

### 7.1.6.3.2 Formalización general

Vamos a traducir a continuación las observaciones anteriores en una formalización general; construiremos las ecuaciones correspondientes y describiremos las líneas principales del algoritmo de resolución utilizable.

Consideraremos el grafo representativo del proyecto, versión PERT, es decir, un grafo sin bucles ni circuitos  $G = (X,U)$ , cuyos vértices forman el conjunto  $X$  y cuyos arcos forman  $U$ . Dado un vértice  $x$ , denominaremos  $G \cdot x$  al conjunto de siguientes inmediatos de  $x$ , y simétricamente  $G' \cdot x$  al conjunto de anteriores inmediatos. Existen dos vértices únicos especiales  $P$  y  $F$ , tales que  $P$  no posee precedentes ni  $F$  siguientes:

$$G' \cdot P = \phi \qquad G \cdot F = \phi$$

Cada arco  $(i,j) \in U$  corresponde a una actividad cuya duración  $d_{ij}$  está comprendida entre dos límites:

$$a_{ij} \leq d_{ij} \leq b_{ij} \qquad [1]$$

correspondiéndole un coste:

$$K_{ij} = KN_{ij} + c_{ij} \cdot (b_{ij} - d_{ij}) = m_{ij} - c_{ij} \cdot d_{ij} \qquad [2]$$

siendo  $KN_{ij}$ ,  $m_{ij}$ ,  $c_{ij}$  parámetros asociados a la actividad. Elegidos unos ciertos valores de  $d_{ij}$  compatibles con [1] podemos determinar las fechas de realización de las etapas eligiendo unos valores  $t_j$  tales que satisfagan:

$$t_P = 0 \qquad [3]$$

$$t_j \geq t_i + d_{ij} \quad \text{a todo } i \in G' \cdot j \quad \text{para } j \text{ diferente de } P$$

La duración del proyecto  $D$  será:

$$D = t_F \qquad [4]$$

y el coste asociado:

$$K = \sum_{(i,j) \in U} K_{ij} = \sum_{(i,j) \in U} (m_{ij} - c_{ij} \cdot d_{ij}) = M - \sum_{(i,j) \in U} c_{ij} \cdot d_{ij} \qquad [5]$$

Para  $d_{ij} = b_{ij}$  todas las actividades tienen su duración normal, el proyecto tendrá una duración mínima  $D_N$  asociada a un coste  $K_N$  suma de los costes normales de cada actividad. Si  $d_{ij} = a_{ij}$  el proyecto tendrá una duración mínima  $D_A$  aunque el coste  $K_A$  suma de los costes acelerados puede no ser el mínimo coste compatible con dicha duración.

El problema que nos proponemos es el siguiente: dado un valor  $D$  ( $D_A \leq D \leq D_N$ ) determinar los valores  $d_{ij}$  que conduzcan a esta duración mínima del proyecto y *minimicen*  $K$ . Partimos de la consideración de que si  $D > D_N$  el coste mínimo asociado es  $K_N$ , y que si  $D < D_A$  el problema es imposible. La formulación resultante conduce claramente a un programa lineal paramétrico.

La aplicación de la analogía elástica al caso anterior es muy sencilla y equivale a considerar el programa dual; substituyamos las actividades por barras elásticas de longitud  $d_{ij}$  y las etapas por placas. Cada barra estará asociada a una tensión o fuerza  $f_{ij}$  (y el proyecto en conjunto a una  $f$ ) tal que:

si	$t_j - t_i > b_{ij}$	entonces	$f_{ij} = 0$	
si	$t_j - t_i = b_{ij}$	entonces	$0 \leq f_{ij} \leq c_{ij}$	[6]
si	$a_{ij} < t_j - t_i < b_{ij}$	entonces	$f_{ij} = c_{ij}$	
si	$t_j - t_i = a_{ij}$	entonces	$f_{ij} \geq c_{ij}$	

y el problema se transforma en la deformación de la estructura a partir de su posición inicial de equilibrio no tensada hasta la posición definida por  $D$  de manera que la energía absorbida o trabajo desarrollado por las fuerzas  $f_{ij}$  sea mínima.

Los principios de la mecánica indican que se producirá lo anterior cuando la deformación se efectúe en forma reversible, es decir, cuando en todos los estados sucesivos intermedios por los que pasa la estructura desde  $D_N$  a  $D$  sean de equilibrio entre las fuerzas. Por consiguiente se verificarán las ecuaciones:

$$\sum_{i \in G^L \cdot j} f_{ij} = \sum_{h \in G^L \cdot j} f_{jh} \quad \text{para } j \text{ diferente de } P \text{ y de } F$$

[7]

$$\sum_{j \in G^P} f_{Pj} = \sum_{i \in G^L \cdot F} f_{iF} = f$$

siendo el trabajo realizado por las fuerzas  $f_{ij}$  igual al realizado por la fuerza  $f$ , por lo que a partir de los valores de  $f$  y del trabajo realizado por dicha fuerza podremos conocer la variación de energía o coste respecto a  $K_N$  asociado con la duración  $D$ . Como se ha visto esta variación es segmento lineal, debido a que los valores de  $f$  varían en forma discontinua por saltos manteniéndose el mismo valor dentro de intervalos de valores de  $D$ . Por tanto, basta conocer la posición de estos puntos de cambio de valor de  $f$  para poder obtener la relación entre  $D$  y el coste mínimo asociado.

El algoritmo a utilizar es en esencia idéntico al empleado en el ejemplo. Comenzando en la posición de equilibrio no tensada (duraciones normales, duración mínima del proyecto  $D_N$  y coste  $K_N$ ) se determina la fuerza mínima necesaria para deformar la estructura, y luego la deformación máxima compatible con dicha fuerza, pasando a la siguiente posición de equilibrio que corresponde a un punto anguloso de la curva  $(K,D)$ . En la nueva posición se determina en cuánto debe incrementarse la fuerza para continuar la deformación y la posición del siguiente punto anguloso. Se prosigue de esta forma hasta que la estructura se bloquea, al alcanzar la duración  $D_A$ , y no admite más deformaciones. Por tanto hay dos procedimientos básicos para aplicar el algoritmo:

- a) *Procedimiento fuerza*: determinación de la fuerza necesaria para continuar la deformación; es un procedimiento en el que se analiza el equilibrio de fuerzas y se determina la sección de la estructura que ofrece menos resistencia.
- b) *Procedimiento deformación*: determinación de la deformación máxima posible con una fuerza dada; consiste en identificar un cambio estructural en la sección de menor resistencia antes aludida.

#### 7.1.6.3.3 Comparación con los procedimientos tradicionales (algoritmo de Ford-Fulkerson)

El algoritmo de Fulkerson no es más que una sistematización de lo anterior, pero los autores tienden hacia los flujos en los grafos y no hacia la resistencia de estructuras. Se comprende perfectamente que dicho algoritmo posea dos fases completamente distintas que se repiten sucesivamente y que corresponden a la determinación de la fuerza una, y a la deformación de la estructura la otra. La analogía elástica constituye una vía alternativa para enfocar el problema, y permite plantear cierto número de prolongaciones interesantes.

La hipótesis del comportamiento segmentado de la resistencia de las barras, correspondiente a la representación de la *figura 7.1.6.15*, sólo interviene en las ecuaciones [6] por lo que habríamos obtenido conclusiones análogas si la relación resistencia de las barras/longitud de las mismas fuese distinta, dentro de ciertos condicionantes.

La estructura del sistema a resolver, para determinar para un valor de  $D$  dado las duraciones correspondientes al coste  $C$  mínimo, resolución del sistema formado por [1], [3], [4], [5], [6] y [7], considerando como incógnitas  $d_{ij}$ ,  $t_j$ ,  $f_{ij}$  y  $C$ , nos permite postular la posible utilización de un método de relajación similar al método Cross, con ciertas adaptaciones para tener en cuenta las peculiaridades de [6] (discontinuidad de la derivada de  $f_{ij}$  respecto de  $t_j - \bar{t}_j$ ). Esto sería cierto incluso si debiéramos substituir las ecuaciones [6] por otras adecuadas a hipótesis distintas respecto al comportamiento del coste de una actividad en función de su duración (preservando la convexidad).

La forma de actuar numéricamente en el ejemplo queda recogida en las *ocho* tablas de la *figura 7.1.6.22* (correspondientes a las ocho fases), que reproducimos a continuación, y constituyen una generalización del algoritmo de Ford-Fulkerson para determinar el flujo que atraviesa un grafo (hemos añadido la tabla 0 que corresponde a la situación inicial y búsqueda del primer valor de  $f$ ).

		1		2		3		4		
		0		5		8		17		
1	0		4 -	0 3	3 -	1 1				$-\bar{t}_j, \infty$
2	5				2 -	0 1	5 -	3 2		1, +, 3
3	8						8 -	0 3		2, +, 1
4	17	$f = 0$								
		$-\bar{t}_j, \infty$	1, +, 3	2, +, 1	3, +, 1					

Fig. 7.1.6.22 (0)

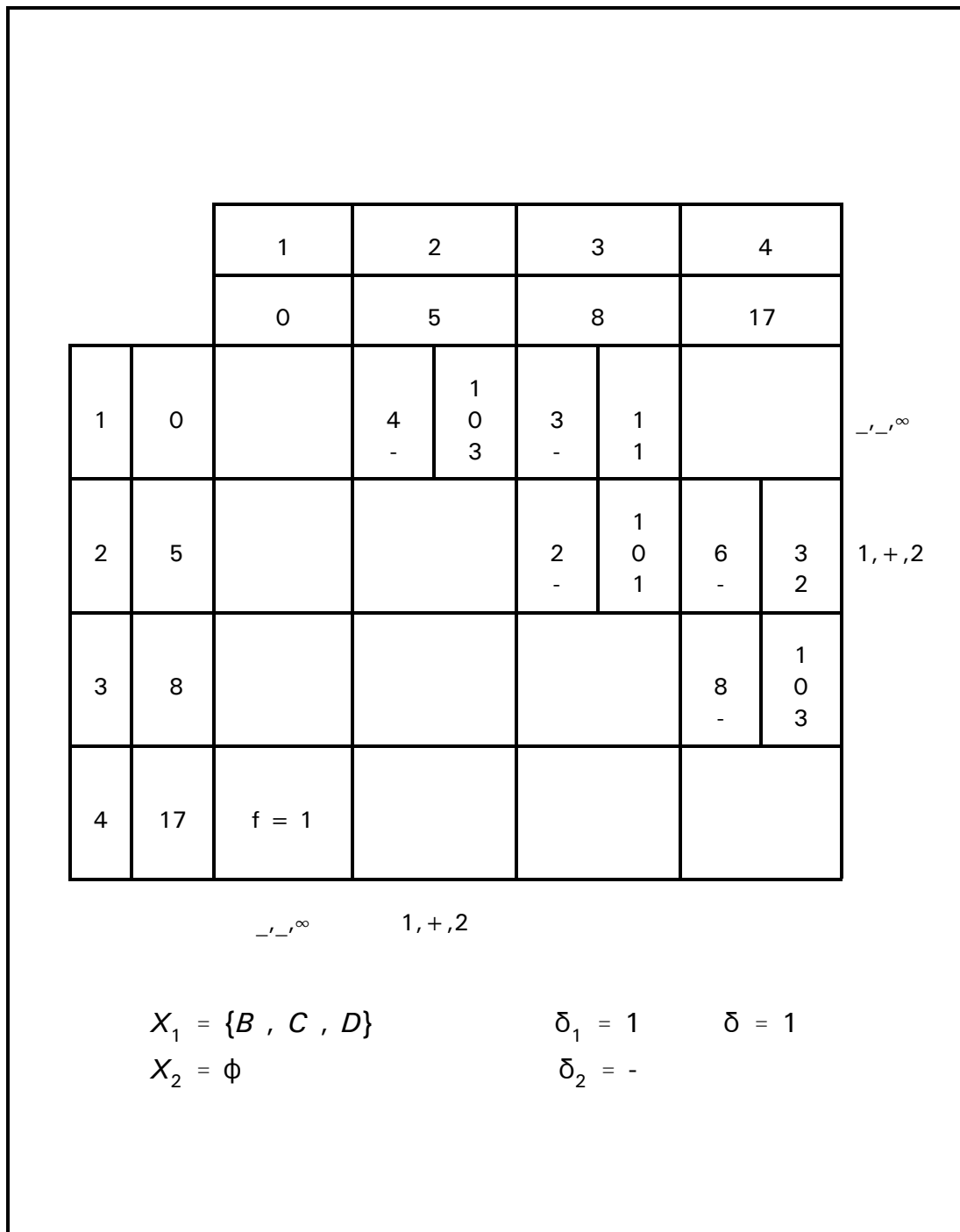


Fig. 7.1.6.22 (1)

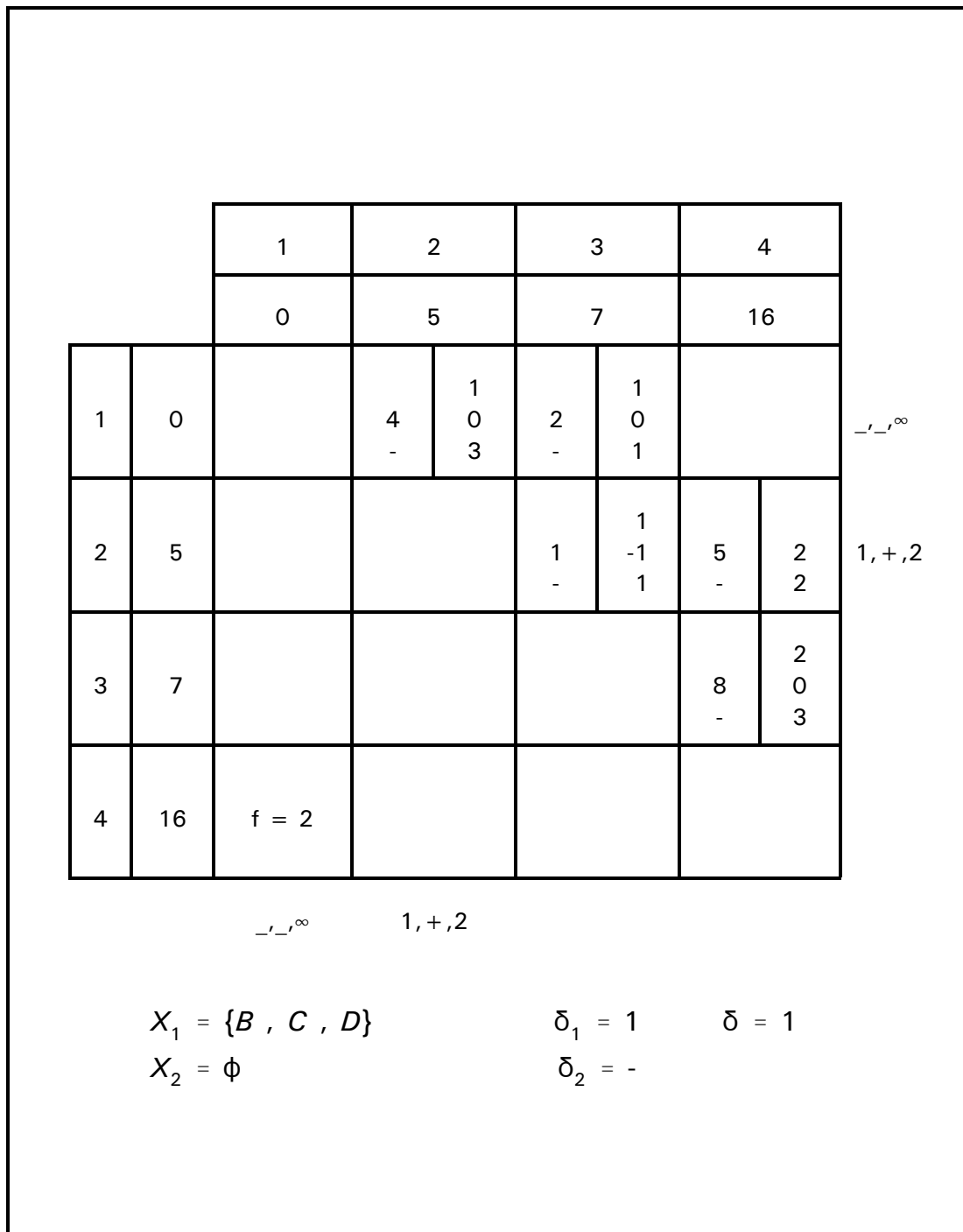


Fig. 7.1.6.22 (2)

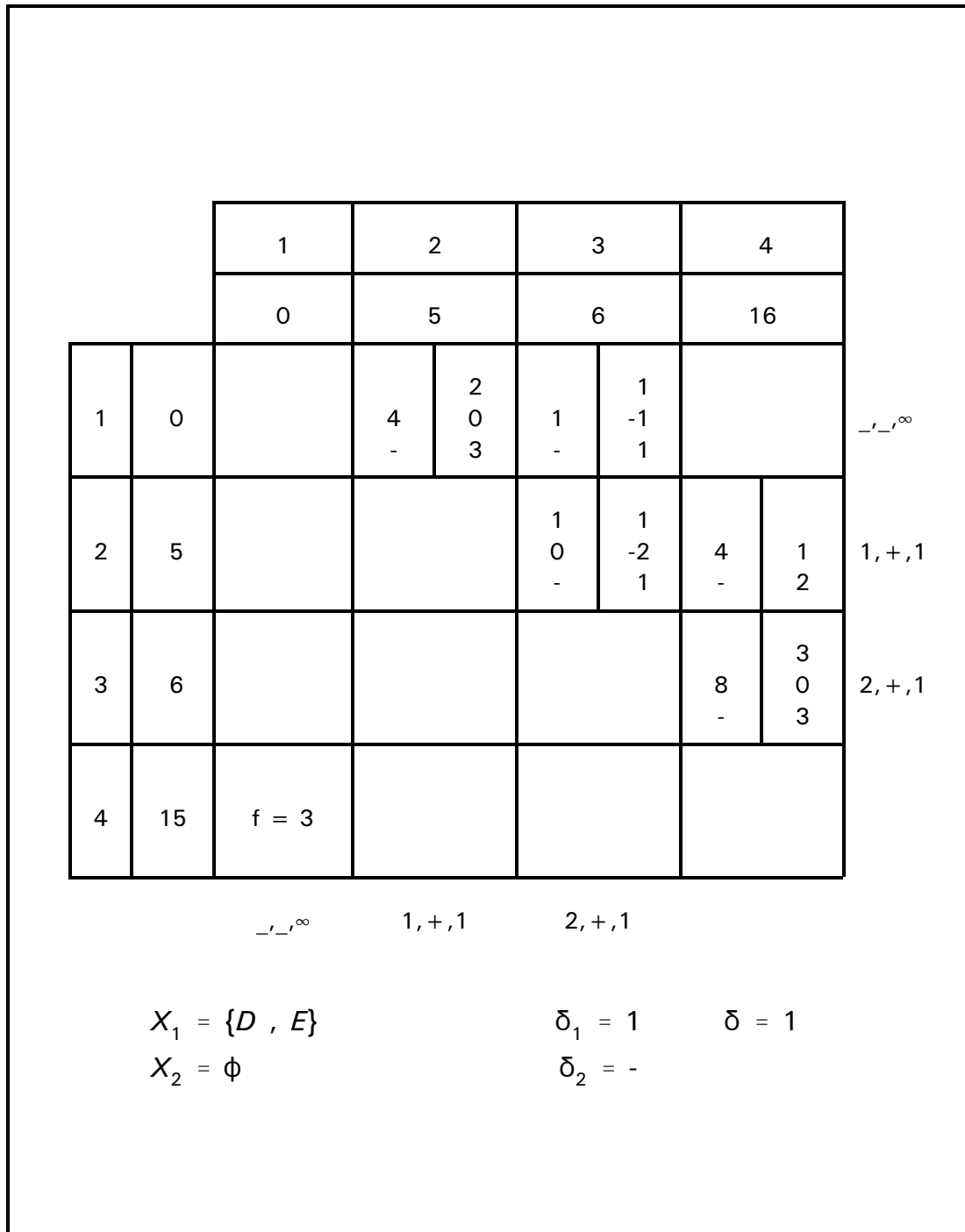


Fig. 7.1.6.22 (3)

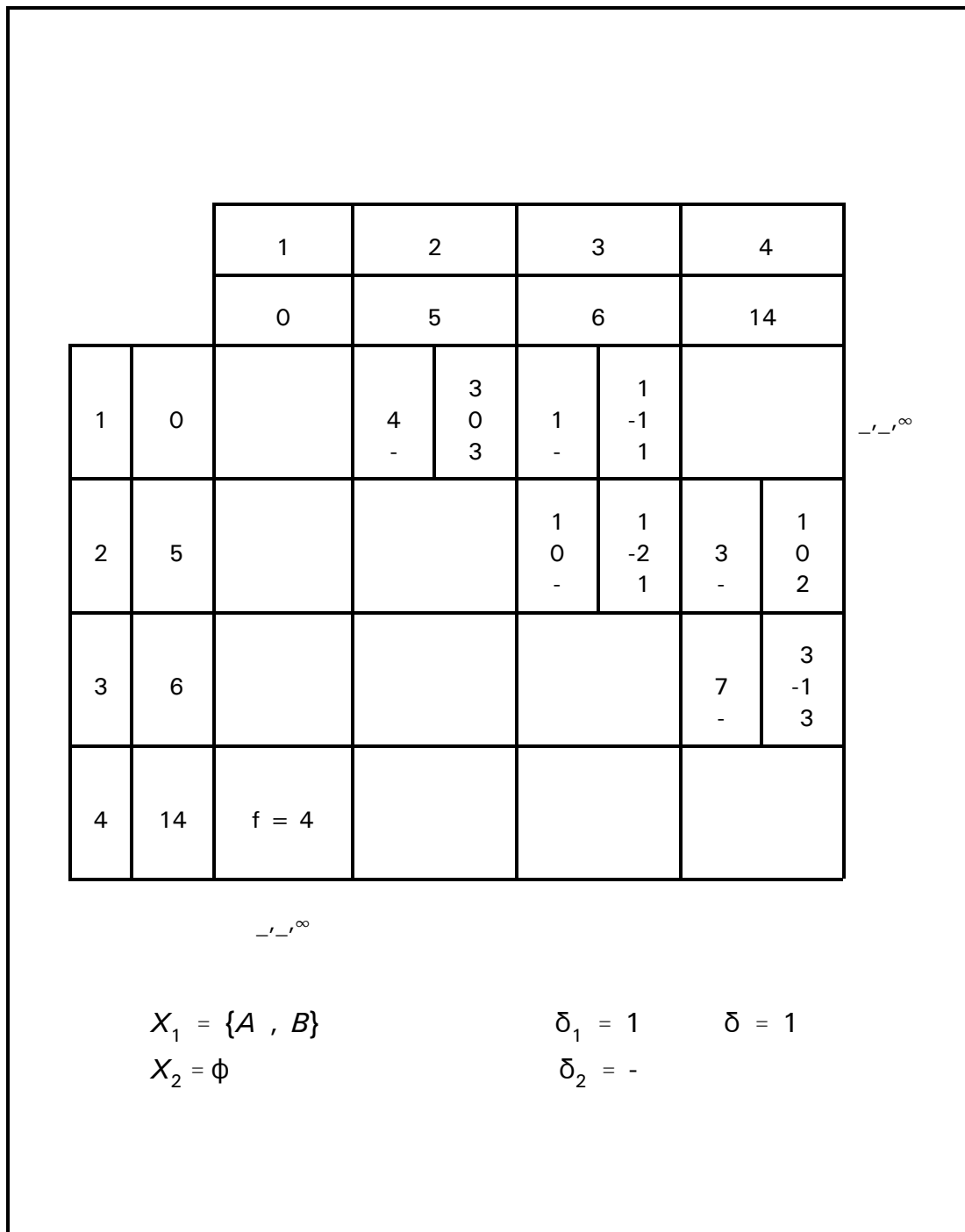


Fig. 7.1.6.22 (4)



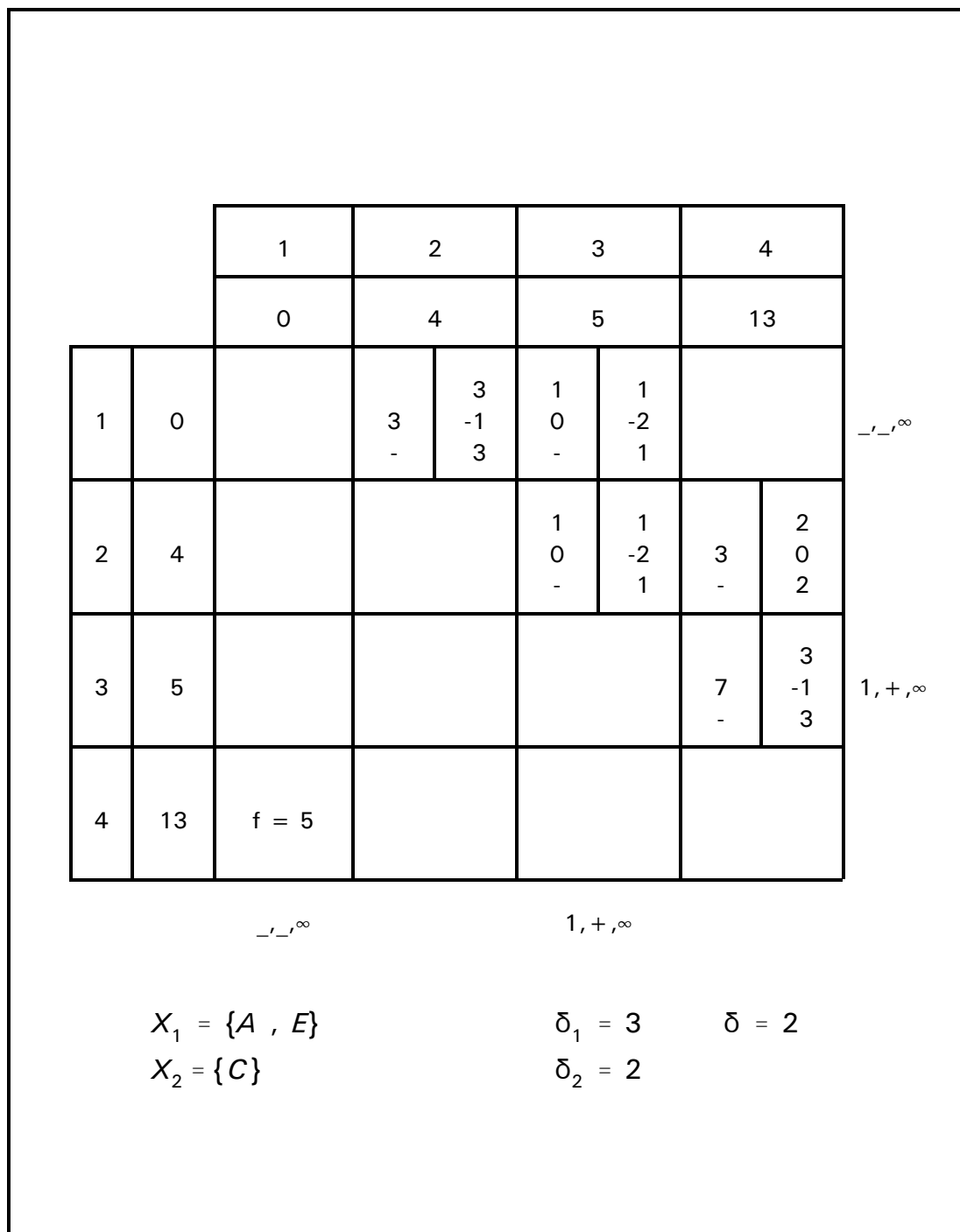


Fig. 7.1.6.22 (5)

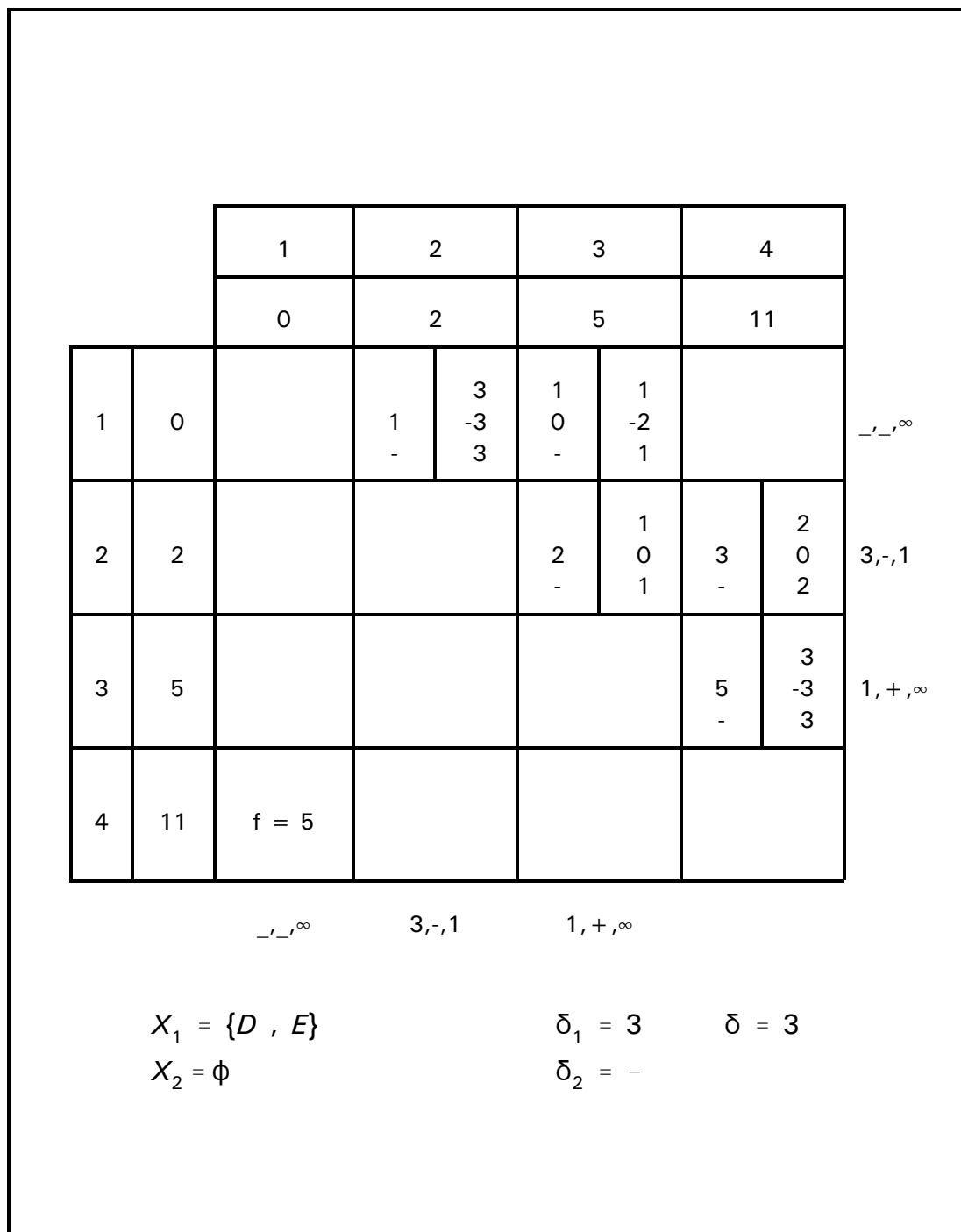


Fig. 7.1.6.22 (6)

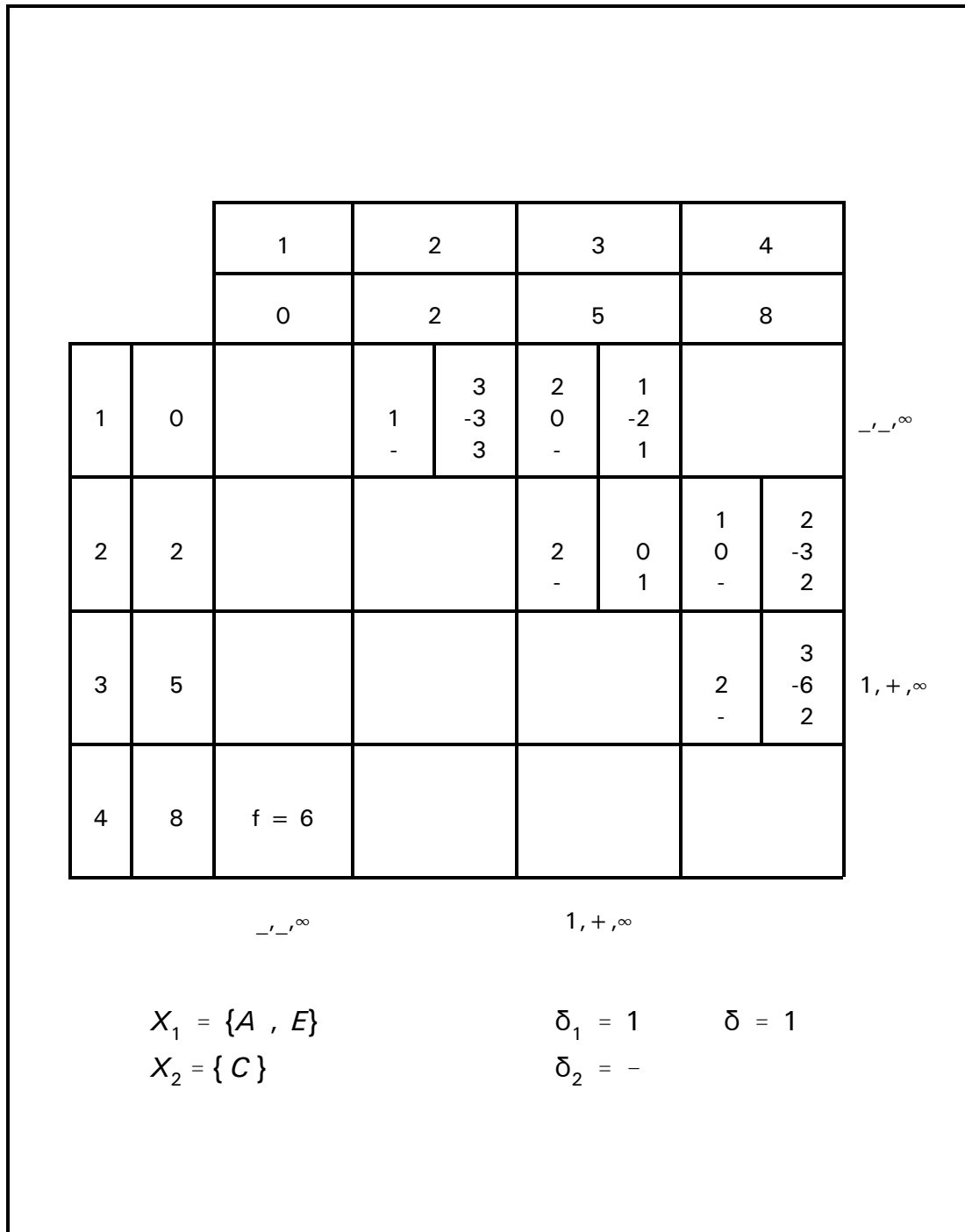


Fig. 7.1.6.22 (7)



En cada tabla figuran en filas y columnas las etapas del grafo, en nuestro caso 1, 2, 3 y 4, con sus fechas (mínimas) correspondientes, calculadas inicialmente mediante un procedimiento de los ya descritos en los problemas potenciales, utilizando las duraciones normales. Las casillas ocupadas de las tablas corresponden a los arcos del grafo y se han dividido en seis partes, dos columnas de tres casillas; cada una de dichas columnas corresponde a una etapa de "resistencia" distinta de la barra o actividad. La de la izquierda corresponde a la resistencia infinita (barra bloqueada) y la de la derecha a la resistencia  $c_{ij}$  (barra deformada). No existe ninguna columna para la resistencia cero (barra libre), que sería redundante, pero se comprende fácilmente que podrían existir más de dos columnas si la relación duración/coste fuese segmento lineal con varios segmentos, en cuyo caso cada columna correspondería a una resistencia diferente, aumentando la misma de derecha a izquierda. Cada columna está dividida en tres casillas, como se ha dicho, que de abajo a arriba corresponden a:

Resistencia	( - ó $c_{ij}$ )
Margen	( $t_j - t_i - a_{ij}$ ó $t_j - t_i - b_{ij}$ )
"esfuerzo" realizado por la barra	

Salvo la resistencia las demás indicaciones varían a lo largo de la aplicación del algoritmo. Este tiene las dos partes indicadas: en la primera se determina el flujo máximo que puede atravesar el grafo, teniendo en cuenta solamente aquellos arcos en que uno de sus márgenes es nulo y asignándole una capacidad igual a la resistencia de la columna de dicho margen nulo; hemos empleado en las tablas el tradicional procedimiento de marcaje. Este flujo es numéricamente igual a la resistencia que ofrece la estructura a la deformación, la cual se producirá por el corte de capacidad mínima. Determinar dicho corte corresponde, cuando en el procedimiento de marcaje de los vértices para la determinación del flujo máximo no se puede marcar el vértice final, a definir dos conjuntos de arcos:

$X_1$  = arcos con el origen marcado y el final no marcado

$X_2$  = arcos con el origen no marcado y el final marcado

siendo el corte la reunión de ambos subconjuntos. Los arcos de  $X_1$  son los que se acortan, mientras que los de  $X_2$  son los que se alargan.

La segunda parte del algoritmo consiste en determinar la deformación máxima correspondiente al flujo o fuerza. Para ello se busca el mínimo de los márgenes de  $X_1$  positivos y de los negativos cambiados de signo de  $X_2$ . Este valor indica la máxima deformación que admite la estructura hasta que una barra cambia de estado.

Dicho valor se resta de las fechas de las etapas no marcadas y se corrigen los márgenes

adecuadamente (disminuyendo en dicha cantidad los de las actividades de  $X_1$  y aumentando en la misma los de  $X_2$ ). Con ello la resistencia de la estructura varía ya que normalmente los márgenes de valor 0 cambian de posición, y por tanto podemos buscar de nuevo el flujo máximo o resistencia de la estructura. El algoritmo termina cuando encontramos la posibilidad de hacer circular un flujo infinito por el grafo, es decir, cuando la estructura queda bloqueada y no admite más deformaciones.

Como es lógico hemos obtenido los mismos resultados anteriores; aunque no sería sorprendente que las fases 5 y 6 estuvieran invertidas.

### 7.1.7 Problemas disyuntivos

Los problemas disyuntivos son aquéllos en los que existe alguna ligadura disyuntiva. Se han definido las ligaduras disyuntivas como aquéllas que imponen que dos o más actividades no pueden coincidir temporalmente en su ejecución. Generalmente ello se debe a que utilizan para su realización un recurso del que sólo se posee una unidad, por ejemplo el mismo puente grúa, la misma máquina, etc. En este sentido podrían considerarse como un caso particular de las ligaduras acumulativas. Sin embargo, las ligaduras disyuntivas suelen estar dotadas de mayor rigidez que las acumulativas, lo que se traduce en una problemática combinatoria original.

Aunque las herramientas para afrontar los problemas combinatorios han tenido importantes avances en los últimos tiempos, suelen ser de utilización delicada y de gran consumo de recursos informáticos. Por ello se prefieren los procedimientos heurísticos, cuando la enumeración, procedimiento en teoría siempre posible, es incómoda. Distinguiremos dos situaciones, que definiremos en forma algo ambigua:

- La primera situación se presenta en aquellas circunstancias en las que el número de ligaduras disyuntivas es reducido, por lo que la estructura potencial del problema es lo suficientemente importante como para poder utilizarla extensamente, superponiéndole cuando sea necesario el efecto de las disyunciones.
- La segunda corresponde al caso en que el crecido número de ligaduras disyuntivas impide poder considerar como principal la estructura potencial, por lo que el problema exige ya de inicio un tratamiento que tenga en cuenta las disyunciones. Este es el caso del denominado "problema del taller mecánico", en el que las ligaduras potenciales están subordinadas a las disyuntivas. No trataremos este caso en lo que sigue.

#### 7.1.7.1 Problemas poco disyuntivos

Por ser más cómoda en este caso utilizaremos la representación ROY, aunque también sería posible el empleo de la PERT realizando las traducciones de conceptos correspondientes.

Consideremos el caso de la *figura 7.1.7.1*, en la que se han representado las ligaduras disyuntivas existentes mediante una doble flecha (como en la *figura 7.1.7.2*). Entre las actividades *a* y *b* existe una ligadura disyuntiva  $D_1$ , es decir, la realización de *a* y *b* no puede coincidir en el tiempo. Análogamente existe una ligadura disyuntiva  $D_2$  entre *d* y *e*. Nuestro objetivo es realizar el proyecto en el menor tiempo posible. En este caso tan sencillo podríamos desdoblarse el problema global en cuatro problemas potenciales, resolver cada uno de ellos y elegir la solución más adecuada. Cada problema potencial se obtendría orientando la doble flecha de cada ligadura disyuntiva en uno de los dos sentidos posibles. Incluso podría suceder que alguno de los problemas potenciales careciese de significado, al crear la combinación de orientaciones de las ligaduras disyuntivas un circuito de valor positivo; esta circunstancia no puede darse en nuestro caso.

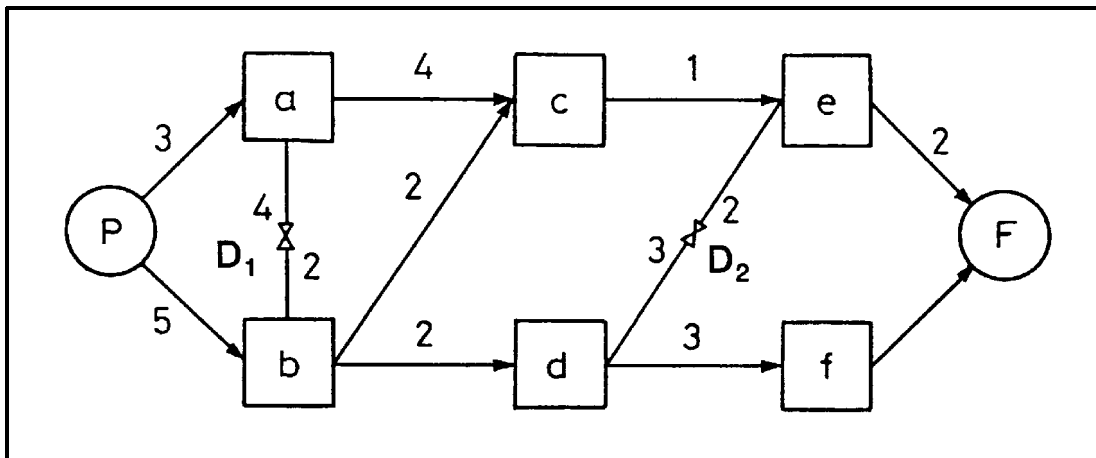


Fig. 7.1.7.1 Ejemplo de problema disyuntivo

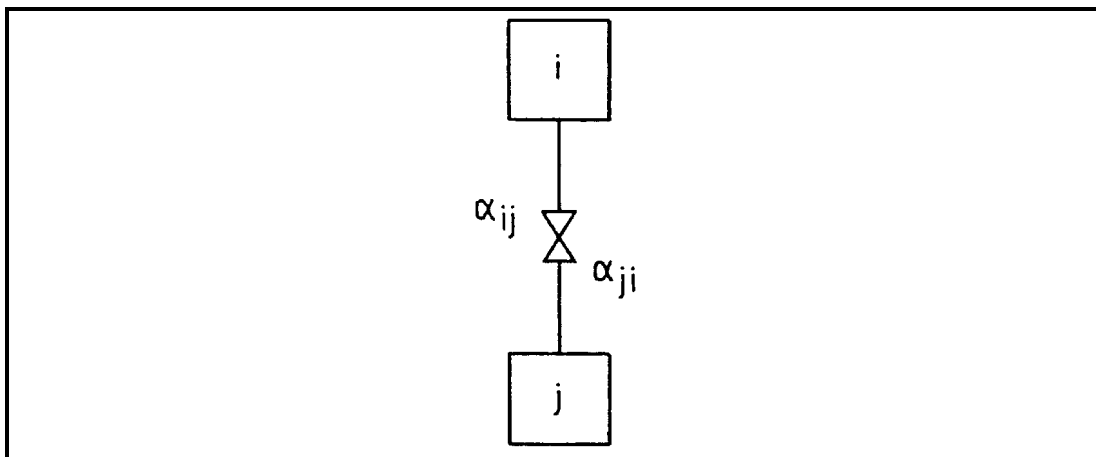


Fig. 7.1.7.2 Representación de una ligadura disyuntiva (sistema ROY)

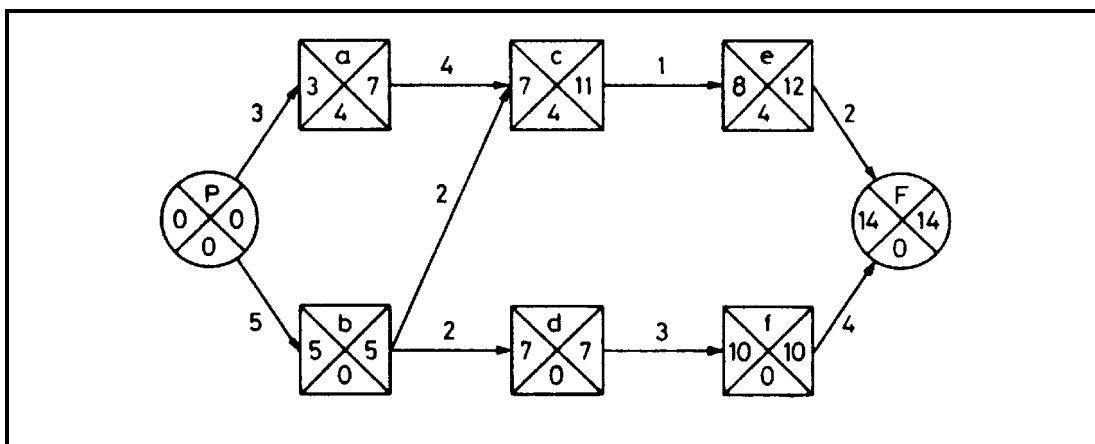
Vamos a utilizar para tratar este problema un método heurístico fácil de implementar en ordenador, e incluso fácil de tratar mediante una combinación de fases automáticas y manuales si sólo disponemos de un paquete informático capaz de tratar problemas potenciales. Describiremos el procedimiento por etapas:

*Etapla 1:* Se resuelve el problema potencial obtenido prescindiendo de las ligaduras potenciales. Para cada actividad calculamos:

$$D - T_i$$

donde D es la duración mínima del proyecto y  $T_i$  es la fecha máxima de la actividad.

En nuestro caso obtenemos (véase la *figura 7.1.7.3*):



*Fig. 7.1.7.3* Cálculo de las fechas mínimas y máximas del ejemplo prescindiendo de las ligaduras disyuntivas

TABLA INICIAL			
Actividad	Fecha mínima	Fecha máxima	$D - T_i$
P	0	0	14
a	3	7	7
b	5	5	9
c	7	11	3
d	7	7	7
e	8	12	2
f	10	10	4
F	14	14	0

*Fig. 7.1.7.4* Valores iniciales correspondientes al problema disyuntivo



Es simple darse cuenta de que el nuevo valor hallado corresponde a la duración mínima imprescindible que debe transcurrir entre el inicio de cada actividad y el final del proyecto.

*Etapa 2:* Para cada ligadura disyuntiva determínese la longitud de los caminos que se crean, entre P y F, con cada una de las orientaciones de las ligaduras disyuntivas (no resueltas todavía). Si una ligadura disyuntiva se orienta de  $i$  a  $j$ , el nuevo camino creado tiene una longitud:

$$t_i + \alpha_{ij} + (D - T_j)$$

En nuestro caso:

$$D_1 - \text{orientación } ab: \quad 3 + 4 + 9 = 16$$

$$D_1 - \text{orientación } ba: \quad 5 + 2 + 7 = 14$$

$$D_2 - \text{orientación } de: \quad 7 + 3 + 2 = 12$$

$$D_2 - \text{orientación } ed: \quad 8 + 2 + 7 = 17$$

*Etapa 3:* Se asocia cada ligadura disyuntiva con la mayor de las duraciones de los caminos nuevos que puede introducir.

En nuestro caso:

$D_1$  se asocia a 16

$D_2$  se asocia a 17

*Etapa 4:* Se considera la ligadura con el mayor valor asociado, y se orienta en el sentido más favorable (el contrario del que ha dado el valor asociado). En nuestro caso:

Tomaremos la ligadura  $D_2$  y la orientaremos en el sentido *de*

*Etapa 5:* Introduciremos este sentido de la ligadura disyuntiva como nueva ligadura potencial y recalcularemos los valores. Véase la *figura 7.1.7.5* a la que corresponde la tabla de la *figura 7.1.7.6*.

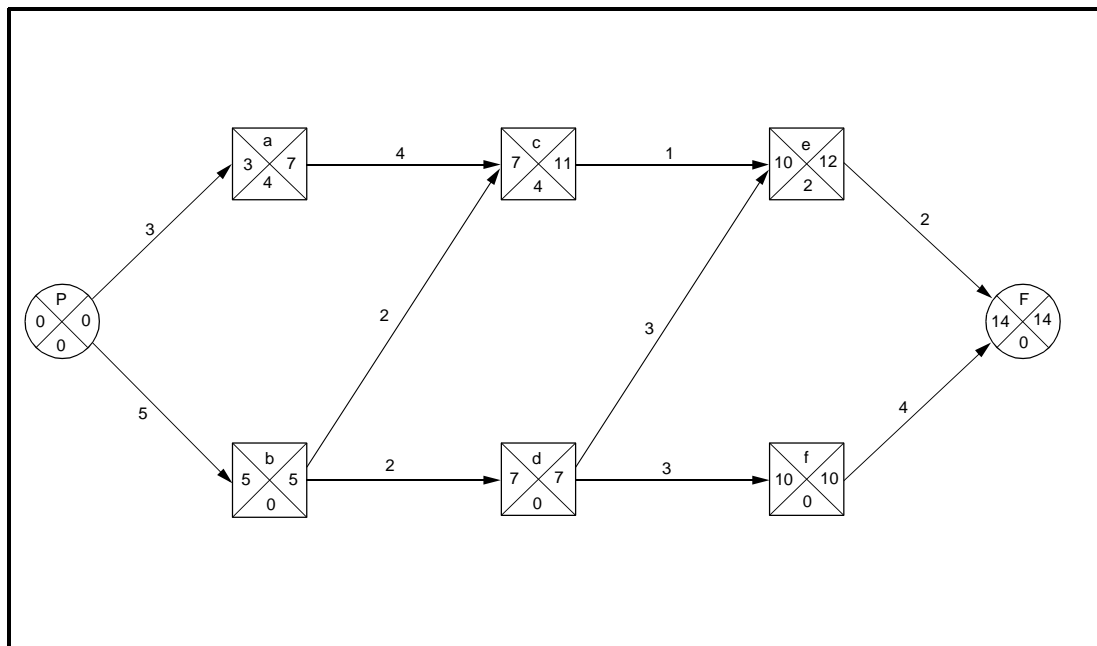


Fig.7.1.7.5 Cálculo de las fechas mínimas y máximas del ejemplo habiendo fijado  $D_2$

TABLA SEGUNDA			
Actividad	Fecha mínima	Fecha máxima	$D - T_i$
P	0	0	14
a	3	7	7
b	5	5	9
c	7	11	3
d	7	7	7
e	10	12	2
f	10	10	4
F	14	14	0

Fig. 7.1.7.6 Valores correspondientes al problema disyuntivo después de resolver la ligadura disyuntiva  $D_2$  en el sentido de

Fase 6: Si se han resuelto todas las ligaduras disyuntivas hemos terminado; en caso contrario se debe volver a la etapa 2.

Como en nuestro caso no hemos terminado, debemos estudiar la ligadura disyuntiva  $D_1$ , que es la única sin resolver:

Ligadura  $D_1$ , orientación  $ab$      $3 + 4 + 9 = 16$   
 Ligadura  $D_1$ , orientación  $ba$      $5 + 2 + 7 = 14$

y por consiguiente la orientamos en el sentido  $ba$ . El resultado final se encuentra en la figura 7.1.7.7, o en la tabla de la figura 7.1.7.8.

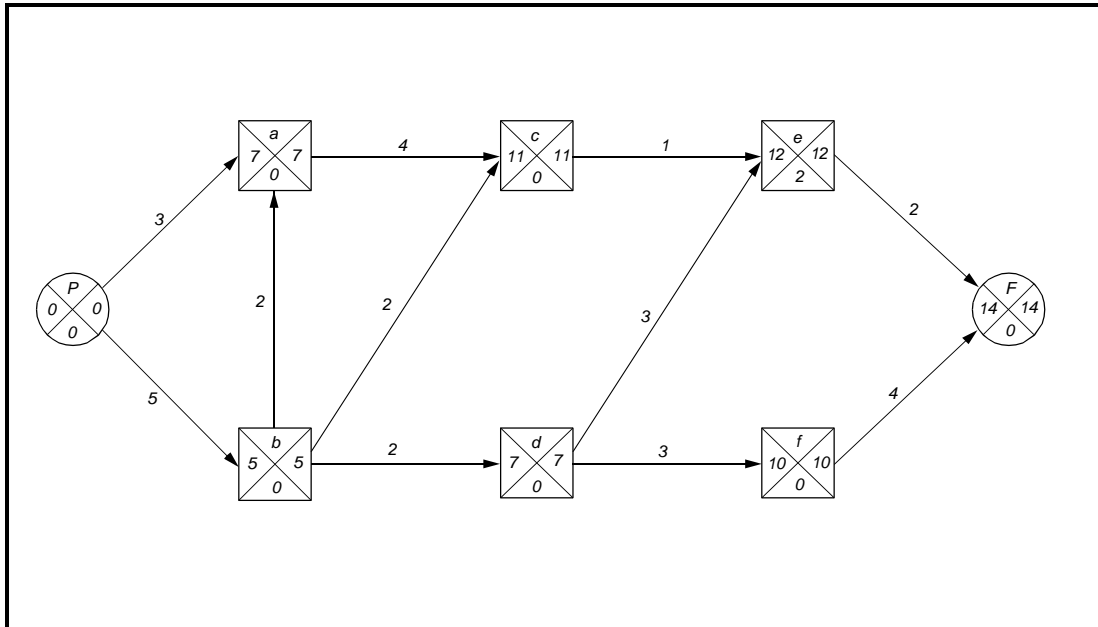


Fig. 7.1.7.7 Cálculo de las fechas mínimas y máximas del ejemplo tras haber fijado ambas ligaduras disyuntivas

TABLA FINAL			
Actividad	Fecha mínima	Fecha máxima	$D - T_i$
P	0	0	14
a	7	7	7
b	5	5	9
c	11	11	3
d	7	7	7
e	12	12	2
f	10	10	4
F	14	14	0

Fig. 7.1.7.8 Valores correspondientes al problema disyuntivo después de resolver la ligadura disyuntiva  $D_2$  en el sentido de y la  $D_1$  en el sentido  $ba$

El proyecto no ha sufrido retraso respecto a la sola consideración de las ligaduras potenciales (no siempre tendremos igual suerte), pero *todas las actividades son críticas*. En este caso podemos estar seguros de que si con el método heurístico hemos determinado la solución óptima, el proyecto tiene duración mínima. En casos más complejos, en los que la duración del Proyecto haya aumentado respecto a la duración hallada con las ligaduras potenciales únicamente no ocurrirá así. Una adaptación del procedimiento anterior permitiría explorar más posibilidades, siguiendo la técnica denominada *branch-and-bound* y llegar así al óptimo en todos los casos, aunque a costa de un trabajo que, aunque menor que la enumeración completa, puede ser considerable. No obstante algunos experimentos que hemos realizado con el procedimiento heurístico descrito nos han mostrado que tiene un comportamiento muy satisfactorio la mayoría de las veces.

### 7.1.7.2 Conclusiones

Hemos recorrido los procedimientos de planificación y control de Proyectos basados en su representación mediante grafos. Estos procedimientos son singularmente útiles cuando las ligaduras potenciales son las predominantes, lo que suele suceder en la mayoría de los casos, bien porque corresponde a la situación real, bien porque la tradición tecnológica impone unos usos y costumbres que eliminan la mayoría de las ligaduras acumulativas y disyuntivas, al resolver sus interrogantes. Los procedimientos aptos para tratar los problemas potenciales, que hemos denominado genéricamente métodos PERT determinan los caminos máximos entre dos puntos cualesquiera del grafo representación del proyecto, y permiten fijar unos intervalos para las fechas de comienzo de las actividades compatibles con la duración mínima del Proyecto.

Hemos introducido también algunos algoritmos heurísticos para tratar problemas acumulativos y disyuntivos. Estos procedimientos no pretenden alcanzar el programa óptimo en todos los casos, pero sí, mediante un trabajo relativamente reducido, garantizar programas cercanos al óptimo, suficientes dado el nivel de precisión de los datos y la incertidumbre existente sobre acontecimientos futuros.

### 7.1.8 Seguimiento y control

En los apartados precedentes hemos presentado los aspectos "teóricos" de la planificación de proyectos mediante grafos. Vamos a efectuar ahora algunas puntualizaciones sobre la utilización de dicha teoría junto con otras consideraciones prácticas sobre la planificación y control de proyectos.

#### 7.1.8.1 Origen de los datos

Sin datos (técnicos, históricos, estimaciones, etc.) no es posible realizar ninguna

planificación. Aunque en los ejemplos del capítulo anterior hemos supuesto "académicamente" que todos los datos necesarios estaban disponibles, raramente es así en la práctica. Los datos, si existen, están dispersos y celosamente guardados por quienes se creen sus propietarios, cuyo deseo más caro es no compartirlos, a pesar de que se trata de un bien que puede cederse sin dejar de poseerlo. El esfuerzo que se precisa desarrollar para la obtención de los datos es, con mucho, más importante que el de elaboración de los mismos e interpretación de los resultados.

Por dicha circunstancia empezaremos tratando de cómo puede obtener los datos un Equipo de Planificación, a las órdenes del Jefe de Proyecto. Este Equipo de Planificación según los casos puede constar de varias personas, a tiempo total o parcial, o ser uno de los muchos papeles que debe interpretar el mismo Jefe de Proyecto, aunque ésta no sea una solución recomendable.

#### **7.1.8.1.1 Posición del Equipo de Planificación**

En la realización de un Proyecto Industrial, sobre todo si es de gran dimensión y complejidad, intervienen gran número de personas, de especialidades diversas, encuadradas en diferentes Departamentos, y posiblemente de diferentes Empresas, con relaciones contractuales complejas, por lo que no siempre coinciden los objetivos parciales individuales, lo que puede enturbiar la búsqueda del objetivo general que es la realización en tiempo, coste y calidad del Proyecto.

Normalmente el equipo de planificación y seguimiento del Proyecto global está encuadrado en el Estado Mayor del Jefe de Proyecto, o bien depende matricialmente de él, estando su línea jerárquica en la Empresa contratante, en el Arquitecto Técnico o en el Constructor Principal. En cualquier caso es independiente y ajeno a numerosos departamentos y grupos que tienen una actividad importante en la realización del Proyecto, cuando no a todos. Conviene que así sea, pues su misión es procurar obtener, elaborar y difundir información fiable sobre la situación presente y futura prevista del Proyecto desde el punto de vista de los objetivos globales del mismo. Por ello sus actuaciones son frecuentemente mal interpretadas por dichos participantes activos en el Proyecto, que consideran que se está ejerciendo una labor de vigilancia y fiscalización sobre ellos, sin la responsabilidad, ni los conocimientos y las competencias técnicos apropiados, ya que el Equipo suele estar apartado de los aspectos de línea y tecnológicos. La misma utilización de procedimientos estructurados y formalizados, cuando no de ordenadores, puede resultar sospechosa a personas habituadas sobre todo a la acción.

No obstante, el equipo de planificación debe establecer buenas relaciones con los diferentes entes técnicos ya que depende de ellos para:

- \* La obtención de los datos relativos a la descomposición del Proyecto en actividades, las precedencias entre éstas (obligatorias y deseables) y su duración estimada.
  
- \* La determinación de alternativas o soluciones en caso de producirse circunstancias inesperadas que pongan en peligro alcanzar el objetivo temporal fijado para el Proyecto, a lo que se une el que:
  
- \* La planificación del Proyecto sirve para la coordinación de todos los entes implicados en la realización del mismo, por consiguiente para alcanzar no sólo los objetivos globales sino también los particulares con el mayor grado de eficiencia.

Es decir, la labor de planificación del Proyecto redundará en beneficio en primer lugar de los departamentos realizadores si éstos creen en su utilidad. No es fácil lograr un ambiente inicial de aceptación, y tampoco es posible actuar en todas las circunstancias bajo el amparo de la autoridad del Jefe de Proyecto (que tiene ya bastante trabajo y problemas de autoridad sin los introducidos por las relaciones Equipo de Planificación Departamentos) para obtener por la fuerza una colaboración que no se alcanza directamente. Por dicho motivo, además de la demostración por parte del Jefe de Proyecto del decidido propósito de prestar a la planificación crédito y atención, es preciso que progresivamente el Equipo de Planificación vaya obteniendo "per se" el crédito y el prestigio de los entes implicados, a través de la demostración palpable de que su labor "les es útil".

#### 7.1.8.2 Obtención de los datos iniciales

Los datos de partida para la realización de la planificación tienen su origen fundamentalmente en los elementos técnicos implicados en la construcción del Proyecto, aunque la palabra "técnicos" debe entenderse en una acepción muy amplia, dado que no todas las actividades necesarias para llevar adelante un proyecto con alto contenido tecnológico son puramente técnicas; muchas actividades que deberían calificarse como administrativas son tan determinantes del cumplimiento de los plazos como las anteriores.

Para la obtención de los datos es conveniente proceder de la siguiente forma:

- 1) Difundir información lo más completa y extensamente posible sobre los objetivos, métodos, procedimientos y herramientas del equipo de planificación a todos los niveles de los entes implicados, comenzando de preferencia por los más elevados. Se recurrirá a reuniones, conferencias, cursillos, folletos, manuales, demostraciones, etc. El objetivo

perseguido es el de sensibilizar a todos los participantes y hacerles comprender los fines perseguidos. Lograrlo es útil tanto para la obtención de los datos como para la adecuada recepción posterior de los resultados.

- 2) Descomponer el Proyecto en partes o sub-proyectos coherentes. Los criterios de descomposición más utilizables son la funcionalidad, el tipo de tecnología involucrada en el diseño o en la construcción y la situación geográfica en la realización. El Organigrama Técnico puede servir de guía en la descomposición. Cada parte se estudiará aisladamente en detalle antes de proceder a las consideraciones finales de conjunto. En general cada parte dará lugar a un sub-grafo en la representación elegida para transmisión de información que contendrá alusiones a otros subgrafos en el código establecido para las actividades. El número de partes o sub-proyectos a establecer dependerá de los que puedan manejarse con comodidad, y ello depende de los medios disponibles; sin embargo el límite cabe fijarlo en las situaciones habituales alrededor de los 20.
- 3) Obtener datos sobre cada una de las partes relativos a la descripción del sub-proyecto, su funcionalidad, actividades principales que comprende su realización, plazos de realización, problemas principales probables o posibles, etc. La forma de obtener esta información es a través de la información y documentación existente relativa a otros Proyectos semejantes y que sin duda habrá sido recogida en la fase de Definición. El objetivo es tener un nivel de conocimientos suficiente sobre el Proyecto para que las entrevistas que se celebrarán a continuación con los responsables de la construcción sean fructíferas gracias al empleo de un lenguaje común.
- 4) Elegir una nomenclatura para la codificación de la información que va a obtenerse. En especial decidir la codificación de las actividades, que debe estar acorde con el tratamiento de la información para el cálculo del camino crítico que va a utilizarse. Siendo habitual el empleo de un ordenador (mainframe o micro) en forma interactiva, las características del programa disponible en el mismo influirán grandemente en dicha codificación.
- 5) Celebrar entrevistas con los diferentes responsables de la construcción para recabar la información correspondiente a la descomposición en actividades, precedencias y duraciones. En las primeras entrevistas puede centrarse el interés en las dos primeras cuestiones, a fin de evitar el efecto pernicioso que puede tener la superposición de los conceptos duración y plazo.

6) Establecer Actas de las entrevistas, en forma muy somera, en las que se indique las conclusiones a que se ha llegado. De hecho estas conclusiones pueden reflejarse de dos formas:

\* Fichas de actividad, con formato parecido al de la *figura 7.1.8.1*. Estas fichas están destinadas a contener no sólo los datos necesarios para la planificación, sino otros auxiliares; la identificación de la actividad se hará de acuerdo con la nomenclatura, codificación y situación en el sub-grafo correspondiente. No debe tenerse la pretensión de tener cumplimentadas de inmediato y completamente todas las fichas, ni que los datos reflejados en las fichas sean inamovibles. Deben preverse revisiones sucesivas en las que deberán, posiblemente, introducirse modificaciones; a medida que vaya construyéndose el Proyecto la información sobre las actividades inmediatas será mejor en calidad. Por consiguiente se aconseja establecer en su caso la ficha cuando exista un nivel de concreción suficiente utilizando como ayuda un microordenador dotado de editor de textos, base de datos relacional o sistema integrado con editor, hoja electrónica y base de datos (sería muy apreciable que el programa de cálculo del camino crítico y de los calendarios de realización también estuviese integrado, lo que solaparía las tareas de actualización de las fichas con las de actualización de los datos para el tratamiento). En esta forma las modificaciones sucesivas de la ficha podrán realizarse con más comodidad, y sobre todo el plazo de obtención de las fichas modificadas y sobre todo de su difusión será reducido.

\* Grafos PERT o ROY (en principio uno por sub-proyecto, lo que obligará a establecer las modalidades para indicar las "interfaces") con indicación de las precedencias. Tampoco aquí debe tenerse la pretensión de alcanzar nunca un nivel definitivo hasta que el Proyecto haya terminado, por lo que deben utilizarse procedimientos rápidos de elaboración y modificación de los grafos. Aunque existen posibilidades de obtención automática de los grafos mediante la ayuda de ordenadores, una vía manual no demasiado pesante es la del empleo de plantillas, líneas horizontales y verticales, rotulador automático, lápiz, tintas borradoras, recortes pegados, y fotocopias. Los grafos podrán tener forma semejante al representado en la *figura 7.1.8.2*.

7) Difundir las Actas y recoger las reacciones; si no se producen espontáneamente, provocarlas.

8) Cuando se disponga de suficiente información realizar algunos supuestos de planificación, discutiendo los resultados con los entes implicados, con el fin de llegar a un primer conjunto depurado de datos.



**FICHA DE ANÁLISIS**

1	4	5	8	46	NOMBRE DE LA ACTIVIDAD	90	9	12	DURACION	FECHA	RESPONSABLE	
Tipo de actividad:												
DESCRIPCIÓN												
Empresa: <span style="float: right;">Nacionalidad</span>												
FECHA DE REVISION	FECHA MINIMA				FECHA MAXIMA							
	COMIENZO		FINAL		COMIENZO		FINAL					
Fecha real de comienzo												
Duración real												
Fecha real de terminación												
										FICHA DE OPERACION		
CONDICIONES NECESARIAS PARA REALIZAR LA OPERACION												
MATERIALES	MANO DE OBRA	MAQUINARIA	LOCALIZACION	OTRAS								
LIGADURAS TECNOLOGICAS												
SIGUIENTES	PRECEDENTES	OBSERVACIONES										
OBSERVACIONES												

Fig. 7.1.8.1 Ficha de análisis de actividad

### 7.1.8.3 Obtención de los datos de actualización

Como se ha señalado ya, en un Proyecto de larga duración, a medida que transcurre el tiempo y va avanzando la realización del mismo van variando las estimaciones sobre las realizaciones futuras:

- a) El conocimiento que se posee sobre estas realizaciones ha mejorado, debido a la experiencia o al incremento de atención que les proporciona la inmediatez (que las ha transformado de un asunto importante en un asunto urgente).
- b) Han podido variar los condicionantes existentes, y por consiguiente haberse decidido el empleo de un método diferente del inicialmente previsto, lo que repercute en definiciones y duraciones.
- c) La marcha del Proyecto obliga a secuenciar las actividades en una forma diferente a la establecida inicialmente.
- d) Se han producido (o se prevé que se producirán) incidentes que han repercutido en retrasos en la terminación de algunas actividades respecto a lo previsto. Estos retrasos pueden haber influido únicamente en la reducción de los márgenes, o incluso en su anulación, con repercusiones en cadena hasta el final previsto del Proyecto, lo que obliga a replanificaciones a partir de datos actualizados.

El origen de los datos de la actualización se encuentra en:

- 1) La propia realización
- 2) Los equipos técnicos de los departamentos que intervienen en la realización

por ello las formas de conseguirlos son:

- i) La observación directa de la realización, siempre interesante por dar un contenido físico a algo que de otra forma se quedaría en unas inscripciones en unos papeles. La información obtenida sobre el terreno puede registrarse en un estadillo, Ficha de Obra, semejante al de la *figura 7.1.8.3*.
- ii) Entrevistas con los responsables.
- iii) Las reuniones de seguimiento del Proyecto.

Debe señalarse que es lógico que en el transcurso de un Proyecto de este tipo, cuya duración es dilatada, el Equipo de Planificación vaya adquiriendo progresivamente cierta competencia técnica en los diferentes sectores involucrados (si no la poseía ya anteriormente) por lo que pueda disminuir su dependencia de los responsables de los constructores para la obtención de datos. En todo caso esta competencia debería ser utilizada para disminuir la carga que gravita sobre los responsables, pero no para eliminar su involucración, compromiso y responsabilidad.





#### **7.1.8.4 Construcción del programa**

##### **7.1.8.4.1 Constitución de la base de datos del Proyecto**

Se ha señalado ya en el *apartado 7.1.8.2* la forma de constituir la base de datos del Proyecto a través de la constitución de las fichas de actividad. Esta base de datos debe guardarse en medios informáticos e introducirse y actualizarse en forma interactiva lo más directamente posible por el Equipo de Planificación.

##### **7.1.8.4.2 Obtención de las fechas mínimas y máximas**

Las fechas mínimas y máximas, los márgenes, el (o los) camino(s) crítico(s) y otros resultados habituales se obtendrán automáticamente a partir del programa existente en el ordenador.

##### **7.1.8.4.3 Elaboración del programa del Proyecto**

A partir de los resultados anteriores, directamente o a través de síntesis y retoques, se obtendrá el programa del Proyecto, que esencialmente estará compuesto de las fechas de comienzo y fin de las actividades en curso e inmediatas y las estimaciones relativas a la consecución de etapas características del Proyecto.

#### **7.1.8.5 Comunicación del programa**

Tienen mucha menos importancia el (o un) Programa que la labor y el esfuerzo de planificación durante el cual se detectan los problemas, se analizan las soluciones y se toman decisiones. El documento que concreta una etapa de la planificación no debe considerarse como un final, sino como el inicio de la etapa siguiente.

##### **7.1.8.5.1 Documento "Estado de la planificación"**

Recomendamos que después de cada actualización y en el plazo más breve posible (utilizando por tanto un editor de textos) el Equipo de planificación difunda ampliamente un documento, que hemos denominado "Estado de la planificación" (el título "Estado del Proyecto" podría herir la sensibilidad de algunos participantes) conteniendo la información siguiente:

O) Número del documento y fechas de emisión y de datos.

1) Situación actual:

- 1.1) Actividades (importantes) terminadas desde la aparición del documento anterior.
- 1.2) Actividades (importantes) iniciadas.
- 1.3) Actividades (importantes) que continúan.
- 1.4) Problemas (relevantes) encontrados.
- 1.5) Desviaciones (importantes) producidas, sus causas y líneas de solución adoptadas.

2) Previsiones a plazo inmediato:

- 2.1) Etapas a alcanzar dentro de un horizonte cercano (antes de la próxima revisión).
- 2.2) Posibles problemas y soluciones. Actividades críticas y subcríticas.
- 2.3) Modificaciones de la planificación.

3) Previsiones para el largo plazo:

- 3.1) Última estimación de la fecha de realización de las etapas características.
- 3.2) Desviaciones respecto a la planificación anterior.

4) Estimación cualitativa del responsable de planificación (si no es posible obtener la del jefe del proyecto), fundada en los aspectos cuantitativos anteriores y otra información de que pudiera disponerse.

Para comunicar mejor dicha información deberá recurrirse a diversos procedimientos tabulares, gráficos, etc., obtenidos directamente del ordenador o tras una síntesis y elaboración manual de corta duración. Véase a este respecto las *figuras 7.1.8.4 y 7.1.8.5* que contienen algunos soportes gráficos.

#### **7.1.8.5.2 Frecuencia de la actualización**

Es útil hacer coincidir la revisión del programa y la emisión del documento "Estado de la planificación" con las Reuniones de Obra, que suelen tener frecuencia mínima mensual. Dependiendo de los recursos que posea el Equipo de Planificación, cada mes podrá distribuirse una verdadera revisión del programa, o bien existirán revisiones someras y revisiones en profundidad.

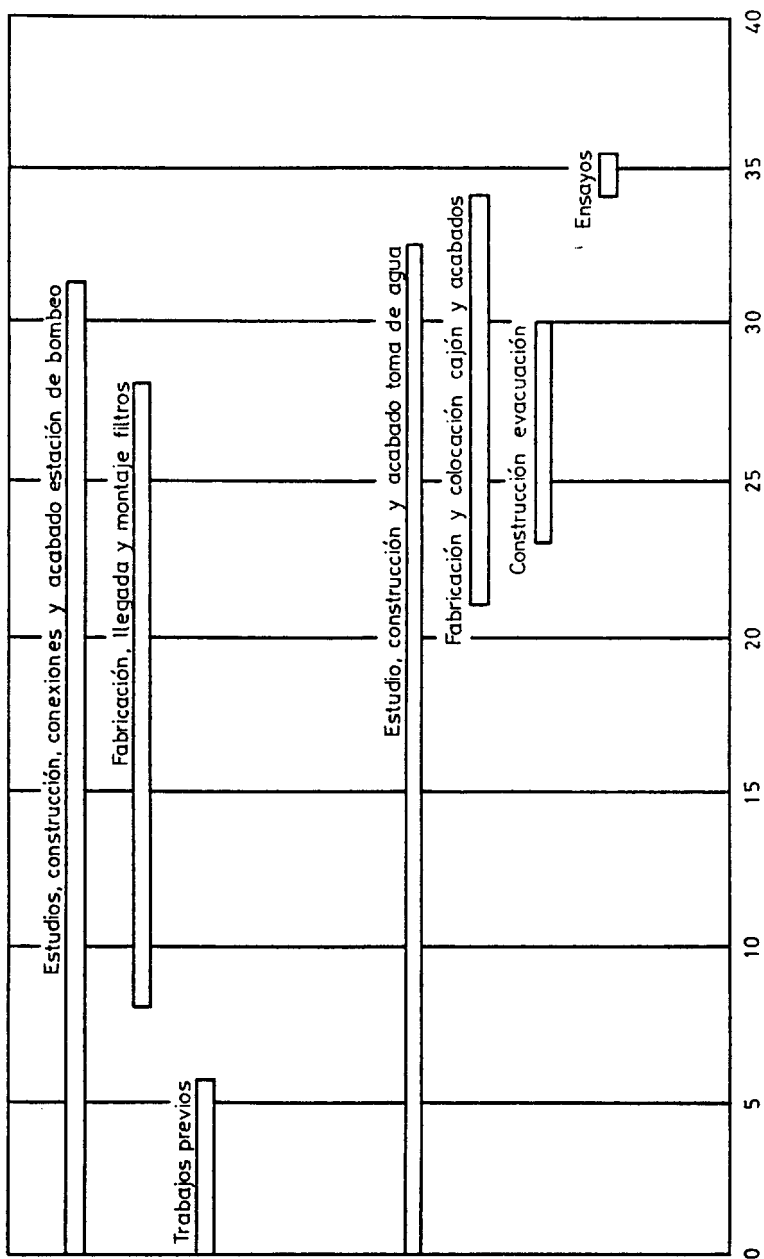


Fig. 7.1.8.4 Diagrama de Gantt para comunicar la planificación (y realización) de un subproyecto

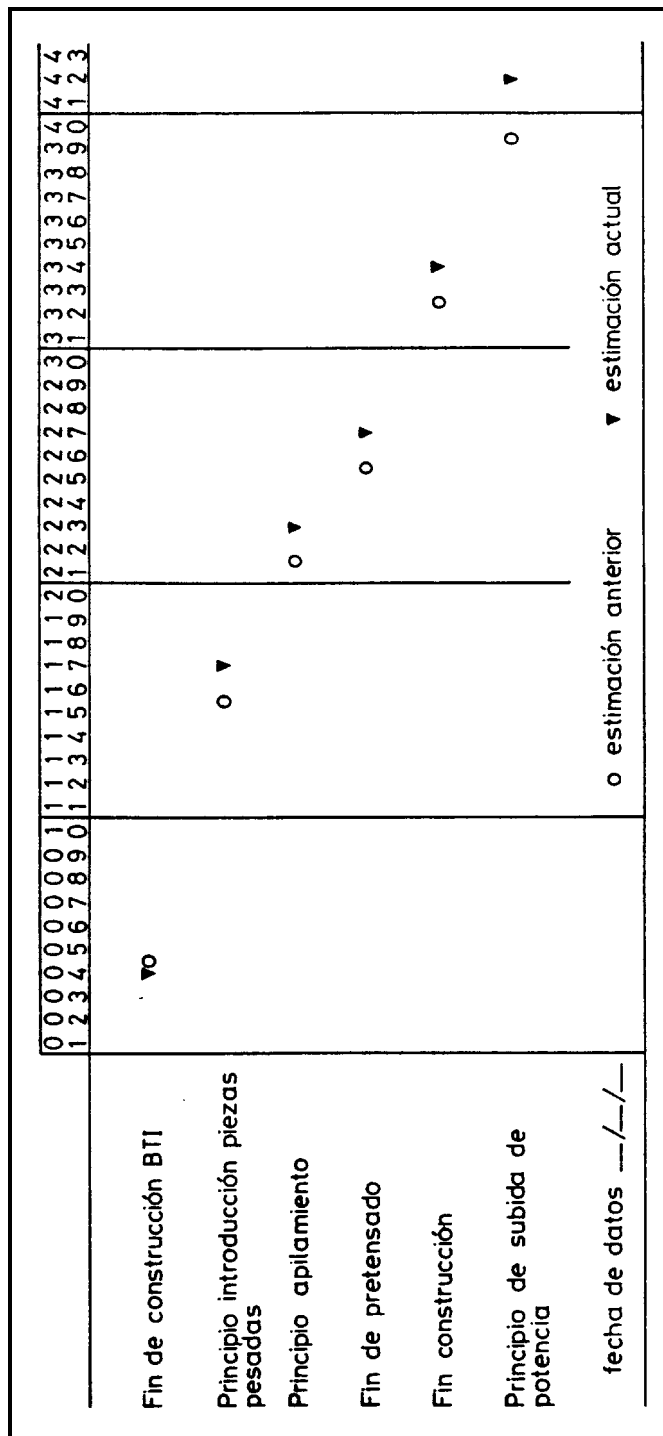


Fig. 7.1.8.5 Diagrama para comunicar la variación de las estimaciones



### 7.1.8.6 Documentos necesarios para la información y decisión del jefe de proyecto

Los documentos indispensables para la actuación del Jefe de Proyecto, en su labor de seguimiento y control, son de cuatro tipos:

- *Documentos sobre los costes, gastos y presupuestos*: compromisos y pagos realizados desde el inicio del Proyecto y desde el inicio del año en curso, ordenado por bloques de actividades y conceptos; previsiones hasta fin de año y hasta fin del proyecto.
  
- *Documentos que muestran el estado de avance*: documento "Estado de la planificación" vigente.
  
- *Documentos sobre personal y plantilla*: personal existente, ordenado por especialidades y afiliación; previsiones hasta final de año y hasta final de Proyecto periodificadas.
  
- *Documentos de control de los rendimientos técnicos*: lista de problemas existentes (no resueltos) en curso con grado de dificultad; relación de problemas, pasados, actuales y futuros previstos.

Estos documentos deben permitir comparar las especificaciones exigidas y previstas a las realizaciones concretas. Tanto en lo que se refiere a las características técnicas como a los datos fácilmente mesurables de costes y plazos, es preciso cuantificar o por lo menos normalizar la información, dándole la forma de tablas y/o gráficos. Estas tablas y gráficos además de describir la situación en el momento de su emisión deben permitir comparaciones y deben mostrar las tendencias de forma clara.

Por tanto podemos distinguir tres tipos de documento:

- a) Documento de base (en el que se recoge la estimación más fiable en la fecha de emisión).
  
- b) Documento de actualización (en el que se recoge la nueva versión del anterior, o la información que ha sufrido modificación).
  
- c) Documento de comparación (que permite seguir y analizar la evolución de las estimaciones).

## DOCUMENTOS NECESARIOS PARA EL SEGUIMIENTO DE UN PROYECTO

	DOCUMENTO DE BASE	ACTUALIZACIÓN	ANÁLISIS COMPARACIÓN
COSTES	Planes anuales y mensuales (presupuesto) Estado de costes estimados	Nuevo presupuesto Estado de gastos Nuevas previsiones	Gráficos de desviación Curvas de gastos Curvas de tendencia
FECHAS	Diagrama de Gantt Grafo PERT	Informes por excepción Modificación del grafo	Diagrama actualizado Curvas de evolución
PLANTILLA	Estadillo de plantillas	Estudio necesidades y previsiones	Curvas de evolución
TÉCNICA	Especificaciones	Informes normalizados	Tablas de evolución

*Fig. 7.1.8.6 Esquema de la utilización de documentos para el seguimiento de un Proyecto. En cada caso tenemos el documento de base, la información de actualización y los documentos de comparación o de análisis*

#### 7.1.8.6.1 Visualización de las desviaciones en plazos

Periódicamente se realizan actualizaciones de la planificación, normalmente cada mes, y como resultado se obtienen estimaciones, algunas veces iguales a las precedentes -otras distintas- de las fechas en las que se alcanzarán ciertas etapas, hitos importantes del Proyecto. Estas estimaciones se difunden entre los diversos responsables, no sólo para su información, sino para que actúen en consecuencia. Por ello es extremadamente útil que aparezcan en forma clara las desviaciones, si existen, en los plazos. Recordando que cada estimación de una fecha tiene asociada además otra fecha, que es la de realización de la estimación, una forma posible es la utilización del diagrama de la *figura 7.1.8.7* en el que en abscisas figura la fecha de realización de la estimación, y en ordenadas el valor estimado (fecha mínima, máxima o ambas de una etapa). Aunque hemos adoptado escalas idénticas para ambos ejes esto no es estrictamente necesario, sobre todo cuando se estiman acontecimientos lejanos en el tiempo. La bisectriz del primer cuadrante, dibujada mediante trazos, tiene una importancia capital en el diagrama; sus puntos corresponden, en su caso, a hechos ciertos, estimaciones del presente. Los puntos del plano situados debajo y a la derecha de la bisectriz no tienen interés.

La situación perfecta es la de la *figura 7.1.8.8* relativa a la etapa X: todas las previsiones realizadas nos llevan a la misma fecha, incluso una extrapolación nos llevaría a la

conclusión de que la fecha de realización de X es noviembre de 1988. No es tan perfecta la situación de la *figura 7.1.8.9* relativa a la etapa V, inicialmente se preveía que se alcanzaría en septiembre de 1988, pero entre marzo y mayo se ha detectado un retraso de hasta tres meses. En junio se adoptaron medidas correctivas y la estimación de julio ha recuperado dos de los tres meses perdidos. Ahora se estima que la etapa se alcanzará en octubre de 1988; dada la proximidad del hecho no cabe imaginar nada distinto.

En la *figura 7.1.8.10* tenemos una situación más preocupante. La estimación de la fecha de realización de la etapa Z sufre un deslizamiento continuo y progresivo. De no utilizarse medidas especiales, y de continuar la tendencia actual de deslizamiento, puede temerse que se realice entre abril y mayo de 1989, es decir, cinco meses después de la estimación inicial. La *figura 7.1.8.10* muestra un punto en donde una actuación es necesaria. Finalmente el peor caso es el de la etapa U en la *figura 7.1.8.11*, que de seguir las cosas como están *nunca* se realizará. Aunque la situación parece incoherente, hemos vivido un caso de este tipo (un estudio que cada quince días estaba a quince días de su fin, según el responsable). No es necesario indicar que aquí la actuación es absolutamente necesaria y urgente, aunque tal vez no fácil, debido a que pueden existir graves problemas ocultos bajo esta aparente frivolidad en la estimación.

#### 7.1.8.6.2 Visualización de las desviaciones de gastos

Es más difícil presentar la evolución de los gastos ocasionados por el Proyecto de forma que puedan adoptarse medidas correctoras rápidamente. La *figura 7.1.8.12* muestra una representación del presupuesto, los gastos previstos y los gastos reales.

- La línea escalonada P representa el presupuesto acumulado. Se ha tenido en cuenta en esta representación que el presupuesto suele asignarse anualmente, por lo que para el Proyecto representado, que tiene una duración de tres años, el primer año la asignación es de 60 MPTA, 90 el segundo y 100 el tercero.
- La línea C corresponde al calendario de gastos acumulados estimados, cuyo inicio y fin se corresponden a los del presupuesto, pero cuyo devengo es progresivo a lo largo del tiempo.
- La línea R, que llega hasta la fecha de actualización, corresponde a los gastos contabilizados. Puede observarse que se ha producido una desviación respecto a la estimación realizada en C.
- La prolongación "natural" de la línea R es la línea E, que constituye el nuevo calendario de gastos acumulados estimados (salvo actuación correctora). Como puede verse se sobrepasa el presupuesto concedido.

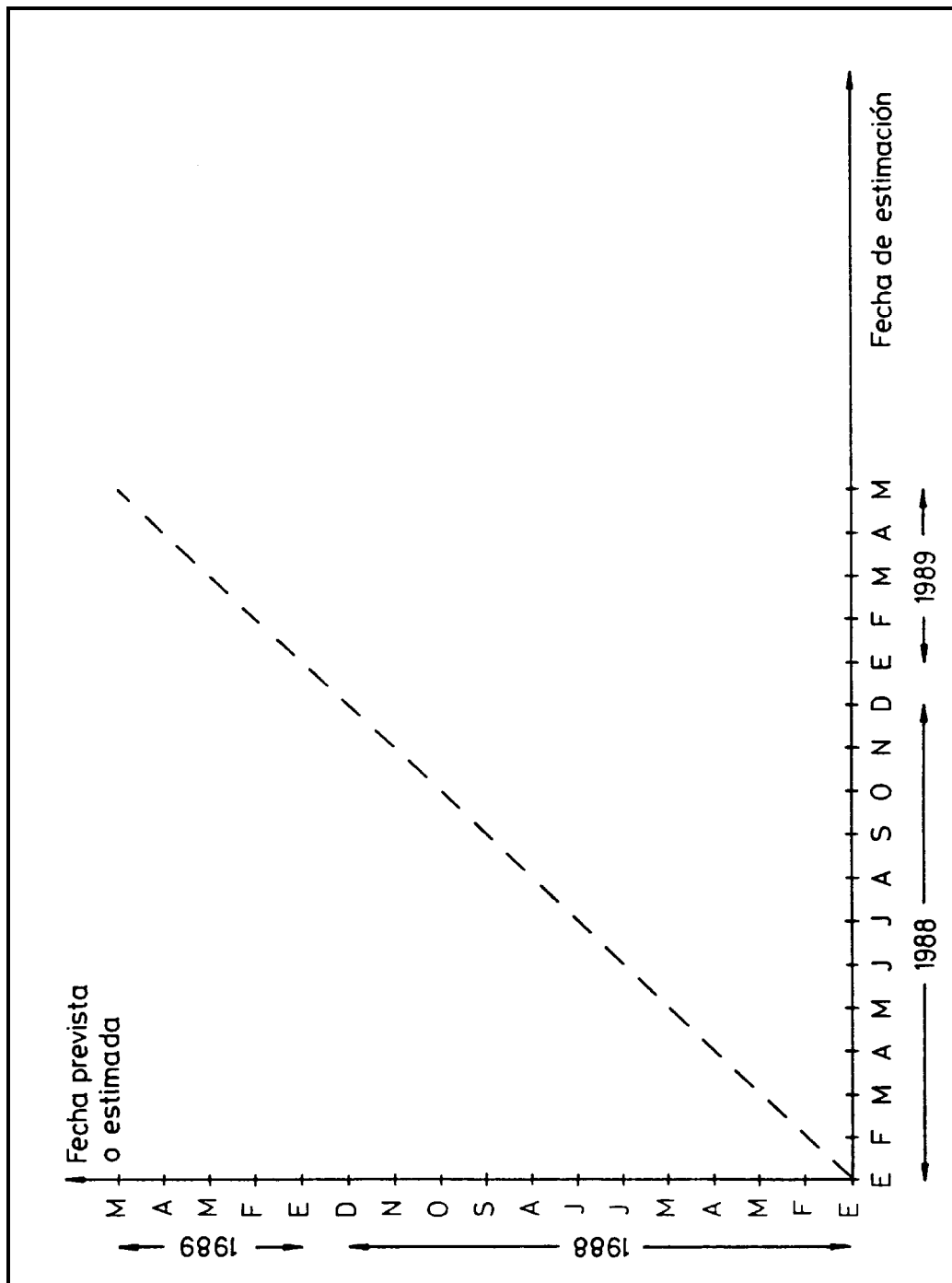


Fig. 7.1.8.7 Diagrama para representar la evolución de las estimaciones sobre fechas en el transcurso del tiempo

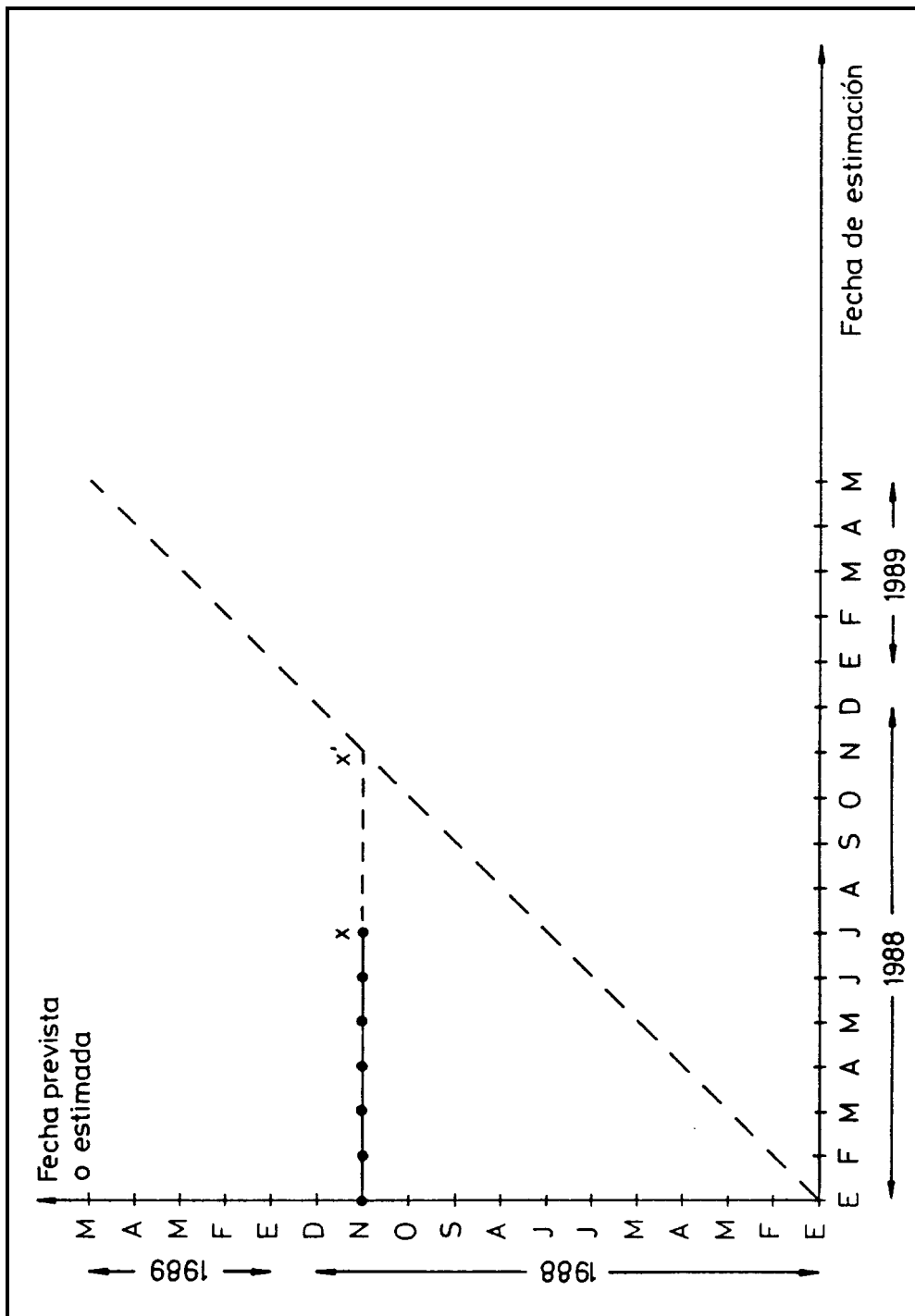


Fig. 7.1.8.8 La estimación de la fecha de la etapa X se mantiene constante

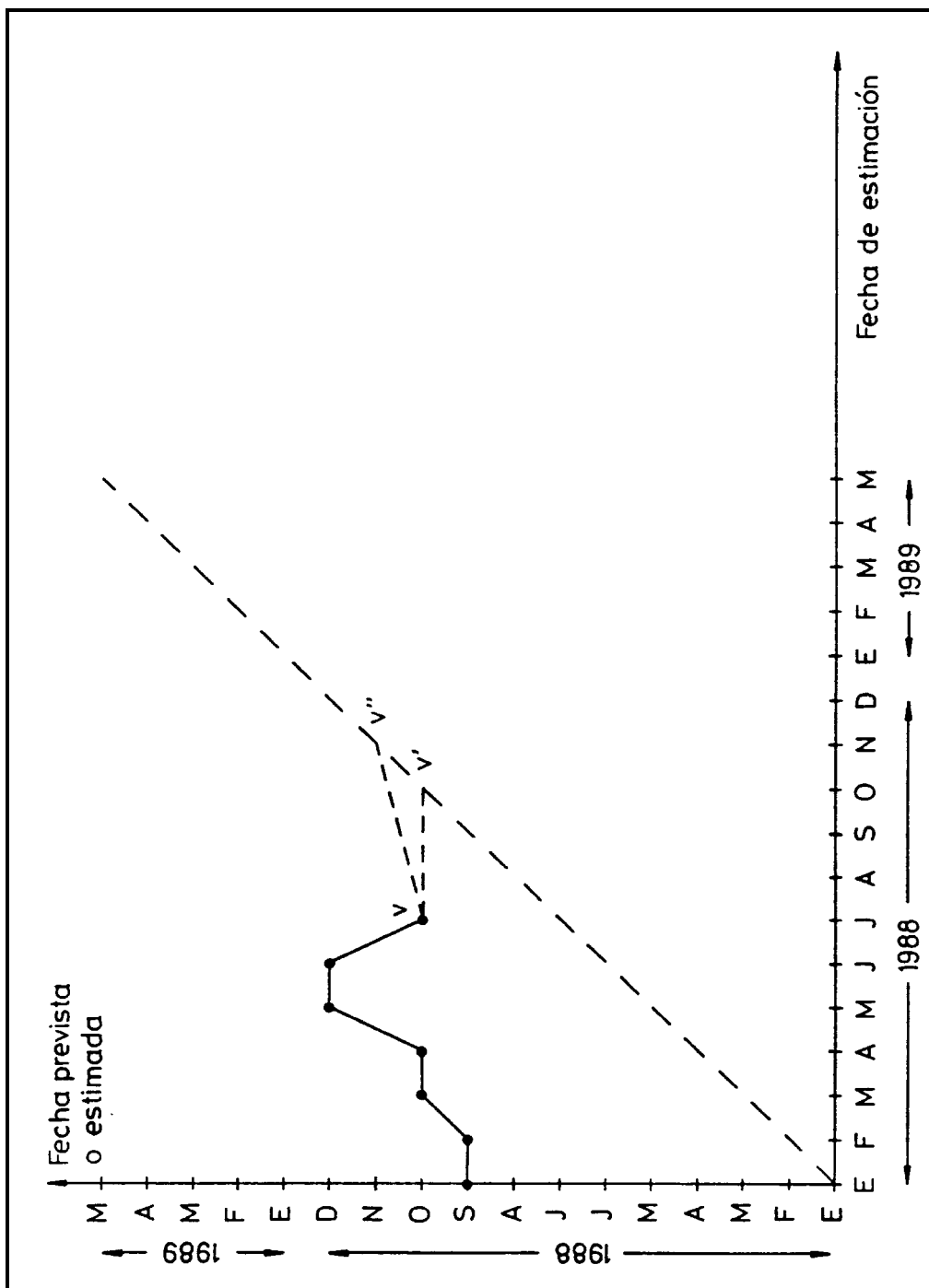


Fig. 7.1.8.9 La estimación de la fecha de la etapa V se modifica a lo largo del tiempo. Se reflejan los resultados de acciones emprendidas para reducir los retrasos

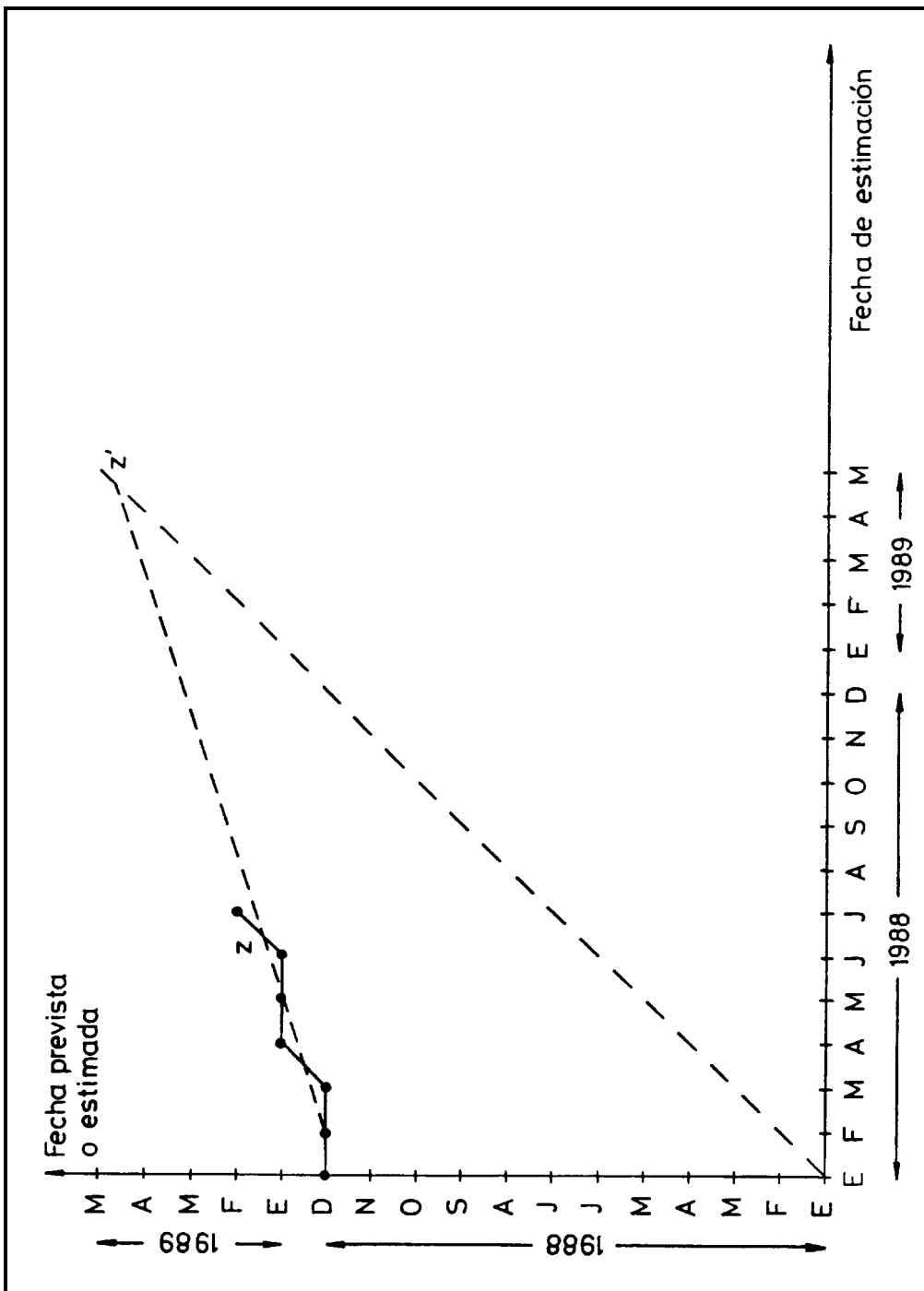


Fig. 7.1.8.10 La estimación de la fecha de la etapa Z señala un retraso sistemático

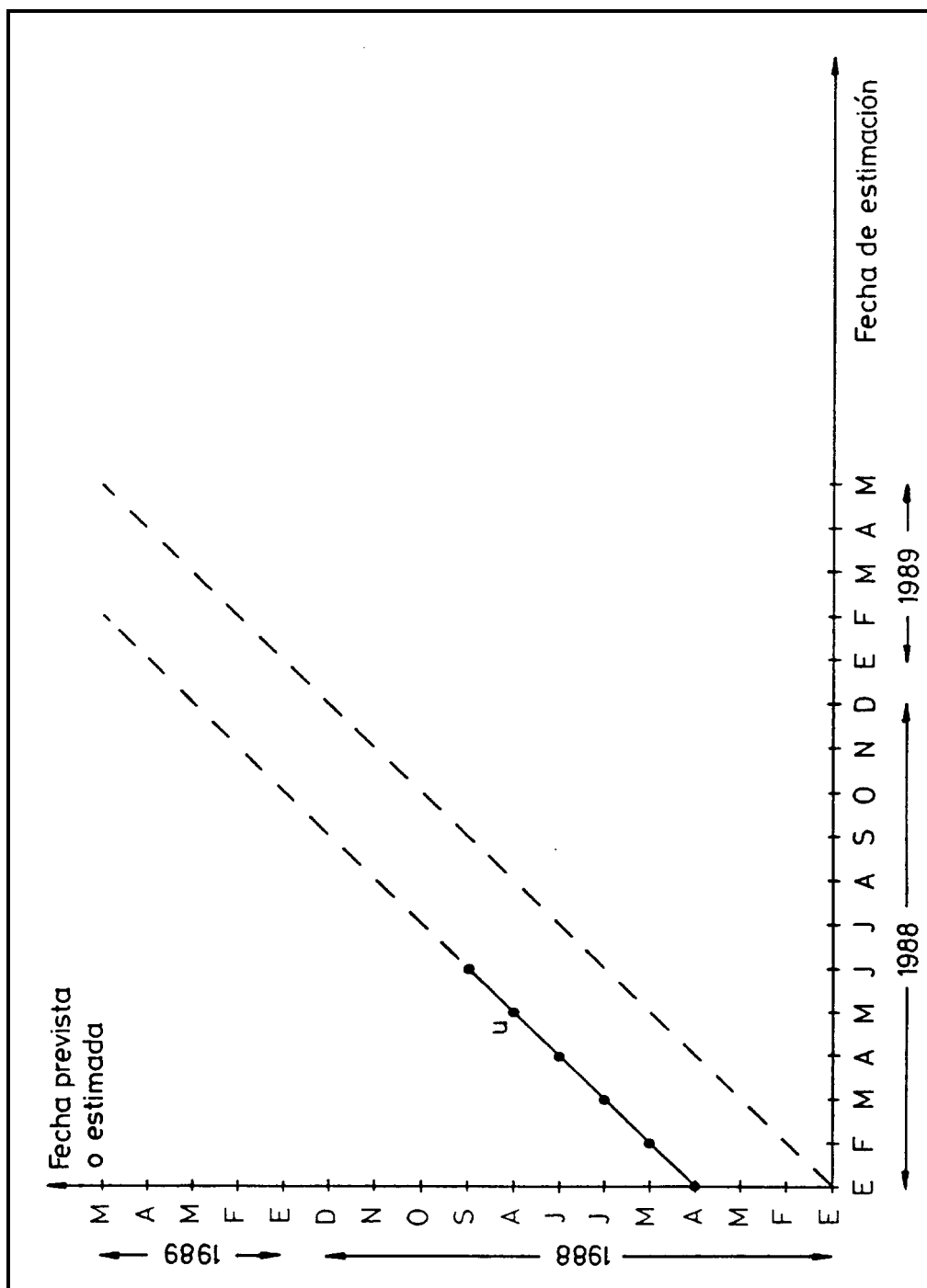


Fig. 7.1.8.11 La evolución de la estimación de la fecha de la etapa U indica un problema muy grave. Si las cosas siguen como están nunca se realizará



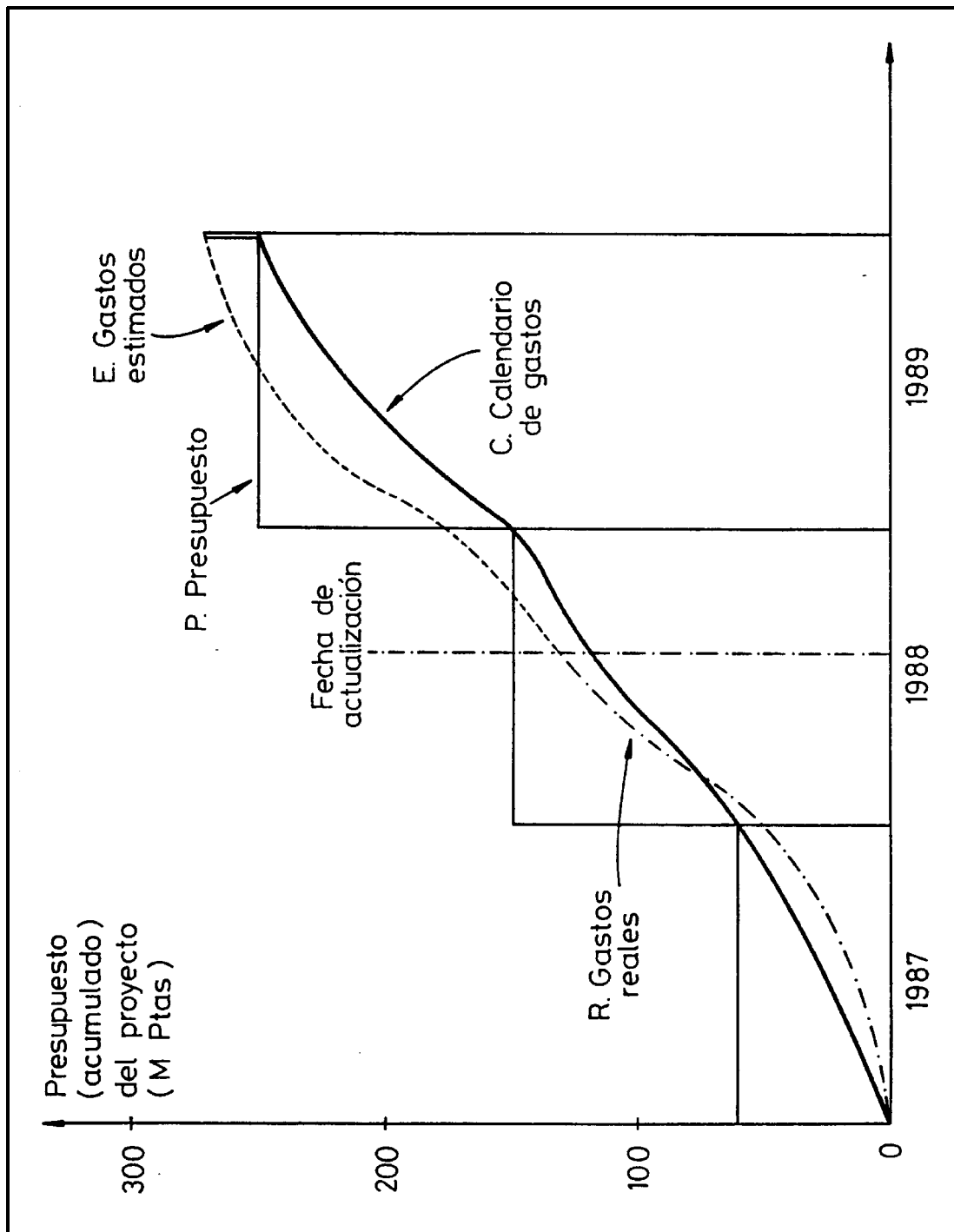


Fig. 7.1.8.12 Presupuesto estimado y evolución de los gastos

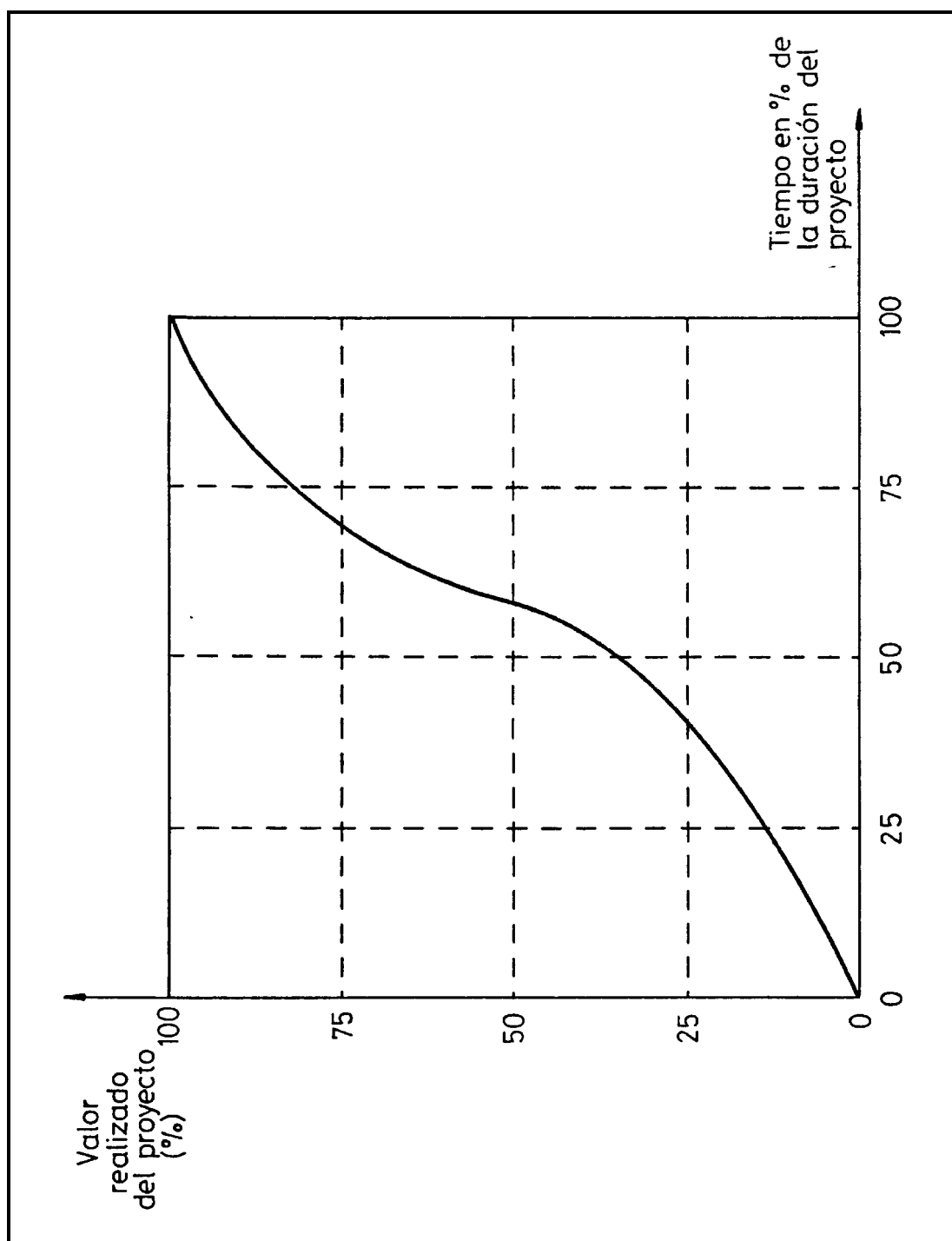


Fig. 7.1.8.13 Valor añadido al proyecto en función del tiempo

La situación se complica si tenemos en cuenta dos hechos que influyen en lo anterior:

- \* El valor añadido al Proyecto no es proporcional al tiempo (*figura 7.1.8.13*), y es respecto a dicho valor que debemos evaluar la desviación en el gasto.
- \* El calendario inicial de gastos acumulados se hizo de acuerdo con un calendario de realización de actividades. En el momento actual pueden haberse producido desviaciones en estas realizaciones (y tal vez un aumento de la duración estimada del Proyecto). Los retrasos influyen en el valor realizado del Proyecto, y en el calendario de gastos, que se extienden sobre una duración mayor.
- \* La contabilización de los gastos puede llevar cierto retraso con respecto a las fechas en que los pagos se han hecho efectivos.

Suponiendo obviado este último inconveniente, ¿cómo podemos saber qué significa una desviación en menos respecto al presupuesto? Tal vez hemos sido muy eficientes y hemos logrado precios muy ventajosos, pero también es posible que hayamos realizado una parte menor de la prevista del Proyecto. Una desviación en más puede deberse a que hemos realizado más de lo previsto o bien que hayamos gastado más de lo previsto en los recursos para realizar el Proyecto (en cuyo caso podría suceder que además éste estuviese retrasado).

Una forma de solventar estas dudas puede obtenerse utilizando además de la curva C (calendario de gastos coherente con la planificación inicial) y la R (gastos reales en que se ha incurrido en la obra realizada) la curva V (valor de la obra realizada, a precios del calendario de gastos). Las diferencias miden los efectos que queríamos poner en evidencia (*fig. 7.1.8.14*).

$$\begin{array}{ll} \text{Desviación en trabajo} & DT = V - C \\ \text{desviación en coste} & DC = V - R \end{array}$$

Si DT es negativo hemos realizado menos del Proyecto de lo que se había previsto; si además DC es negativo nos ha costado más.

### 7.1.8.7 Conclusiones

La planificación, seguimiento y control de Proyectos es una labor delicada, en la que los aspectos de relaciones humanas juegan un papel muy importante. No obstante, es posible la obtención de soportes de tipo automático y formalizado que permitan una mejor eficacia y eficiencia en esta labor.

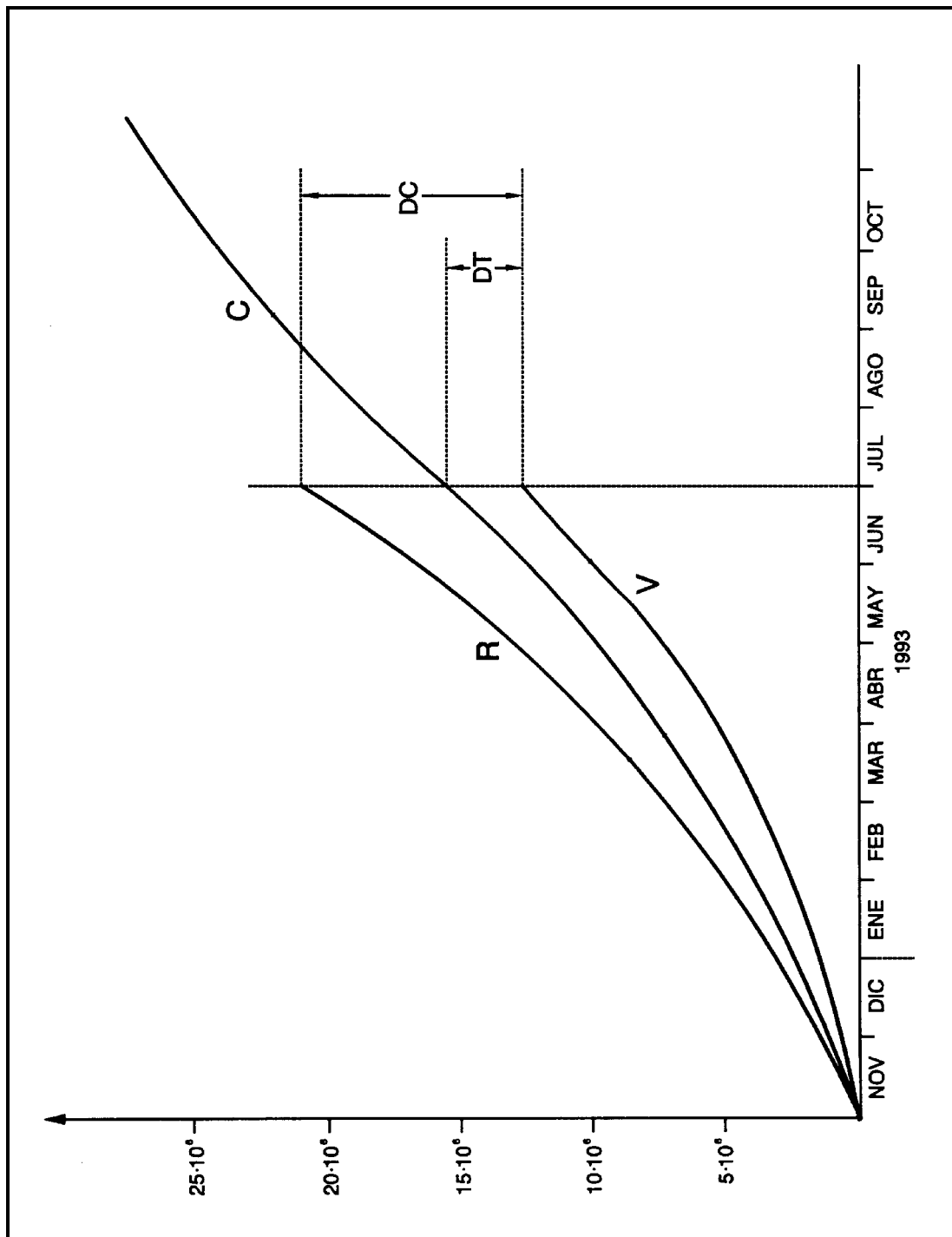


Fig. 7.1.8.14 Diferencia entre el valor realizado, la realización prevista y el gasto incurrido