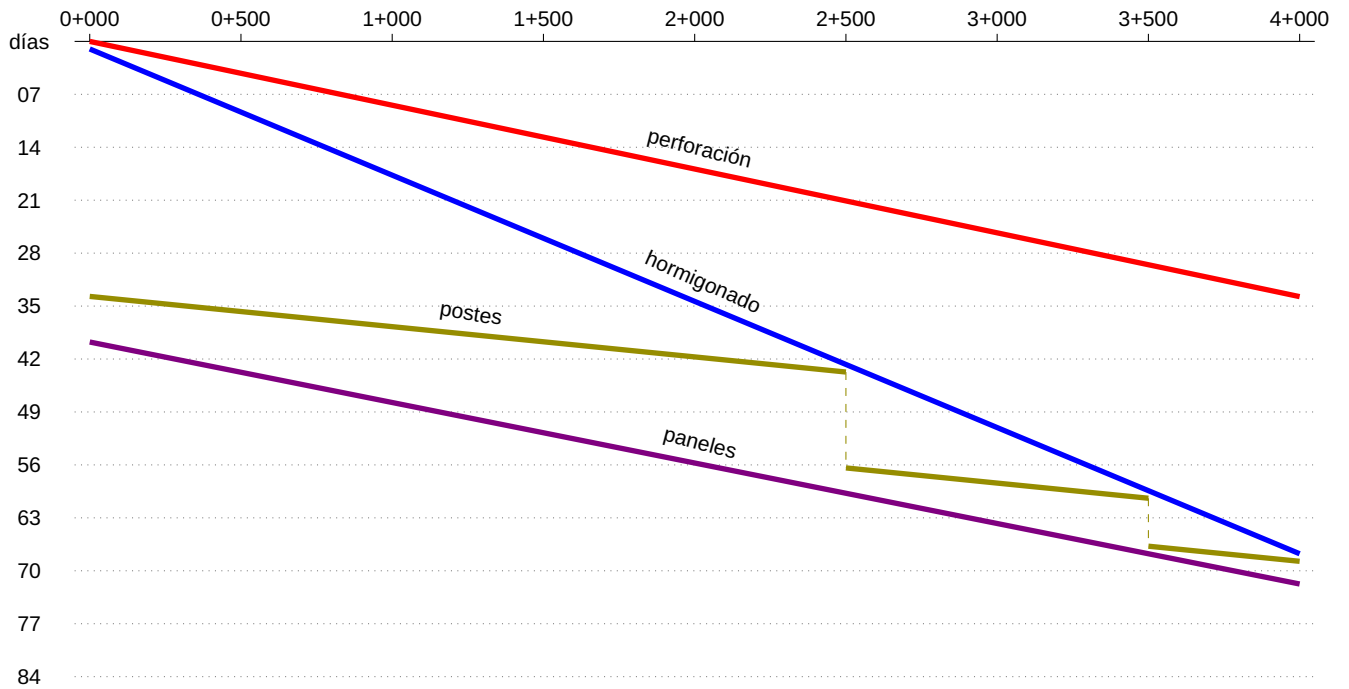
La tercera actividad puede programarse para terminar un día después de la anterior, ya que es más rápida, y así se hace sin interrupciones.



Y finalmente, la colocación de paneles, que es más lenta que la anterior, puede comenzar al día siguiente de comenzar esa:



Este programa muestra que la actividad más lenta, el hormigonado de los pilotes, condiciona el final de los trabajos, porque indirectamente retrasa el final de la última actividad, la colocación de los paneles. Pero esto se puede remediar si se programa para no retrasar mucho el final de la colocación de los postes, y se programa por tramos:





## Referencias

- [1] Fernando Acebes Senovilla, David. Poza García, Adolfo López Paredes y Asociación para el Desarrollo de la Ingeniería de la Organización. *Aplicaciones informáticas para la gestión de proyectos*. spa. Ingeniería de la organización. Madrid: Dextra, 2022. ISBN: 9788417946784.
- [2] H. Kerzner. *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*. Wiley, 2025. ISBN: 9781394290031. URL: <https://books.google.es/books?id=Jr1HEQAAQBAJ>.
- [3] 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.
- [4] Erik Leuven Demeulemeester y Willy S Herroelen. *Project scheduling*. en. International Series in Operations Research & Management Science. New York, NY: Springer, abr. de 2013.

