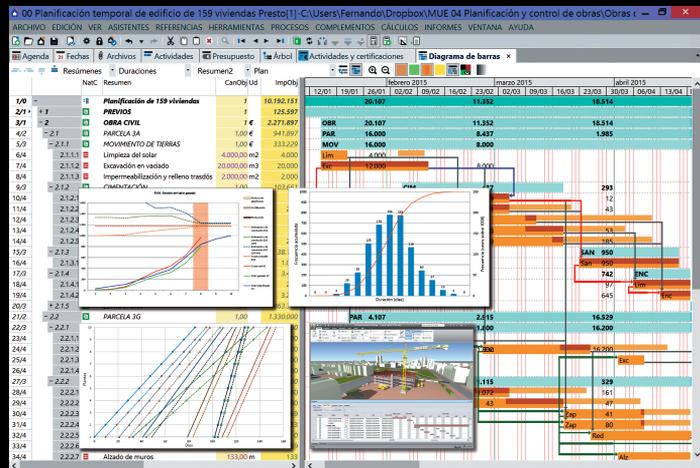
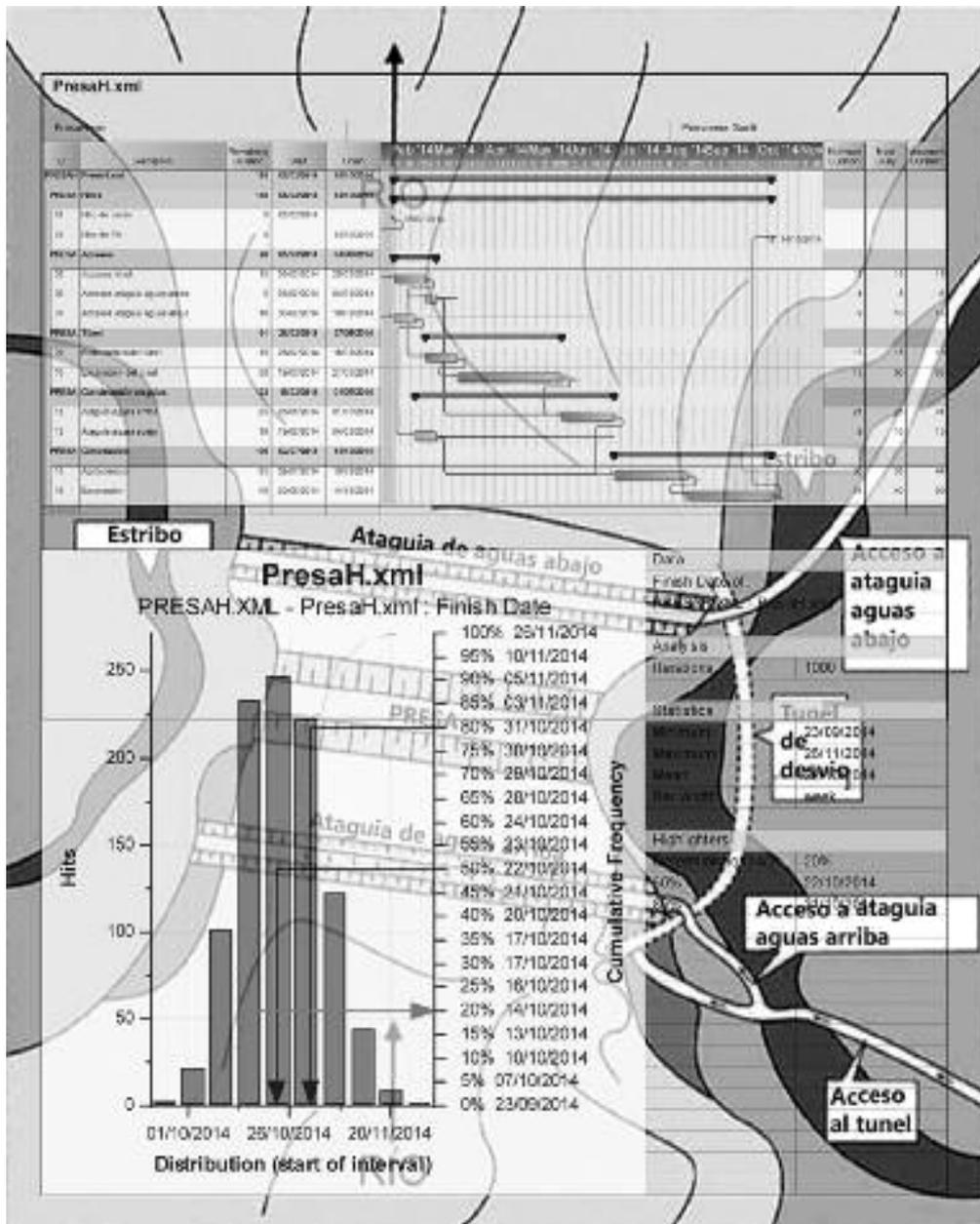


# Métodos de PLANIFICACIÓN y CONTROL de obras



Del diagrama de barras al BIM



Rafael Guadalupe (ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía, UPM), análisis probabilista para el ejercicio de la presa del río Alegría.

**M**anuales  
**U**niversitarios de  
**E**dificación

**4**

*Aldo D. Mattos*  
*Fernando Valderrama*

# Métodos de **PLANIFICACIÓN** y **CONTROL** de obras

Del diagrama de barras al BIM

*Prólogo*

Manuel Javier Martínez Ruiz

*Edición*

Jorge Sainz

**Editorial**  
**Reverté**

© Aldo Dórea Mattos, 2014

aldo@aldomattos.com

© Fernando González Fernández de Valderrama, 2014

fernando.valderrama@presto.es

Esta edición:

© Editorial Reverté, SA, Barcelona, 2014

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede realizarse con la autorización de sus titulares, salvo las excepciones previstas por la Ley 23/2006 de Propiedad Intelectual, y en concreto por su artículo 32, sobre 'Cita e ilustración de la enseñanza'. Los permisos para fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra pueden obtenerse en CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, [www.cedro.org](http://www.cedro.org)).

EDITORIAL REVERTÉ, S.A.

Calle Loreto 13-15, local B · 08029 Barcelona

Tel: (+34) 93 419 3336 · Fax: (+34) 93 419 5189

Correo E: [reverte@reverte.com](mailto:reverte@reverte.com) · Internet: [www.reverte.com](http://www.reverte.com)

Impreso en España · *Printed in Spain*

ISBN 978-84-291-3104-8

Depósito Legal: B 24431-2014

Impresión: Liberdúplex, Sant Llorenç d'Hortons (Barcelona)

# 1420

### **Registro bibliográfico**

Nº depósito legal: B 24431-2014

ISBN: 978-84-291-3104-8

Autor personal: Aldo Dórea Mattos (1965-)

Título: Métodos de planificación y control de obras : del diagrama de barras al BIM / Aldo D. Mattos, Fernando Valderrama ; prólogo, Manuel Javier Martínez Ruiz ; edición, Jorge Sainz

Publicación: Barcelona : Reverté, 2014

Descripción física: 311 p. : il., plan. ; 24 cm

Serie: (Manuales Universitarios de Edificación ; 4)

Bibliografía: Bibliografía: p. [305]-311

Encabezamiento materia: Construcción · Control de costes

Encabezamiento materia: Gestión de proyectos

Encabezamiento materia: Proyectos de construcción

# Índice

Prólogo .....	11
Introducción .....	13
<b>I LA IMPORTANCIA DE LA PLANIFICACIÓN</b>	
Introducción .....	17
La planificación dentro de la gestión del proyecto .....	18
· <i>Objetos y procesos</i> .....	18
· <i>La gestión del proyecto</i> .....	19
Beneficios .....	21
Deficiencias de las empresas .....	23
· <i>Errores habituales</i> .....	24
<b>II DESVIACIONES EN TIEMPO Y COSTE</b>	
Relación entre tiempo y coste .....	27
· <i>Ejemplos de desviaciones</i> .....	28
· <i>Tres casos alemanes</i> .....	29
· <i>En España</i> .....	31
· <i>Los que salieron bien</i> .....	32
Indicadores del tiempo .....	34
Causas y remedios .....	35
· <i>Causas habituales de los retrasos</i> .....	35
· <i>Medidas para mitigar los retrasos</i> .....	36
<b>III CICLO DE VIDA DEL PROYECTO</b>	
La obra como proyecto .....	39
Etapas del ciclo de vida del proyecto .....	40
· <i>Fases</i> .....	40
· <i>Viabilidad</i> .....	42
· <i>Diseño</i> .....	42
· <i>Pre-construcción</i> .....	43
· <i>Ejecución</i> .....	43
· <i>Finalización y uso</i> .....	44
Criterios para planificar .....	45
· <i>Criterios generales</i> .....	45
· <i>Planificación de la fase de viabilidad</i> .....	46
· <i>Planificación de la fase de diseño</i> .....	47

· <i>Planificación de la fase de pre-construcción</i> .....	47
· <i>Planificación de la fase de ejecución</i> .....	48
El Ciclo PDCA .....	48
· <i>Planificar</i> .....	50
· <i>Desarrollar</i> .....	50
· <i>Controlar</i> .....	51
· <i>Actuar</i> .....	51
· <i>Mecánica del ciclo</i> .....	52
Guión de la planificación .....	52
IV LA ESTRUCTURA DE DESGLOSE DE TRABAJO	
Alcance del proyecto .....	53
Estructura de Desglose de Trabajo .....	54
· <i>EDT analítica</i> .....	57
· <i>EDT como mapa mental</i> .....	57
Ayudas para preparar la EDT .....	58
· <i>¿Hasta dónde descomponer?</i> .....	58
· <i>EDT de subcontratas</i> .....	59
· <i>Ayudas para crear la EDT en la etapa de proyecto</i> .....	59
Ejemplo paso a paso: la presa del río alegría .....	64
Resumen de la EDT .....	65
V DURACIÓN DE LAS ACTIVIDADES	
Introducción .....	67
Concepto de duración .....	68
· <i>Reglas prácticas</i> .....	69
Factores que afectan a la duración .....	70
Estimación del plazo total .....	70
Estimación de las actividades .....	70
· <i>Productividad, rendimiento y producción</i> .....	74
Duración y número de equipos .....	76
Tabla de duración y recursos .....	79
· <i>Ejemplo paso a paso: la presa del río alegría</i> .....	81
Estimación rápida de duraciones y equipos .....	81
· <i>Número de equipos</i> .....	87
VI DEFINICIÓN DE LAS PRECEDENCIAS	
Predecesoras y sucesoras .....	89
Tabla de precedencias .....	90
· <i>Ejemplo paso a paso: la presa del río alegría</i> .....	92
· <i>Circularidad</i> .....	93

· Dependencias obligatorias	93
· Dependencias discrecionales	94
Tipos de enlace	94
· Reglas prácticas para la planificación	97
<b>VII CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE RED</b>	
El diagrama de red	99
Diagrama de flechas	100
· Reglas de trazado	101
· Numerar los eventos	102
Diagrama de bloques	103
· Reglas de trazado	103
Ejemplos	105
· Ejercicio	105
Actividades ficticias	107
Red de saneamiento	110
· Presa del río Alegría	111
<b>VIII FECHAS Y HOLGURAS</b>	
Cálculo de fechas y holguras	113
· Fechas	117
· Holguras	117
Camino crítico	118
Ejercicios	120
· Ejemplo: vivienda	120
· Ejemplo: presa del río Alegría	129
Enlaces con retardos o solapes	132
Resumen del camino crítico	133
<b>IX EL DIAGRAMA DE BARRAS</b>	
Introducción	135
Diagrama de Gantt	136
Hitos y fechas obligadas	138
· Aumento y disminución del plazo	139
Situación temprana y tardía	141
Holguras dependiente e independiente	144
· Holgura dependiente	144
· Holgura independiente	144
· Relación entre las holguras	145
· Ejercicio	145
Días naturales y días laborables	147

X	EL ENFOQUE PROBABILISTA	
	Los criterios del PERT .....	149
	Duraciones probabilistas .....	150
	Duración esperada .....	151
	· <i>Producción esperada</i> .....	154
	Desviación estándar y varianza .....	155
	· <i>Desviación estándar de la duración</i> .....	155
	· <i>Varianza de la duración</i> .....	157
	Camino crítico probabilista .....	157
	· <i>Correlación entre las actividades</i> .....	158
	· <i>Cambio del camino crítico</i> .....	159
	Probabilidad de un plazo cualquiera .....	160
	Alternativas al PERT: Monte Carlo .....	163
	· <i>Distribución triangular</i> .....	164
	· <i>El método de Monte Carlo</i> .....	165
XI	CURVAS S	
	La curva S .....	169
	Curva S de costes .....	170
	Curva S patrón .....	172
	Ejemplos .....	177
	· <i>Proyecto y construcción de una presa</i> .....	177
	· <i>Construcción de una línea de transmisión</i> .....	178
	Otros modelos de curvas S .....	181
	Ventajas de las curvas S .....	184
XII	RECURSOS	
	Asignación de recursos .....	185
	Relación recurso-duración .....	187
	Histograma de recursos .....	187
	Curva de histéresis o 'banana' .....	191
	Nivelación de recursos .....	193
	Limitación de recursos .....	198
	· <i>Ejemplo: central de hormigonado</i> .....	200
	Limitación del gasto .....	203
XIII	ACELERACIÓN	
	Introducción .....	205
	Costes directos (CD) .....	206
	· <i>Curvas de tiempo y coste directo</i> .....	206

---

	Coste marginal de aceleración .....	211
	Costes indirectos (CI) .....	212
	· <i>Curvas tiempo-coste indirecto</i> .....	213
	· <i>Costes contractuales</i> .....	213
	Curva tiempo-coste total .....	214
	Ejemplo: reforma .....	216
	Aceleración racional .....	217
XIV	PLANIFICACIÓN FINANCIERA Y ANALÍTICA	
	El punto de vista del cliente .....	223
	El punto de vista de la empresa constructora .....	224
	· <i>Ejercicio: flujo de caja</i> .....	226
	Producción, coste y beneficio .....	231
	· <i>Tres tipos de planificación</i> .....	233
XV	SEGUIMIENTO	
	Motivos para el seguimiento .....	235
	Línea de base .....	236
	Etapas del seguimiento .....	237
	Avance de las actividades .....	237
	Línea de progreso .....	239
	Actualización de la planificación .....	242
	· <i>Duración restante</i> .....	242
	Modificación de la ruta crítica .....	245
XVI	PROGRAMACIÓN	
	Niveles de la programación .....	249
	Programación a largo plazo .....	250
	Programación a medio plazo .....	250
	Programación a corto plazo .....	252
	Metodología PPC .....	254
XVII	DIAGRAMAS DE ESPACIO-TIEMPO	
	Introducción .....	259
	· <i>Origen</i> .....	260
	Representación gráfica .....	260
	Trabajos en direcciones opuestas .....	262
	Previsto y realizado .....	262
	Estudio de caso: túnel .....	263
	Equilibrado de las operaciones .....	265
	Dimensionamiento de la línea de espacio-tiempo .....	268

## XVIII MÉTODO DEL VALOR GANADO EVM

Introducción .....	275
VARIABLES PRINCIPALES .....	276
· Valor planificado PV .....	276
· Valor ganado EV .....	277
· Coste real AC .....	277
· Resumen de las variables .....	277
INDICADORES .....	278
· Variación de coste CV .....	278
· Variación del cronograma SV .....	278
Índice de desempeño del coste CPI .....	279
· Índice de desempeño del cronograma SPI .....	280
PROYECCIONES .....	281
· Presupuesto a la conclusión BAC .....	281
· Estimación a la conclusión EAC .....	282
· Variación a la conclusión VAC .....	283
· Índice de desempeño del trabajo por completar TCPI .....	284
RESUMEN DEL VALOR GANADO .....	285
· Equivalencia de siglas .....	285
· Representación gráfica .....	286
· Ejemplo completo .....	286

## XIX CADENA CRÍTICA CCPM

Origen de la cadena crítica .....	291
Teoría de las restricciones .....	292
Cadena crítica .....	293
Pasos del CCPM .....	295
Colchones .....	298

## XX EL FUTURO DE LA PLANIFICACIÓN Y EL BIM

Del CAD al BIM .....	299
BIM .....	300
Visualizadores 4D .....	302
Del BIM 5D al BIM 4D .....	303
La construcción, una industria más .....	304
Bibliografía .....	305

# Prólogo

*Manuel Javier  
Martínez Ruiz*

La planificación siempre ha sido una de las herramientas básicas de nuestra empresa, Dragados, a la hora de acometer los grandes proyectos que se han construido a lo largo de sus más de setenta años de vida.

Desde el principio, en los míticos servicios técnicos de esta empresa constructora se incluyó un ‘servicio de planificación y métodos’ que se preocupaba de la mejora de la productividad desde el nivel del tajo, la planificación de detalle y la programación y el control de obras.

Hace casi veinticinco años que entré a formar parte de este esfuerzo con grandes maestros como Edmundo Balbontín y Manuel Méndez, que me transmitieron esta fe.

Siempre hemos considerado que la programación de la obra debía incluir en la propia herramienta toda la información de un proyecto, el presupuesto, la estimación y las mediciones; que su gestión debía hacerse en el espacio y el tiempo; y que debía incluir siempre la información gráfica que la hace visible y que permite participar a todos los agentes que intervienen en los procesos de construcción.

Acepté con gusto prologar este compendio de fundamentos de la planificación porque supuse que se trataba de la incursión de uno de sus autores (gran creador y divulgador de herramientas de control del presupuesto) en el mundo de la productividad.

A partir del trabajo de Aldo D. Mattos, Fernando Valderrama –que hasta ahora había registrado grandes cantidades de datos sobre capítulos, unidades y precios unitarios– pasa a hablar de sistemas productivos, actividades, tareas, recursos y duraciones.

Y se da este salto precisamente ahora, cuando, para la salida de la crisis, se vuelve la cabeza hacia la productividad y la importancia de la planificación en las obras. Hay una corriente internacional que plantea como novedad –recogida aquí por los autores– los sistemas BIM (*Building Information Model*) y Last Planner, que son simplemente nuevas expresiones de una forma de hacer las cosas que se viene aplicando desde el nacimiento de nuestra empresa.

La misma herramienta que ha dado fama y honor a Fernando Valderrama (el programa Presto) ha venido siendo fuente de información para completar las bases de datos utilizadas en la defensa del presupuesto, que es al fin y al cabo el principal objetivo de la planificación.

*Manuel Javier Martínez Ruiz es ingeniero de montes y responsable del Servicio de Métodos de la Dirección Técnica de la empresa constructora Dragados.*

Este libro –que incluye los métodos clásicos de planificación– supone un punto de partida fundamental para la formación de los profesionales de la planificación que el sector de la construcción necesita para asegurar su competitividad.

Alentamos a los autores para que nos sigan suministrando herramientas de planificación y gestión del conocimiento que nos sitúen a la vanguardia de la construcción.

Madrid, octubre de 2014.

# Introducción

En la formación de los arquitectos, la planificación ni está ni se la espera. En la formación de los arquitectos técnicos o ingenieros equivalentes, la planificación se limita frecuentemente a la teoría de grafos, complementada –si el profesor es innovador y voluntarioso– con el manejo de un determinado programa de ordenador

En España, y tal vez en algunos países cercanos culturalmente, la enseñanza sigue un esquema profundamente platónico y, en esa misma medida, muy limitado. Se considera que la acción sólo es válida como resultado lógico del conocimiento. Por tanto, es necesario y suficiente entender y asimilar las bases del comportamiento profundo de los sistemas. Alcanzada esta situación –preferentemente con gran esfuerzo–, el pensamiento permite proceder deductivamente, de forma analítica y científica, de abajo arriba, hasta obtener el resultado buscado, que es evidentemente correcto y único.

Dicho en términos de estimación de costes o de tiempos: subdividimos la materia hasta el infinito y más allá, hasta los materiales y hasta cada una de las horas necesarias para colocarlos; contamos el número de ladrillos y multiplicamos por su precio unitario para obtener el coste de la obra, y así el presupuesto se construye como un gran sumatorio; enlazamos las actividades de forma lógica, y así el plazo de la ejecución se obtiene simplemente aplicando un algoritmo.

Actuamos como si la historia no existiese, como si nunca se hubiese construido un edificio similar al nuestro y no hubiese un registro de experiencias; y lo hacemos así porque nuestro método no lo necesita. La simple mención de ratios (como costes medios o rendimientos habituales de ejecución) se asimila en nuestro ámbito al uso degradante de ‘recetas’: lo más contrario posible a la buena enseñanza. Por ejemplo, muchos profesores desaconsejan el uso de cuadros de precios y harían lo mismo con las tablas de producción, si se publicasen.

Sin embargo, *muchos árboles* no siempre son *todo el bosque*. Innumerables profesionales han aprendido a estimar costes y tiempos con estos métodos y se han quedado una y otra vez por debajo de los valores reales. En la mayoría de los casos, una simple comprobación de ratios les indicaría cuán lejos están de llegar a la estimación correcta, aunque sigan convencidos de que ya han localizado todos los pequeños trocitos que forman el proyecto. El procedimiento de arriba abajo (el método sintético) no es menos científico que su

contrario; en las etapas iniciales del proyecto es el único posible; y cuando el nivel de detalle avanza, si los resultados no cuadran, este método suele ser el que proporciona el resultado correcto.

Hay que recurrir a programas de posgrado o cursos avanzados impartidos por profesionales para encontrar la reconciliación de los esos dos sistemas, dentro de un enfoque que transmita adecuadamente las actitudes y las aptitudes necesarias –las competencias transversales y las específicas, en términos *boloñeses*– para que la planificación sirva para algo.

Gonzalo Gómez –en el Programa Executive en Construcción que dirigía en el antiguo Centro Superior de la Edificación (CSE) de Madrid– insistía en que la planificación consistía sobre todo en pensar la forma de ejecutar la obra, analizar las alternativas y asignar los recursos; y en que el programa informático no se ponía en marcha hasta que no estaba claro todo lo anterior. La restricción más importante en la edificación no es el tiempo, sino el espacio físico que impone una limitación a los recursos que pueden trabajar al mismo tiempo y a los materiales que se necesitan. Y las decisiones más importantes del jefe de obra son el número de grúas y el día en que podrán retirarse.

Rafael Guadalupe –con su saber enciclopédico y su entusiasmo por aumentar el suyo y el de los demás– me transmitió un punto de vista amplio e integrado sobre los tiempos, los costes, el valor ganado, los riesgos, el espacio-tiempo, Monte Carlo, las curvas S y toda una serie de referencias, publicaciones, programas informáticos y casos reales de su propia actividad profesional. Además me presentó a Manuel Javier Martínez Ruiz, que ha planificado la ejecución de proyectos de edificación y obra civil por todo el mundo y ha aceptado escribir el prólogo a este libro.

He asistido también a clases magistrales de Edmundo Balbontín, la gran referencia histórica de la planificación en España, y de Víctor Sardá, que estimula al alumno a entrar en ‘modo de tiempos’ como punto de partida para realizar una planificación creíble y que se cumpla en la práctica.

Éste es mi trasfondo teórico sobre esta materia, completado con la lectura de muchos libros clásicos sobre el tema, que poco a poco he ido trasladando a nuestro programa Presto como un laboratorio de investigación personalizado, con el objetivo de que los profesionales pudiesen tener un sistema informático más adaptado a las necesidades de la construcción y, sobre todo, más integrado con los ingresos y los costes.

En ese contexto, y dentro de la colaboración que mantengo con la Editorial Reverté como asesor de esta colección de manuales universitarios, en 2012 me llegó la edición original del libro *Planejamento e controle de obras*, de Aldo Dórea Mattos, para valorar la conveniencia de su edición en español. Hojear el libro fue una agradable sorpresa, ya que hablaba de la planificación tradicional, pero también de-



dicaba un capítulo a cada uno de los temas citados más arriba, con un enfoque práctico, lleno de tablas, ejemplos y gráficos. Como cualquier libro técnico que se refiere a un contexto real, también éste necesitaba una adaptación, más costosa que una simple traducción; y la editorial en ese momento decidió no abordarlo. Lo estudié a fondo y me sirvió de inspiración para investigar algo más sobre curvas S y otros temas similares, poco conocidos en España.

En el verano de 2013, un viaje de vacaciones por Brasil termina en un hotel de playa al norte de Salvador de Bahía. El hotel está vacío, el tiempo meteorológico es malo, el tiempo cronológico que se tarda en ir y volver a la ciudad dificulta los movimientos. El segundo día, inesperadamente, aparecen unos autobuses llenos de estudiantes. Se trata de un congreso de estudiantes de ingeniería civil del nordeste de Brasil.

Me presento, me invitan a asistir y me dan el programa. La clase magistral la da Aldo D. Mattos, el único brasileño que conozco, indirectamente, entre los doscientos millones. En la clase, el profesor entusiasma con la planificación a los quinientos alumnos presentes: ni uno baja a la playa hasta que el congreso termina. Después imparte otra conferencia en la que describe las dificultades de la ejecución del nuevo estadio de Manaus, unas dificultades menos relacionadas con su inaccesible situación y su duro clima que con las exigencias y las manías de la FIFA.

Tras las conferencias, con un café delante, hablamos de su libro. Ya que en su día no se tradujo, le propongo hacer una edición adaptada. Aldo acepta que yo figure como coautor. El editor resulta estar también presente en el hotel –hemos compartido ese viaje–, por lo que los términos del acuerdo quedan inmediatamente aprobados.

El resto es este libro. El contenido es el libro de Aldo, en el que se ha prescindido de los procedimientos detallados sobre el cálculo de las redes, pues damos por supuesto que el lector dispone de un programa informático; se ha añadido un capítulo inicial que proporciona un contexto histórico a la planificación, más por su incumplimiento que por lo contrario; se han incorporado también algunos conceptos sobre estimación rápida de plazos y duraciones, así como un apartado sobre el método de Monte Carlo, ambos basados en ideas sugeridas por Rafael Guadalupe. El libro termina con un nuevo epílogo sobre el BIM, la gran esperanza blanca de la sociedad para que los edificios construidos no sólo se parezcan al proyecto en la fachada, sino también en el coste, en el plazo y en el cumplimiento de los requisitos y las necesidades de los usuarios.

Fernando Valderrama  
*En nombre de Aldo D. Mattos,  
que ya ha escrito bastante.*

A todos los ingenieros y técnicos con  
quienes trabajé en tantos proyectos  
y en tantos lugares

*AM*

A Felipe, José Antonio, Raquel,  
José Manuel, Amelia, César, Enrique,  
Eduardo, Jorge, María, Sergio, Néstor,  
Julieta y Samuel.

*FV*

# La importancia de la planificación

*Planifique anticipadamente: Noé construyó el Arca cuando no llovía.*

Cardenal Richard C. CUSHING (1885-1970)

*Una meta, sin un plan, es sólo un deseo.*

Antoine de SAINT-EXUPÉRY (1900-1944)

## Introducción

La construcción es uno de los sectores industriales que ha sufrido más cambios sustanciales en los últimos años. Con la intensificación de la competencia, la globalización de los mercados, la demanda de artículos más modernos, la velocidad con la que surgen nuevas tecnologías, el aumento del nivel de exigencia de los clientes –sean los usuarios finales o no– y la limitada disponibilidad de recursos financieros para llevar a cabo los proyectos, las empresas se han dado cuenta de que es imprescindible invertir en los procesos de gestión y control, ya que sin estos sistemas de dirección se pierden de vista los principales indicadores: el tiempo, el coste, el beneficio, el retorno de la inversión y el flujo de caja. La información rápida es un recurso que vale oro.

En este contexto, los procesos de planificación y control pasan a desempeñar un papel principal en las empresas, ya que tienen un fuerte impacto en el rendimiento de la producción. Los estudios realizados en diversos países demuestran que las deficiencias en la planificación y en el control se encuentran entre las principales causas de la baja productividad del sector, de sus elevados sobrecostes y de la baja calidad de sus productos.

Especialmente en España, la percepción del sector de la construcción sobre la necesidad y la validez de la planificación ha experimentado un cambio radical en los años de la última crisis:

- Porque fuera de España no se concibe iniciar un proyecto sin una planificación detallada y creíble.
- Porque existe una nueva sensibilidad al sobrecoste, cuyo control implica también el control del tiempo.
- Porque hay muchas oportunidades de trabajo para quienes sepan planificar y controlar el coste de un proyecto.

- Porque el auge del *Building Information Modeling* (BIM) implica modelar lo que se va a construir realmente y la planificación tiene mucho más sentido en esas condiciones.

En la actualidad, más que nunca, la planificación es una forma de asegurar la sostenibilidad de la empresa por su capacidad para que los administradores obtengan respuestas certeras y rápidas, gracias al seguimiento de la evolución del proyecto y, eventualmente, a su reorientación estratégica.

## La planificación dentro de la gestión del proyecto

### *Objetos y procesos*

Los profesionales de la construcción –especialmente los que han sido formados desde el punto de vista del desarrollo del proyecto– tienden a considerar el diseño como la definición más o menos exhaustiva del objeto que hay que construir, tal como quedará cuando haya sido finalizado. Una vez alcanzado este objetivo, en forma de documentación gráfica y escrita, suelen pensar que la tarea fundamental del proyecto está terminada.

Esta simplificación –fundamental para que el profesional de proyectos se centre en su tarea sin estar continuamente pensando en la viabilidad de la construcción– se apoya en que, por sus conocimientos y su experiencia, el proyectista asume que existen procedimientos que permitirán alcanzar este estado final; no es necesario pensarlos ni explicitarlos en el proyecto, puesto que otros profesionales los desarrollarán cuando sea necesario.

Plantearnos un problema proporcionando la descripción del estado final de la solución. La tarea es descubrir una secuencia de procesos que llevará a ese estado meta a partir de un estado inicial. La conversión de la descripción del proceso a la descripción del estado nos permite reconocer que hemos acertado [...]. La idea es: dado un plano, encontrar la receta.<sup>1</sup>

Esta secuencia de procedimientos no es única. Depende del contexto (como las características del lugar y del momento), de los condicionamientos de coste y plazo, de los recursos disponibles, de los conocimientos, la experiencia y la personalidad de los agentes implicados.

Dado un determinado diseño, la mayor o menor facilidad para encontrar procesos que lo generen como resultado final se conoce como ‘constructividad’.<sup>2</sup>

Sin embargo, muchos profesionales competentes, con experiencia en obra, desean empezar a construir cuanto antes y tienden a considerar la planificación como un mal necesario; no reconocen que si construyen con éxito es porque realmente están planificando

1. Herbert A. Simon, *The sciences of the artificial* (Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1966), página 211.

2. Joshua M. Lobel, *Building information: means and methods of communication in design and construction* (Cambridge, Massachusetts: Department of Architecture, MIT, 2008), página 23.

· Véase también: M. Loyola y L. Goldsack, *Constructividad y arquitectura* (Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2010).

# Desviaciones en tiempo y coste

*El dinero es el rey, pero el tiempo es Dios.*

De un discurso en el RIBA, 1998.

## Relación entre tiempo y coste

Las desviaciones en tiempo son tan habituales o más que las desviaciones en coste.<sup>1</sup>

Proyectos %	Con exceso de plazo %	Con sobrecoste %
> 90	2,9	4,4
60 - 90	1,5	7,4
40 - 60	8,8	11,8
10 - 40	48,5	35,3
< 10	38,2	41,2

1. Según Y. Olawale y M. Sun "Cost and time control of construction projects: inhibiting factors and mitigating measures in practice", *Construction Management and Economics*, volumen 28, número 5, 2010, páginas 509-526.

2. P.A. Thompson y J.G. Perry (edición), *Engineering construction risks: a guide to project risk analysis and risk management* (Thomas Telford, 1992).

3. Peter W.G. Morris y George H. Hough, *The anatomy of major projects: a study of the reality of project management* (Chichester: Wiley, 1987).

4. Joe Martin, Theresa Keoughan Burrows e Ian Pegg, "Predicting construction duration of building projects", en *Shaping the change* (XXIII FIG Congress, Múnich, Alemania, octubre de 2006).

5. Fernando Valderrama, "Planificació: costs i riquesa de les nacions", *Informació i Debat* (Col·legi d'Arquitectes de Catalunya), número 3, 1999, página 39.

Thompson y Perry encontraron en 1993 que el 75 % de los proyectos financiados por el Banco Mundial tenían retrasos de al menos el 28 %, <sup>2</sup> mientras que Morris y Hough calculan que los proyectos con sobrecoste son alrededor del 50 %, con incrementos típicos entre el 40 % y el 200 %. <sup>3</sup> Martin y otros encontraron que mientras el 20 % de los proyectos ejecutados en el Reino Unido en 2005 experimentaron incrementos de coste, casi el 40 % sobrepasaron el plazo fijado en el contrato. <sup>4</sup>

Además, las desviaciones en coste pueden ser absorbidas por los diferentes agentes de la construcción en diferentes proporciones, dentro de un juego de 'ganar-perder' que puede ser más o menos beneficioso para cada uno de ellos. Sin embargo, las desviaciones en tiempo son negativas para todos: cuando un proyecto se retrasa –con independencia del causante, y aunque haya una indemnización por ello–, el cliente recibe el edificio más tarde. Por tanto, el tiempo es un recurso de mayor valor, puesto que se puede canjear por dinero, pero no a la inversa.

En los países más desarrollados, la planificación temporal del proyecto es más importante que la estimación detallada del coste. <sup>5</sup>

El tiempo es oro: el coste de la mano de obra es alto, y el coste financiero –que mide el valor temporal del dinero– es crítico. En los países con pocos recursos, por el contrario, lo que cuesta son los objetos, y el tiempo tiene un valor mucho más relativo. En estos entornos es frecuente oír que la planificación no sirve para nada. Al mismo tiempo, en los países más desarrollados todos los agentes tienen un comportamiento más previsible y mayor nivel de compromiso, lo que aumenta la fiabilidad de las estimaciones temporales. De esta forma, la planificación temporal es una señal de modernización y avance.

En este mismo sentido, la llamada ‘planificación 4D’ añade a las tres dimensiones físicas el tiempo, con lo que se reconoce implícitamente su mayor importancia, ya que el coste es sólo la dimensión número cinco.

Las desviaciones de los proyectos en coste y tiempo van frecuentemente en paralelo. La relación teórica entre el tiempo que se tarda en realizar una tarea aislada y su coste es inversa, ya que para obtener una mayor productividad es necesario, en general, un mayor gasto. Sin embargo, desde el punto de vista global de la obra, debido a los costes indirectos y a otros factores, una mayor duración implica casi siempre un mayor coste. Al mismo tiempo, cuando una obra ha sufrido modificaciones importantes pero ha sido necesario terminarla en el plazo previsto, también suele ir acompañada de fuertes sobrecostes. De esta forma, alejarse del plazo adecuado es costoso, tanto por exceso como por defecto.

El Pabellón puente para la Expo 2008 de Zaragoza demuestra el impacto en el sobrecoste de un plazo reducido para la ejecución. Proyectado por Zaha Hadid con un presupuesto inicial de 21 M€, acabó costando más de 80 M€, pero se terminó a tiempo. Hugo Corres, fundador y director de Fhecor –la empresa que fue capaz de interpretar el retorcido diseño de Zaha Hadid y convertirlo en algo realizable en el poco tiempo disponible– lo resumía así:

Cuando una obra se hace en poco tiempo, se deben emplear medios extraordinarios, cuyos costes son superiores a los normales. Dobles y triples turnos de trabajo, horarios nocturnos, medidas de seguridad frente a imprevistos, etcétera.<sup>6</sup>

Lo mismo ocurre con las obras que por razones políticas deben terminarse antes de las siguientes elecciones, como la reforma de la autopista de circunvalación M-30 de Madrid, realizada en los tres años previstos, pero con un sobrecoste superior al 60%.

#### *Ejemplos de desviaciones*

Hay numerosos ejemplos de edificios y obras bien conocidos que han sufrido enormes desviaciones en los costes y plazos estimados al inicio del proyecto.

6. Llätzer Moix, *Arquitectura milagrosa* (Barcelona: Anagrama, 2010) página 129.

## Ciclo de vida del proyecto

Un proyecto de arquitectura o ingeniería tiene que obedecer necesariamente a una secuencia lógica de desarrollo del producto final. Las fases del ciclo de vida del proyecto deben realizarse con el tiempo suficiente para poder alcanzar sus objetivos. A su vez, cada fase genera productos que son los datos de entrada para las fases sucesivas.

### La obra como proyecto

En el mundo de la construcción, el término 'proyecto' se asocia generalmente a la etapa de diseño de un edificio, o de una obra civil, durante la cual se genera el conjunto de planos, detalles y especificaciones necesarios para su construcción. El término equivalente en inglés sería *design*. Pueden ser proyectos de edificios, de estructuras, de instalaciones, de carreteras o de aeropuertos, entre otros muchos. En este libro, sin embargo, vamos a usar como norma el término 'proyecto' en su sentido de gestión, cuyo equivalente en inglés sería *project*:

Un esfuerzo temporal que se emprende para crear un producto, un servicio o un resultado singular.<sup>1</sup>

De esta definición podemos extraer algunas características importantes de un proyecto de construcción.

#### TEMPORAL

El proyecto tiene un alcance en el tiempo, con una duración finita, con un inicio y un final bien definidos. El final es cuando se alcanzan los objetivos fijados. La principal diferencia entre un proyecto y una empresa es que la empresa no tiene un final deseado o previsible.

#### PRODUCTO ÚNICO

La singularidad se traduce en la concretización del producto físico y material que representa el objetivo del proyecto. No se trata de una línea de montaje o de producción en serie, sino de un esfuerzo para generar un bien tangible único. Aunque un contratista construya bloques iguales, no se anula el carácter de singularidad, ya que no se trata de una producción en serie, sino de la realización de productos similares que cumplen con el espíritu de un proyecto.

1. Así lo define el PMBOK; véase la nota 4 del capítulo 1.

A partir de esta definición es posible clasificar algunas iniciativas de construcción como ‘proyectos’ y otras como ‘operaciones repetitivas y continuas’.

Proyecto	No proyecto
La construcción de un almacén de grano	El movimiento diario de los granos con la maquinaria
Ampliación de una planta de hormigón	Operación diaria de la planta de hormigón
Instalación de una fábrica de prefabricados de hormigón	Fabricación de los elementos prefabricados
La construcción de un hotel de diez plantas	Operación y mantenimiento del hotel

En este texto se usan muchos ejemplos que se centran en la etapa de ejecución de las obras, pero todos los conceptos y los procedimientos de la planificación son aplicables a los proyectos en el sentido más amplio recién definido.

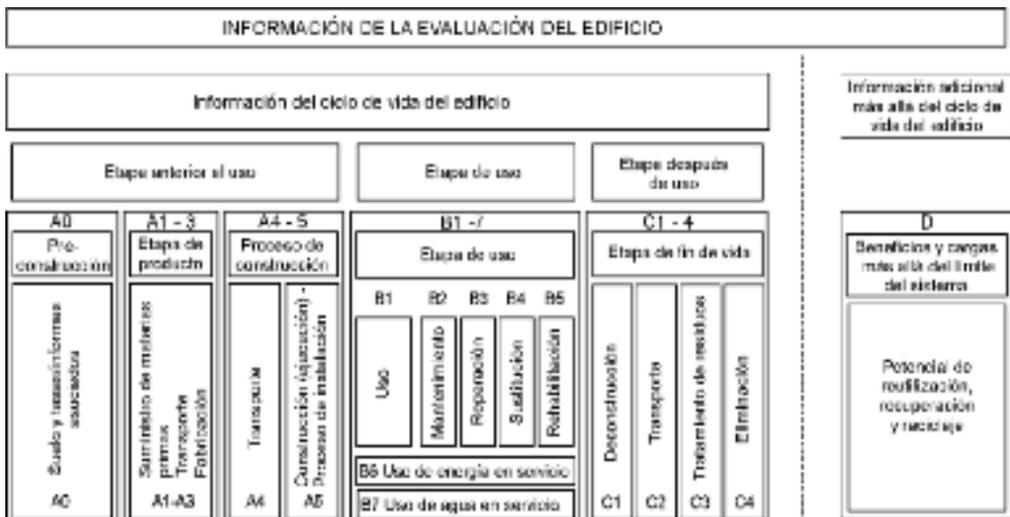
### Etapas del ciclo de vida del proyecto

#### Fases

La subdivisión en fases de un proyecto, entendido en el sentido amplio del término, puede realizarse de distintas maneras.

La norma UNE-EN 15643-4, ‘Sostenibilidad en la construcción’, establece un desglose de las distintas etapas del proyecto desde el punto de vista del análisis económico que abarca todo el ciclo de vida del edificio.

*Etapas del proyecto en la norma UNE-EN 15643-4.*



## La estructura de desglose de trabajo

El primer paso de la planificación es identificar las actividades que serán consideradas por el planificador y que compondrán el cronograma general del proyecto.

Esta etapa requiere una atención especial, ya que en ella se descompone el alcance total del proyecto en tareas más sencillas, más fáciles de gestionar.

La identificación de las actividades no debe ser el trabajo de una sola persona. Deben colaborar y contribuir todos los involucrados en el proyecto. Lo que no se haya identificado y enumerado como actividad no aparecerá en el cronograma, un problema que puede adquirir proporciones enormes en el futuro, ya que dará lugar a retrasos y sobrecostos.

Subdividir el proyecto en actividades no es un trabajo sencillo: requiere una cuidadosa lectura de los planos y los detalles, entender bien los procedimientos constructivos y ser capaz de representar las tareas de la obra como paquetes de trabajo pequeños y comprensibles.

### Alcance del proyecto

Se llama 'alcance' (en inglés *scope*) al conjunto de los componentes que configuran el producto y los resultados esperados del proyecto. En otras palabras, es el ámbito total, la envergadura del proyecto en su conjunto.

Para gestionar correctamente un proyecto, sus fronteras deben estar perfectamente definidas. Por tanto, el alcance debe contener y describir todos los resultados esperados del proyecto, que estarán incorporados a la planificación. Lo que no se incluye en el alcance no se planifica, quedará fuera del cronograma, no será asignado a ningún responsable y no será comunicado a los equipos de campo. Al mismo tiempo, la planificación no puede incluir ningún proceso destinado a obtener resultados que no formen parte del alcance.

### SUGERENCIAS

El planificador debe dedicar mucho esfuerzo a identificar los paquetes de trabajo para generar un plan que tenga sentido y sea aplicable en la práctica; tiene que conseguir que el alcance sea aceptado y aprobado por todos los agentes involucrados: directores del proyecto, jefes de obra, ingenieros, responsables de cada

paquete, etcétera. Al conseguir el consenso, los demás agentes se convierten en coautores y no pueden culpar al equipo técnico por omisión o descuido.

Por ejemplo, la construcción de una estructura singular puede requerir fases de ejecución no habituales en estructuras más sencillas, con la instalación de medios especiales, como cimbras. El planificador, si no es especialista en el área, puede simplificar excesivamente las tareas necesarias y su duración. Si los responsables de la ejecución pueden comprobar las actividades consideradas, se reduce la probabilidad de que la planificación resultante sea inaplicable.

Durante la definición del alcance del proyecto es habitual que algunos elementos todavía no estén completamente especificados y detallados. En tales casos, si el planificador no consigue subdividir el trabajo en actividades menores, debe dejarlo bien identificado para detallarlo mejor en el futuro. El hecho de que todavía no haya suficiente nivel de detalle no es excusa para que el elemento se excluya de la planificación. Un ejemplo típico es el paisajismo, que a menudo no está completamente definido al comienzo de la obra, pero que se puede incluir provisionalmente en el cronograma como una tarea genérica, que más tarde se desglosará en sembrado de césped, plantación de árboles, construcción de espejos de agua, iluminación, etcétera.

La técnica de dejar paquetes grandes de trabajo para descomponerlos más adelante se llama 'planificación por ondas' (*Rolling Wave Planning*). A medida que se aproxima el momento de la ejecución del paquete, el grado de información crece y el planificador puede aumentar el nivel de detalle de la planificación.

El procedimiento recomendado para identificar las actividades del proyecto es la descomposición del alcance en la Estructura de Desglose de Trabajo (EDT), como se muestra a continuación.

### **Estructura de Desglose de Trabajo**

Para planificar una obra, ésta debe subdividirse en partes más pequeñas. A través de esta descomposición, el todo –que es el alcance completo de la obra– se descompone progresivamente en unidades más pequeñas y más fáciles de manejar. Los grandes bloques se van desmenuzando sucesivamente, y así se crean paquetes de trabajo más pequeños, hasta que se alcanza un nivel de detalle que permita planificar, es decir, asignar duraciones y recursos a las actividades y facilitar la atribución de responsabilidades.

La estructura jerárquica resultante se llama Estructura de Desglose de Trabajo, EDT (*Work Breakdown Structure, WBS*), y se define así en la norma ISO 21500:

# Duración de las actividades

## Introducción

Tras identificar las actividades que integran la planificación, el siguiente paso es determinar la duración de cada una.

De estas duraciones depende el plazo de la obra y la fecha de los hitos intermedios. Las duraciones mal asignadas pueden corromper la planificación, lo que la haría inviable o sin utilidad práctica para los responsables de la obra.

Sin embargo, y por analítico y riguroso que sea el planificador, la duración es siempre una estimación y, por tanto, está sujeta a un margen de error que puede ser menor para actividades repetitivas, habituales y conocidas, o mayor para nuevas unidades de obra, en las que no se dispone de datos históricos de referencia.

Como resultado de esta incertidumbre, además de planificar (el cuadrante P del ciclo PDCA), también hay que controlar (cuadrante C) para analizar las diferencias y ajustar el cronograma a lo que queda del proyecto.

El valor real de la planificación y la confianza que merece residen principalmente en dos parámetros: la duración y la lógica (la interdependencia entre las actividades). Estos elementos son la base para el cálculo de la red y generarán los siguientes resultados:

- Plazo total del proyecto.
- Fechas de inicio y final de cada actividad.
- Identificación de actividades cuya ejecución debe suceder necesariamente en la fecha calculada para no demorar los proyectos (actividades críticas).
- Holguras de actividades no críticas.
- Margen de las actividades para desplazarse en el tiempo y minimizar los conflictos entre los recursos (nivelación de recursos).
- Identificación de las actividades más adecuadas para comprimir la duración, a fin de reducir el tiempo total del proyecto (aceleración).

## SUGERENCIAS

El ordenador no puede sustituir la capacidad intelectual humana. De nada vale tener el mejor programa informático si los datos de entrada no tienen sentido. Hay una regla que dice: *garbage in, garbage out*, si lo que entra es basura, lo que sale es basura.

Por tanto, antes de crear archivos e introducir datos mecánicamente en un programa es necesario asegurarse de que tanto la metodología como los datos son los adecuados.

### Concepto de duración

La duración es la cantidad de tiempo necesaria para la ejecución completa de la actividad medida en periodos de trabajo.

#### DURACIONES RAZONABLES

Aplicados a las duraciones obtenidas o previsibles, estos criterios permiten determinar si las actividades de la EDT están bien definidas. Si se obtienen duraciones más largas, será necesario desdoblar actividades; si son más cortas, habrá que refundir varias.

- La unidad de trabajo mínima en la planificación para la construcción es un día.
- El Ministerio de Defensa estadounidense (Department of Defense, DoD) establece una duración máxima de 44 días laborables, que equivalen a dos meses, y se admite un 5% de excepciones.
- El PMBOK recomienda que la duración sea menor del doble del periodo de control. Para seguimiento quincenal, por ejemplo, la duración máxima es de 30 días.
- Si las duraciones son muy inferiores al periodo de control, el día en que se realiza el seguimiento muchas de ellas ya han acabado o no han empezado todavía.

En obras muy largas o en las primeras fases de la planificación se pueden usar semanas, o utilizar duraciones que sean siempre múltiplos de 5 días, que equivalen a semanas de trabajo. Es importante que el estándar se fije al inicio de la planificación y que todas las duraciones usen la misma referencia.

La duración siempre debe referirse a días laborables, es decir, aquéllos en los que se trabaja realmente, y no a días naturales. Por ejemplo, una actividad que se estima en dos semanas de trabajo, de lunes a viernes, tiene una duración de 10 días y no de 12, como indicaría la cuenta sobre el calendario, ya que el sábado y el domingo no intervienen.

No conviene mezclar actividades de duraciones muy distintas, a menos que algunas estén sin desarrollar en una etapa determinada.

#### SUGERENCIAS

Los proveedores y los subcontratistas suelen dar plazos de entrega de materiales o para realizar sus trabajos en días naturales. Hay que tenerlo en cuenta, ya que 20 días laborables son muy diferentes de 20 días naturales.

Una buena EDT facilita mucho la asignación de duraciones, ya que las descomposiciones ayudan a definir los límites de cada

## Definición de las precedencias

Ahora que se han identificado las actividades e incluyen el alcance del proyecto, el paso siguiente es establecer la lógica que rige estas actividades. Hay que establecer su secuencia, el orden en que se producen y qué tipo de dependencia o precedencia existe entre ellas.

Este paso de la planificación tiene que ser bien ejecutado, porque el producto final (el cronograma con las fechas estimadas de cada actividad) está directamente afectado por la secuencia definida. La definición de la duración y el establecimiento de la interdependencia entre las actividades son los puntos claves de la planificación. No sirve de nada preparar cuidadosamente la EDT y tener el mejor programa de ordenador si no se define una secuencia de ejecución lógica, plausible y viable.

En esta etapa, es importante que el equipo llegue a un acuerdo sobre la lógica constructiva para que tenga sentido el cronograma: el plan de ataque de la obra, la relación entre las actividades y la secuencia de ejecución de unidades de obra más coherente y viable.

### Predecesoras y sucesoras

Establecer las precedencias consiste en enlazar cada actividad con las que dependen de ella. Aunque varias actividades pueden ocurrir al mismo tiempo, las relaciones de interdependencia dan lugar a cadenas que, visualmente, tendrán el aspecto de una malla.

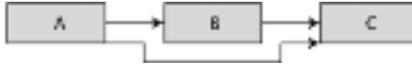
Por ejemplo, para hormigonar tiene que estar montado el encofrado y colocada la armadura, y para ello antes tiene que haber sido encargada y comprada. Para pintar una pared el revestimiento tiene que estar terminado y seco.

Al montar la planificación es importante identificar bien las predecesoras de cada actividad, que son las que necesariamente deben haber terminado para que la actividad pueda comenzar. Solamente se deben considerar las actividades en las que la relación es inmediata o directa. Por ejemplo, la pintura de la planta cinco no se puede realizar antes de terminar los pilares de la planta cuatro, pero no es una actividad inmediatamente anterior. La actividad anterior será la aplicación o el secado del yeso de la misma planta cinco.

### SUGERENCIAS

Si no se aplica bien el criterio de la dependencia inmediata, se crearán enlaces redundantes en la red. Por ejemplo, si B depen-

de de A, y C depende de B, no es necesario decir que C depende de A, ya que esta relación viene dada. Se puede ver en la siguiente imagen.



*Enlaces redundantes.*

Las conexiones redundantes no añaden información a la red y sólo aumentan el esfuerzo de cálculo.

Las actividades predecesoras también se llaman precedentes, antecesoras o antecedentes.

El concepto de sucesor es exactamente el inverso de predecesor. Una actividad sucesora de otra es la que se puede iniciar inmediatamente después de finalizar esta. Es fácil ver que si A es predecesor de B, B es sucesor de A.

No todas las actividades tienen predecesoras. Las actividades iniciales de un proyecto pueden empezar desde el primer momento y no dependen de la aparición anterior de otras tareas.

No todas las actividades tienen sucesoras. Las actividades finales del proyecto no tienen sucesoras porque no hay ninguna a continuación de ellas.

#### SUGERENCIAS

Aunque pueden existir actividades sin predecesoras y sin sucesoras, es recomendable que sean una sola o muy pocas.

Es muy común, especialmente en planificaciones con muchas actividades, encontrar actividades que han quedado por error sin predecesores o sin sucesores, *flotando* en el cronograma.

### Tabla de precedencias

La tabla de precedencias es la lista donde se definen y registran las actividades y sus interdependencias. Típicamente tiene tres columnas:

#### CÓDIGO

Identificación simplificada de la actividad, mediante letras, números o una combinación de caracteres alfanuméricos.

#### ACTIVIDAD

Nombre de la tarea, tal como se haya definido en la EDT.

#### PREDECESORAS

Actividades inmediatamente predecesoras de la actividad en cuestión. Para identificarlas, la mejor manera es preguntar: ¿de quién depende esta actividad?

La tabla de precedencias de la vivienda utilizada en el capítulo dedicado a la EDT es la figura siguiente.

## Construcción del diagrama de red

### El diagrama de red

Una vez creado el cuadro con la duración de cada actividad y la secuencia lógica de la obra, el siguiente paso es representar gráficamente las actividades y sus dependencias por medio de una malla o diagrama de red.

#### CRITERIOS DE CÁLCULO

Hasta la popularización de los ordenadores, la representación gráfica de la malla formada por las actividades y sus enlaces era un paso previo imprescindible para el cálculo de las fechas y de los demás resultados que se buscan mediante la planificación.

Con el tiempo, el dibujo de esta malla y la aplicación mecánica de los algoritmos de cálculo de fechas se ha convertido casi en el único contenido de la enseñanza de la planificación, mientras que se han olvidado los conceptos fundamentales, como la determinación de las actividades adecuadas a cada proyecto, la estimación de las duraciones y la toma de decisiones sobre la secuenciación, temas que hemos desarrollado anteriormente en este libro. La planificación se ha convertido así exclusivamente en un ejercicio de teoría de grafos, en el que suponían conocidos los datos anteriores y sólo era necesario resolver correctamente un problema matemático, cuya solución era única.

Actualmente, los programas informáticos obtienen todos los resultados necesarios (fechas, holguras y camino crítico) sin más datos que los definidos en la tabla de duraciones y precedencias. Las mallas se pueden generar a posteriori –si se desea– para la comprobación visual. Por tanto, ya no es necesario conocer las técnicas de creación de grafos ni realizar manualmente cálculo alguno.

Sin embargo, en este libro vamos a describir las redes utilizando diagramas:

- Por su capacidad para describir fácilmente las redes que se usarán en los ejercicios.
- Por sus ventajas para visualizar las relaciones entre las actividades y el camino crítico, para analizar alternativas y estudiar simulaciones.
- Para resolver gráficamente dudas sobre la secuenciación en casos cuya definición basada exclusivamente en una tabla de precedencias resulta especialmente compleja.

- Para interpretar los diagramas generados por los propios ordenadores.
- Y por su interés histórico.

Al mismo tiempo, se supone que el lector dispone de los programas informáticos necesarios para obtener los resultados deseados, puesto que los cálculos manuales se explicarán muy someramente.

#### ORÍGENES DEL PERT Y DEL CPM

En 1957, la Marina de los Estados Unidos desarrolló el *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) para realizar la planificación y el control de los submarinos del proyecto Polaris. La característica más importante del PERT es que propone el uso de duraciones probabilísticas, para lo que asigna a cada actividad un plazo optimista, un plazo pesimista y otro más probable.

Ese mismo año, Du Pont de Nemours desarrolló el método el *Critical Path Method* (CPM), cuya aportación consiste en acortar el plazo total del proyecto, para lo que reduce exclusivamente la duración de las actividades del camino crítico.

#### TIPOS DE DIAGRAMAS DE RED

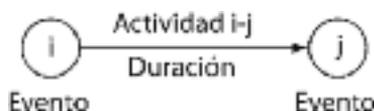
Hay dos maneras de construir el diagrama de la red, según las actividades se representen mediante flechas o mediante bloques. Los dos procesos son muy similares, ambos permiten calcular las fechas y las holguras, y los dos identifican la ruta crítica; así que el resultado es el mismo.

En este libro se presentan ambos y se señalan sus ventajas y desventajas, aunque el sistema de bloques se utiliza más en la actualidad, especialmente en los programas comerciales.

#### Diagrama de flechas

En este sistema, las actividades están representadas por flechas orientadas entre dos eventos o 'nodos', que son puntos donde convergen o surgen las actividades. Los métodos PERT y CPM originales se basaban ambos en el uso de flechas.

Cada flecha parte de un evento y termina en otro, y se puede identificar mediante un código propio o bien indicando estos dos eventos, ya que no puede haber dos actividades con el mismo par de eventos inicial y final.



*Actividad entre dos eventos.*

El código suele escribirse sobre la flecha, y la duración debajo.

## Fechas y holguras

Una vez definidas las actividades con sus duraciones y las vinculaciones entre ellas, de acuerdo con una lógica racional, y generado el diagrama de la red, el siguiente paso es calcular las fechas en las que se puede realizar cada actividad y, en consecuencia, la duración total de la obra. Si todas las actividades estuviesen en serie, la duración total sería la suma de todas las duraciones, pero al haber actividades simultáneas, la duración total es obviamente menor que esa suma.

Estos cálculos se realizaban tradicionalmente a mano, aplicando procedimientos o algoritmos relativamente sencillos, pero muy pesados, en función del sistema elegido para la representación, por flechas o por bloques.

En la actualidad existen programas informáticos suficientemente difundidos y accesibles para realizar este trabajo y carece de sentido describir en detalle los antiguos procedimientos manuales con el objeto de realizar ejercicios que ya sólo tienen carácter académico. El lector que desee conocerlos encontrará innumerables textos donde se han descrito. Aunque describiremos brevemente los métodos manuales de cálculo, supondremos en lo sucesivo que se dispone de un programa adecuado y nos centraremos en describir, explicar e interpretar los resultados.

### SUGERENCIAS

En los ejemplos calculados del libro –que figuran en las tablas y en los diagramas de barras–, a diferencia del criterio usado en los gráficos de flechas y bloques, las fechas de finalización se refieren al día que la actividad debe estar terminada, de forma que una actividad cuya fecha de finalización sea el día 16 en realidad tiene que estar acabada el día 15 a última hora. Las actividades de duración nula empiezan y acaban el mismo día y el día inicial de la obra es el día 1, no el cero.

La razón de todo esto es facilitar las operaciones, ya que la duración es así la diferencia exacta entre las dos fechas.

### Cálculo de fechas y holguras

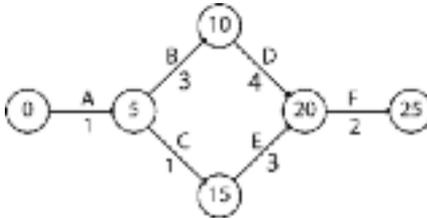
Utilizaremos el siguiente ejemplo, que el lector puede resolver con cualquiera de los sistemas a su disposición.

Actividad	Predecesoras	Duración
A		1
B	A	3
C	A	1
D	B	4
E	C	3
F	D, E	2

El primer objetivo del cálculo es conocer la fecha en la que puede iniciarse cada actividad y también la última fecha posible para que no se retrase la obra. Como comprobación para quien desee realizar los cálculos a mano, se presentan en primer lugar los resultados por flechas y por bloques.

**CÁLCULO EN EL DIAGRAMA DE FLECHAS**

En este sistema la actividad y su duración se escriben encima y debajo de su flecha.

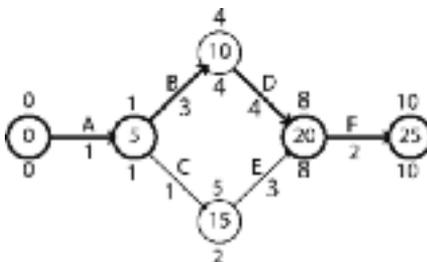


*Diagrama de flechas con los datos de partida.*

El proceso de cálculo se realiza dos veces.

En primer lugar, se recorren los eventos en orden creciente, buscando la primera fecha en la que se puede alcanzar el evento, que se anota debajo del nodo. El primer evento se inicia el primer día de la obra, que por comodidad se suele escribir como día o ('cero'). Para los demás eventos, se obtiene la fecha en la que pueden haber terminado las actividades que llegan a cada uno de ellos, que es la fecha de inicio del evento en la que se originan más su duración. De todas éstas, se toma la más tardía, ya que las actividades que terminan antes tienen que esperar al resto.

Cuando se llega al evento final, su fecha de inicio es la fecha en la que termina la última actividad y, por tanto, el día en que termina la obra.

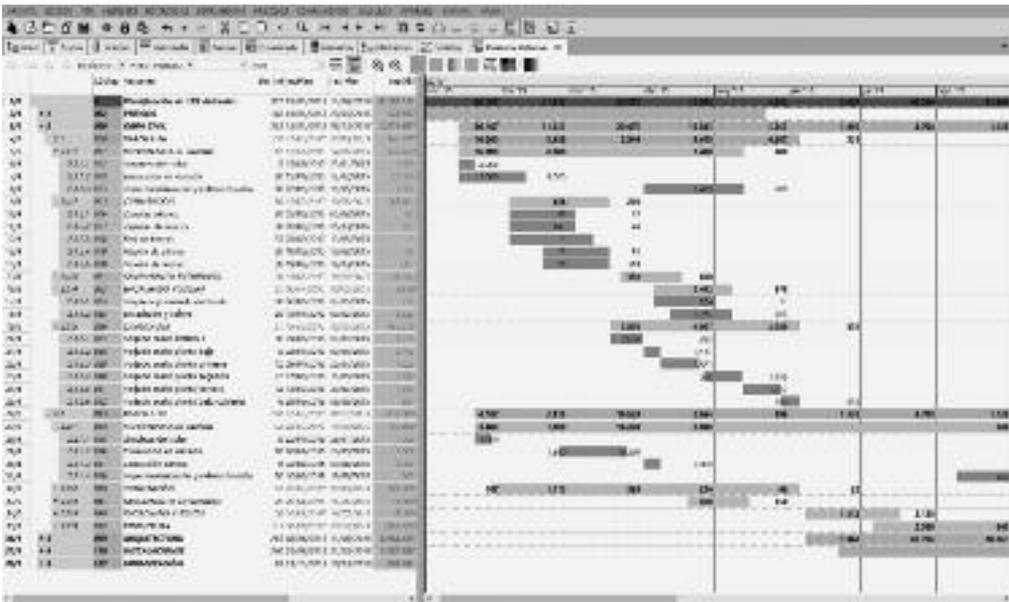


*Diagrama de flechas con las fechas tempranas y tardías.*

# El diagrama de barras

## Introducción

El diagrama de barras o ‘cronograma’, generado a partir de la planificación, es fruto de un procedimiento bien definido que plasma gráficamente y de forma integrada el resultado de los cálculos.



*Visualización integrada de actividades, barras y datos por meses; cortesía de Rafael Guadalupe.*

El cronograma es el instrumento de planificación por excelencia del día a día de la obra. Sobre esta base, el equipo de dirección puede tomar las siguientes decisiones:

- Programar las actividades de los equipos.
- Hacer los pedidos de suministros y subcontratas.
- Alquilar la maquinaria.
- Contratar y formar a los trabajadores.
- Evaluar el progreso de las actividades.
- Controlar los retrasos o adelantos de las actividades.
- Replanificar los trabajos.
- Dirigir las reuniones.

Las propiedades que poseen los diagramas de barras para mostrar fechas y holguras se han visto ya en los ejemplos de los capítulo-

los anteriores. A continuación veremos algunas posibilidades más avanzadas.

#### SUGERENCIAS

Recuerde el distinto criterio sobre el día de finalización de las actividades que se usa en los métodos gráficos respecto a las tablas y los diagramas de barras.

### Diagrama de Gantt

La visualización de las actividades con sus fechas de inicio y fin se realiza mediante el gráfico denominado 'diagrama de Gantt', por el ingeniero estadounidense Henry Gantt, que lo introdujo como herramienta de control de la producción en la construcción de buques a principios del siglo xx.

El diagrama de Gantt es muy sencillo: a la izquierda figuran las actividades y a la derecha sus barras respectivas, dibujadas en una escala de tiempo. La longitud de la barra representa la duración de la actividad, cuyas fechas de inicio y fin se pueden leer usando las subdivisiones de la escala de tiempo.

El diagrama de Gantt es una herramienta de control muy útil, atractiva y fácil de leer. Presenta la situación relativa de las actividades en el tiempo de una forma directa y sencilla, que puede ser leída e interpretada por cualquier persona con un mínimo de formación.

En los diagramas generados con sistemas digitales se presenta una información más completa que en los diagramas tradicionales, como la siguiente:

Información	Representación
EDT	Mediante adentrados o códigos decimales
Secuenciación	Flechas entre barras
Tipos de enlace	Por el grafismo y la disposición de las flechas
Fechas	Barras de colores y marcas
Holguras	Añadidas a las barras de las fechas
Actividades críticas	En otro color o regruesadas
Avance	Barras de fechas reales

#### COMPARACIÓN CON LOS DIAGRAMAS DE FLECHAS Y BLOQUES

En el diagrama de barras se ven bien los distintos tipos de holguras, lo que permite localizar errores en la planificación, como actividades que hayan quedado desconectadas de la red. Además, es un buen punto de partida para el análisis de los recursos, la programación de la ejecución y la planificación financiera, y permite ver también gráficamente el progreso de las actividades.

## El enfoque probabilista

Hasta ahora hemos realizado todas las estimaciones de duraciones asignando valores fijos o deterministas, tal como se definió originalmente en el método CPM.

Sin embargo, la definición de las duraciones es un ejercicio de previsión, ya que el planificador no conoce de antemano su valor 'correcto'. Aunque disponga de datos de obras similares, es inevitable un margen de error, una imprecisión, y trabajar con un valor fijo no es prudente ni fiable. Para tener en cuenta esta variabilidad entra en juego el concepto de duración probabilista o *estocástica*, siguiendo la idea propuesta en el método PERT.

### Los criterios del PERT

El método PERT original parte de dos suposiciones fundamentales:

- Se pueden determinar tres valores para cada duración: optimista, pesimista y más probable.
- La distribución de probabilidades entre estas tres duraciones es la misma para todas las actividades.

Además, se elige para esta distribución de probabilidades una función concreta, la distribución beta; y, dentro de ella, la que tiene como desviación estándar una sexta parte del 'rango' o distancia entre duración optimista y pesimista; y como media o duración esperada, la media de las tres duraciones, asignando a la duración más probable un peso cuatro veces superior a las otras dos. Todos estos conceptos se definen con detalle más adelante.<sup>1</sup>

Es sorprendente observar que estas mismas suposiciones se utilizan en la actualidad, cincuenta años más tarde, en la creencia de que son verdades absolutas, sin entender las razones de su origen ni plantear ninguna alternativa. Por ejemplo, se toman las tres duraciones, se obtiene la media como indica el método y se utiliza este resultado, sin que la mayoría de las veces se entienda la diferencia entre esta duración y el valor más probable utilizado como dato. Algunos autores hacen notar que si ya es difícil estimar una duración, poco sentido tiene inventarse tres.<sup>2</sup>

Clark, uno de los autores del PERT, indica que no tenía ninguna información que apoyase la decisión de usar una distribución beta, que es la primera que se le ocurrió para trabajar con tres estimaciones. A partir de tres estimaciones no se pueden deducir los cuatro

1. Véase Charles E. Clark, "The PERT model for the distribution of an activity Time", *Operations Research*, volumen 10, número 3, mayo-junio 1962, páginas 405-406.

2. Jesús Mateos Perera, *La programación en la construcción* (Madrid: Bellisco, 2003), página 326.

parámetros que definen una distribución beta, por lo que tomó la decisión de igualar la desviación estándar al sexto del rango, por analogía con la distribución normal, y elegir esa expresión para la media aritmética porque simplificaba los cálculos y evitaba tener que resolver una ecuación de tercer grado, algo difícil con los recursos de la época.

Por tanto, estos supuestos son cuestionables. Ya en 1968 se planteó que la desviación estándar debería ser 3,2 veces el rango, en lugar de 6, y que las duraciones optimista y pesimista no deberían ser valores extremos, sino los correspondientes a los percentiles 5% y 95%.<sup>3</sup>

En 1983, Robert Harris observaba que seguían sin desarrollarse estudios para conocer de forma más realista la distribución de la probabilidad de las duraciones, afirmación que sigue siendo cierta en la actualidad, y ya plantea funciones alternativas, como la triangular, que veremos más adelante.<sup>4</sup>

En la actualidad, los sistemas informáticos permiten utilizar otras formas de variabilidad, más adecuadas a la construcción y más flexibles. En este capítulo describiremos la estimación por tres puntos clásica del PERT, pero introduciremos también referencias a otras posibilidades.

El método PERT también implica suposiciones para que la obtención del camino crítico probabilista sea válida, suposiciones que se comentarán en el apartado correspondiente.

## Duraciones probabilistas

Al trabajar con tres duraciones, el planificador puede generar estadísticas para evaluar la fiabilidad del plazo total calculado para el proyecto.

### DURACIÓN MÁS PROBABLE

Se entiende por duración más probable (M) de una actividad la más habitual, en circunstancias normales. Es la duración que se obtendría un mayor número de veces si se ejecuta la operación una y otra vez; corresponde a la variable estadística 'moda' o al término inglés *most likely*.

La duración más probable es la mejor estimación del planificador y es la utilizada en el enfoque determinista; se basa en la experiencia o en los registros de proyectos anteriores y se ajusta considerando las circunstancias de cada situación, como la calidad del equipo, las condiciones de acceso, el conocimiento de los trabajos, las condiciones de suministro o el grado de supervisión.

### DURACIÓN OPTIMISTA

La duración optimista (O) de una actividad es la que se daría cuando todas las condiciones para su realización son óptimas, si todo va bien, situación que resulta muy poco probable.

3. Joseph J. Moder y E. G. Rogers, "Judgment estimate of the moments of PERT type distributions", *Management Science*, volumen 15, número 2, octubre 1968.

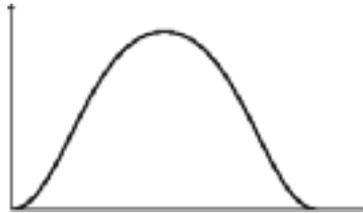
4. Robert B. Harris, *Precedence and arrow networking techniques for construction* (Ann Arbor, Michigan: University of Michigan, 1973); versión española: *Técnicas de redes de flechas y precedencias para construcción* (México: Limusa, 1983).

## La curva S

En el mundo real, los proyectos son largos e incluyen muchas actividades, en ellos se utilizan varios tipos de recursos y se consume dinero. Para el planificador y el equipo de dirección es importante determinar el avance de la obra a lo largo del tiempo. Sin embargo, la evolución de un proyecto, especialmente en la construcción, no se desarrolla linealmente en lo relativo a la asignación de recursos. El comportamiento es por lo general del tipo lento-rápido-lento.

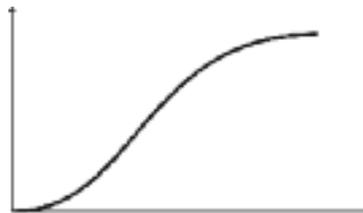
El nivel de actividad de un proyecto típico se asemeja a una distribución normal, es decir, a una campana de Gauss. El trabajo realizado por unidad de tiempo suele empezar a ritmo lento, con pocas actividades simultáneas; luego adquiere un ritmo más rápido, con varias actividades en paralelo; y cuando el trabajo está llegando a su fin, la cantidad de trabajo disminuye. Ese mismo ritmo lento-rápido-lento aparece en el consumo de recursos y en el coste.

*Ritmo de gasto según una campana de Gauss.*



Consideremos ahora el trabajo o el coste acumulado desde el origen. Si trazamos alguno de estos parámetros en un gráfico en función del tiempo, la curva mostrará la forma aproximada de una letra S; de ahí el nombre de curva 'S'.

*Curva de gasto acumulado correspondiente a la campana de Gauss.*

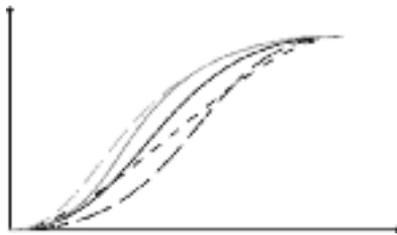


- La curva acumulada de una curva se denomina su 'integral', y la integral de una campana de Gauss es una curva denominada 'logística'.

- El pico de la campana equivale al punto de inflexión o cambio de concavidad de la curva S; es el punto en que el ritmo de consumo empieza a decrecer.

La curva S de un proyecto es un resultado del cronograma que se obtiene al planificar y puede aplicarse al consumo de cualquier recurso, pues representa un avance físico o monetario.

Obviamente, la forma de la curva S de un proyecto no coincide necesariamente con la de otro. El aspecto de la curva depende de la secuencia de actividades y su cantidad de recursos o costes, así como de la duración total del proyecto. Existen muchas configuraciones posibles, desde las poco onduladas, casi lineales, a las que presentan dos concavidades bien visibles.



Varios tipos de curvas S.

### Curva S de costes

Para generar una curva S, el planificador escoge el parámetro que desea controlar y a partir de las fechas indicadas en el cronograma acumula los valores en cada intervalo de tiempo. Los valores se representan en un gráfico de avance acumulado y tiempo.

La siguiente tabla ejemplifica el método de obtención de la curva S aplicada a los costes de un proyecto a partir de la planificación por meses.

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Excavación</b>	1000											
<b>Cimentación</b>		1800	1800									
<b>Estructura</b>				2600	2600	2600						
<b>Instalaciones</b>						1800	1800	1800				
<b>Acabados</b>							1200	1200	1200	1200		
<b>Fachada</b>											800	
<b>Limpieza</b>												600
<b>Total</b>	1000	1800	1800	2600	2600	4400	5600	3000	1200	1200	800	600

El histograma tiene la forma aproximada de una curva de Gauss, mientras que la curva acumulada sigue el patrón de la curva S. Si el trabajo fuese igual todos los meses –lo que no es habitual en ningún proyecto–, la curva S sería una recta.

## Recursos

Los responsables de la ejecución de las obras suelen trabajar en situaciones en las que los recursos –ya sean humanos, materiales o equipo– imponen restricciones en la planificación. Esto sucede, por ejemplo, cuando el cronograma muestra dos actividades que se deben realizar al mismo tiempo, pero no están disponibles los recursos necesarios para ello. Este tipo de situaciones son muy comunes y llevan a la conclusión de que planificar las actividades teniendo en cuenta exclusivamente el factor tiempo no resuelve todos los problemas.

En los capítulos anteriores, la planificación se ha desarrollado suponiendo implícitamente que hay una fuente ilimitada de recursos. En este capítulo, la teoría se enriquece asignando recursos a las actividades. Con la introducción de este elemento en la red podemos generar un histograma que muestre la cantidad necesaria de cada recurso en cada momento del proyecto y evaluar si es posible satisfacer esta demanda, ya que muchas veces la situación de las actividades en el cronograma provoca una gran concentración de recursos en un período determinado, que va disminuyendo después rápidamente.

Estas oscilaciones pueden minimizarse mediante la nivelación de recursos, una operación que permite desplazar algunas actividades dentro de los límites de sus holguras, y reducir así el pico máximo de recursos sin cambiar el plazo del proyecto.

### Asignación de recursos

Se da el nombre de recurso a los insumos necesarios para llevar a cabo una actividad. Los recursos pueden ser de varias categorías:

Categoría	Ejemplo
<b>Mano de obra</b>	Carpintero, albañil, soldador, montador, proyectista
<b>Material</b>	Hormigón, tubería de saneamiento, placa de acero, perfil metálico
<b>Equipamiento</b>	Camión, tractores, pala cargadoras, máquinas de soldadura, pilotadora
<b>Dinero</b>	Euros, dólares, pesos

Un recurso puede aparecer en una o más tareas.

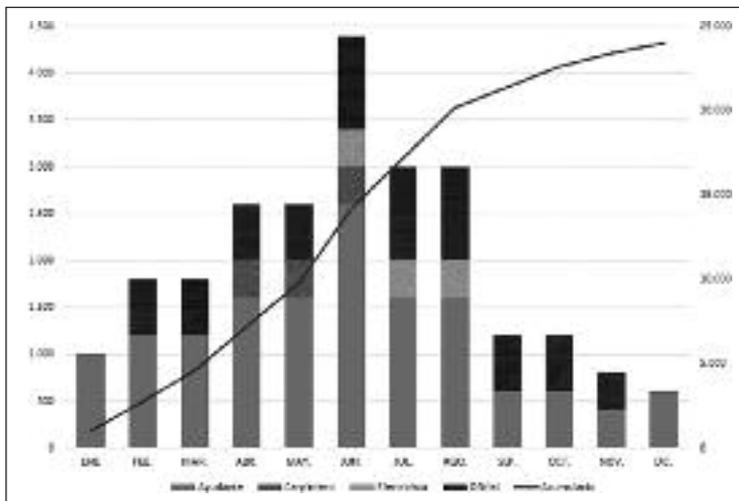
La asignación de recursos consiste en atribuirlos a las distintas actividades de la planificación. La asignación es a la vez cualitativa (albañil, tractor, perfil metálico) y cuantitativa (3 albañiles, 2 tractores, 50 toneladas de perfiles).

La siguiente tabla ejemplifica el método de obtención de la curva S para la mano de obra del ejemplo del capítulo anterior.

Actividad	Recursos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Excavación	5A	1.000											
Cimentación	3O+6A		1.800	1.800									
Estructura	3O+2C+8A				2.600	2.600	2.600						
Instalaciones	2E+2O+5A						1.800	1.800	1.800				
Acabados	3O+3A								1.200	1.200	1.200	1.200	
Fachada	2O+2A												800
Limpieza	3A												600
<b>Total</b>		1.000	1.800	1.800	2.600	2.600	4.400	5.600	3.000	1.200	1.200	800	600

A = Ayudante, O = Oficial, C = Carpintero, E = Electricista

El cálculo mensual de horas-hombre es sencillo: es el número de trabajadores de la cuadrilla multiplicado por 200 horas mensuales. Para la cimentación, por ejemplo, que requiere 3 oficiales y 6 ayudantes, el total mensual de horas-hombre es  $(3 + 6) \times 200 = 1800$  Hh. Para simplificar, se suman las horas de todos los trabajadores, independientemente del oficio.



Histograma con horas mensuales (columnas) y horas-hombre acumuladas (curva).

En la figura se ilustran las horas-hombre mensuales en forma de histograma, con los valores a la izquierda, y las horas-hombre acumuladas en forma de curva S, con los valores a la derecha.

# Aceleración

## Introducción

El tiempo y el coste de un proyecto están inextricablemente unidos. Es fácil ver que la variable 'coste' responde a cualquier modificación de la variable 'tiempo'. Un cambio de plazo implica un cambio de coste y viceversa. Si se acelera el proyecto, el coste se verá afectado por la necesidad de horas extras y por el despliegue adicional de personal y de equipo. Por otra parte, si se aumenta el plazo del proyecto, el coste también se ve afectado, debido a la ineficiencia que conlleva el retraso.

La implementación de un proyecto está muy condicionada por aspectos financieros, es decir, por su coste. Cualquier actividad requiere el uso de personas, equipos, materiales o pagos a terceros –en el caso de trabajos subcontratados–, que consumen dinero y determinan el resultado financiero y económico del proyecto.

El aspecto de los costes se ha tratado rápidamente en el capítulo XII, dedicado a los recursos. En él se ha visto cómo se puede asignar un valor monetario a las actividades, a un camión o a un trabajador, y obtener el histograma de dinero.

En este capítulo vamos a analizar la técnica de acelerar o comprimir el cronograma, partiendo del concepto de coste marginal. Interpretando los costes directos, indirectos y contractuales de los proyectos y su comportamiento en función del tiempo, el planificador puede identificar el punto óptimo, que es la duración para la cual el coste total del proyecto es mínimo.

El análisis que se describe aquí se basa en la aceleración del proyecto de acuerdo con la técnica PERT/CPM y su efecto en el coste total. Aunque el razonamiento resulta válido para cualquier sector, este capítulo examina específicamente los costes desde el punto de vista de un proyecto típico del mundo de la construcción.

A efectos de su comportamiento para la aceleración del proyecto, los costes se pueden agrupar en tres grandes familias:

- Costes directos.
- Costes indirectos.
- Costes contractuales.

En el capítulo XIV, dedicado a la planificación financiera y analítica se detallará más cada tipo de coste, en relación con los ingresos que le corresponden.

## Costes directos (CD)

Un proyecto implica una gran cantidad de costes, que se distribuyen en la ejecución de las diversas actividades, en la supervisión de los trabajos y en los gastos de funcionamiento de la empresa, entre otros muchos orígenes.

Se llaman costes directos (CD) o internos a los que están implicados específicamente en la ejecución de las actividades facturables al cliente; incluyen el coste de la mano de obra que participa directamente en su ejecución, los materiales consumidos y el equipamiento utilizado.

Los CD se pueden calcular a partir de las descomposiciones de costes unitarios correspondientes a las unidades de obra. Por ejemplo, en una unidad de obra de albañilería, los CD incluyen el albañil, el ayudante, los ladrillos y el mortero. En el caso de una excavación, los CD incluyen la excavadora, los camiones y sus respectivos operadores.

Los costes directos se suelen clasificar por lo que denomina su *naturaleza*.

### MANO DE OBRA

Horas de trabajo de los operarios, incluidas las cargas sociales y adicionales (peligrosidad, trabajo nocturno, etcétera).

### MATERIALES

Productos y sistemas que quedan incorporados a la obra; normalmente incluyen el suministro a pie de obra, más impuestos, gastos de aduanas, etcétera.

### MAQUINARIA

Coste de propiedad (amortización e intereses), de funcionamiento (combustible, lubricante, operador) y de mantenimiento (seguros, revisiones, reparaciones, piezas).

A veces se utiliza también una naturaleza denominada 'medios auxiliares', que se refiere a maquinaria y equipos de poca entidad, cuyo coste se asigna como un porcentaje del resto de los costes directos, como andamios o puntales. Esto no debe confundirse con los costes indirectos, que se describen a continuación.

Es importante observar que sólo hay coste directo cuando se ejecutan actividades de producción, es decir, tareas que forman parte del presupuesto o contrato establecido con el cliente y que se abonan directamente como tales. Si no se realiza ningún metro cuadrado de pared, no se puede hablar de coste directo.<sup>1</sup>

### *Curvas de tiempo y coste directo*

Dice la buena técnica que cada proyecto debe planificarse teniendo en cuenta sus condiciones 'normales', es decir, con la duración natural de sus actividades en las circunstancias más apropiadas para

1. Véase Colbert Demaria Boiteux, *Administração de projetos: PERT/CPM/ROY* (Río de Janeiro: Interciência, 1979).

## Planificación financiera y analítica

En este capítulo se obtiene un nivel de detalle mayor que el de apartados anteriores, pues se calculan las necesidades reales de fondos, lo que requiere incorporar en la planificación la diferencia entre las fechas en las que se genera contablemente un ingreso o un gasto y el día en que realmente se cobran o se pagan.

Posteriormente añadiremos una explicación sencilla sobre la forma de analizar los costes para que el beneficio calculado en cualquier momento de la ejecución represente realmente el estado de pérdidas o ganancias de la obra.

Para conseguir estos dos objetivos es necesario conocer previamente dos aspectos: 1, los distintos tipos de coste que se manejan habitualmente en la construcción, y su comportamiento en relación con los tiempos, algo que ya hemos visto en el capítulo XIII; y 2, las diferencias entre los puntos de vista del cliente y de la empresa constructora, que vemos a continuación.

### El punto de vista del cliente

Hasta ahora, la planificación se ha fijado únicamente en el coste. Éste es el único aspecto que debe considerar el cliente –o el gestor del proyecto, que actúa en nombre del primero–, ya que en general no existen ingresos asociados a la obra hasta que se pone en marcha.

La tarea del gestor del proyecto consiste en generar las certificaciones previsionales –es decir, el importe de los pagos que el cliente tendrá que realizar al contratista en cada momento, en función de la planificación estimada– de forma que tome las medidas para disponer de ellos. Esta planificación –que tiene que estar preparada cuando todavía no existe una planificación detallada por parte de la empresa constructora– puede obtenerse aplicando al presupuesto los porcentajes mensuales de curvas S de proyectos similares, como hemos visto anteriormente.

Para calcular con más precisión los fondos necesarios hay que ajustar los importes obtenidos a las condiciones que figuren en el contrato de ejecución:

- Anticipos al contratista, que se van devolviendo a medida que avanza la ejecución y se realizan los cobros.
- Cobros por acopios de materiales o por la ejecución de instalaciones provisionales, que también se van

descontando a medida en que se ejecutan las unidades de obra en las que se consumen esos recursos.

- A la inversa, retención como garantía de un porcentaje de los pagos realizados, que se devuelven una vez finalizada la obra, o transcurrido un tiempo.
- Mecanismos de revisión de precios en función de la inflación general o la repercusión de subidas concretas en los precios de materiales y otros recursos.
- Plazo admisible entre la fecha de la certificación y la fecha del pago.

Hay que tener en cuenta todos los demás costes necesarios para la puesta en marcha de la obra y que no se abonan al contratista, como los de profesionales de proyectos, tasas, licencias, equipamiento, costes financieros e impuestos. Además, es habitual prever contingencias, es decir, reservas de dinero para afrontar gastos imprevistos.

Existen también formas de abono de la obra alternativas a la certificación mensual tradicional:

- La certificación por hitos completos, como la cimentación, cada planta de la estructura, la cubierta o la terminación de las distintas instalaciones.
- El pago en función de los porcentajes de avance de una curva S establecida por anticipado, siempre que se pueda controlar adecuadamente el progreso de la obra.
- El llamado 'método alemán', o pago completo de la obra en el momento de la entrega.

Cada forma de contratación requiere un sistema distinto de medición de la obra ejecutada, produce un esquema diferente de pagos y da lugar a un reparto de riesgos diferente entre el constructor y el cliente.

Una vez conocidas las necesidades periodificadas de fondos, se puede calcular la cuantía de los fondos propios, préstamos o créditos que sean necesarios, y sus costes financieros.

### **El punto de vista de la empresa constructora**

La empresa constructora tiene que compensar los gastos derivados de la ejecución con los ingresos que irá recibiendo del cliente.

- Los ingresos equivalen a los costes del cliente, con un cambio de signo, y por tanto se pueden estimar aplicando al presupuesto las mismas consideraciones anteriores.
- Los costes son los que se deducen de la planificación por actividades, aplicando también a sus subcontratistas y proveedores las retenciones y los plazos de pago que hayan acordado.

## Seguimiento

La planificación de un proyecto no termina en la preparación de la programación inicial. Hay que vigilar el progreso de las actividades y determinar si se está cumpliendo el cronograma o bien existe una variación entre lo previsto y lo que ocurre en la realidad.

Es inútil planificar un trabajo con los criterios correctos y una buena técnica si después no hay seguimiento. El constructor debe comparar constantemente lo previsto y lo realizado para ver si está bajo control la estimación inicial de plazos o bien hacen falta medidas correctivas.

Si recordamos el ciclo PDCA, el seguimiento corresponde al tercer cuadrante: C de 'Controlar'. En esta etapa, al transcurrir cierto período de tiempo, se evalúa el progreso de las actividades y se compara lo planeado con el rendimiento efectivamente alcanzado. Tras el cuadrante C viene A, de 'Actuar', cuando los responsables del proyecto toman las medidas preventivas y correctivas para encarar de nuevo la planificación o bien para mantenerla si no ha habido distorsiones importantes.

### Motivos para el seguimiento

Si la planificación fuese una ciencia exacta, el cronograma inicial sería suficiente para gestionar el proyecto, con lo que se eliminaría la necesidad del seguimiento y el control. Sin embargo, al ser de naturaleza dinámica y con cierta dosis de imprevisibilidad, la planificación requiere que el planificador supervise el trabajo.

El control físico de una obra consiste en identificar los avances de las actividades y realizar las actualizaciones adecuadas. Una planificación continua y cuidadosa depende de la vigilancia de la situación real de las actividades por numerosas razones.

- Las actividades no siempre se inician en el momento programado.
- Las actividades no siempre se terminan en la fecha prevista.
- El diseño cambia y el cambio afecta a la ejecución de las tareas.
- La productividad fluctúa, modificando la duración de las actividades.
- El equipo puede cambiar el plan de ataque de la obra o la secuencia de ejecución de algunas unidades de obra.

- El equipo puede cambiar el sistema constructivo de una parte de la obra.
- Surgen factores que, aunque sean previsibles, no se pueden mostrar con precisión en el cronograma, como lluvias, inundaciones, etcétera.
- Aparecen factores imprevisibles que afectan a los trabajos, como huelgas, paralizaciones, interferencias de terceros, accidentes, etcétera.
- Se producen retrasos en el suministro de materiales.
- Faltan actividades en la planificación (alcance incompleto), o hay actividades inexistentes (alcance incorrecto).

### **Línea de base**

La planificación inicial, completada y aprobada por el equipo gestor del proyecto, se denomina plan de referencia o 'línea de base' (*baseline*); es, por así decirlo, el ideal perseguido por el equipo del proyecto, ya que contiene todas las actividades, refleja la lógica constructiva, muestra los recursos asignados e identifica la ruta crítica.

La línea de base tiene una importancia múltiple:

- Representa el consenso del equipo que llevará a cabo la obra; es un plan de trabajo que se supone válido, viable, racional y compartido.
- El progreso real del proyecto se comparará con esta línea de base, que actuará como referencia para la detección de desviaciones, retrasos y adelantos.
- Servirá para evaluar la asignación de responsabilidades en caso de resolución de disputas, reclamaciones contractuales, auditorías, arbitraje, mediación, etcétera.

La línea de base actúa como un faro para el planificador durante el seguimiento de la obra. Cuanto más cerca de la línea de base se desarrollen los trabajos, mejor, porque se habrán producido menos cambios.

La línea de base puede ser la misma hasta el final del proyecto o modificarse a mitad de camino; todo depende de las diferencias entre lo realizado y lo previsto. Si las desviaciones a lo largo de la obra no son muy graves, se puede mantener la línea de base original. Sin embargo, si durante el desarrollo del proyecto se demuestra que la planificación inicial era muy incorrecta en las estimaciones de duraciones, en el alcance o en la lógica, puede ser necesario reprogramar por completo el resto de la obra, olvidando la línea de base inicial y creando una nueva.

### **SUGERENCIAS**

Incluso si el planificador decide establecer una nueva línea de base a mitad de la obra, es interesante mantener la línea de base

# Programación

La técnica PERT/CPM permite generar cronogramas con numerosas actividades interconectadas y con el grado de detalle deseado, que sólo depende del nivel al que el planificador quiera descender cuando enumera esas actividades. Este cronograma general sirve para dirigir las tareas diarias de la ejecución y controlar el avance de las distintas unidades de obra.

## Niveles de la programación

Puesto que la planificación de la obra es compleja y abarca todo su ciclo de vida –que puede ser de meses o años–, el cronograma general no es una herramienta de comunicación adecuada para el equipo de ejecución. No es práctico que la gente manipule en el día a día calendarios gigantescos, en los que se muestran actividades que se llevarán a cabo dentro de uno o dos años. Por tanto, es necesaria una programación que contenga exclusivamente las actividades que se van a realizar en un período de tiempo específico, como una o dos semanas.

La programación consiste en aplicar un filtro en el cronograma general para mostrar únicamente las actividades de determinada ‘ventana’ de tiempo. Es como hacer *zoom* sobre un intervalo de tiempo para comunicar de manera más objetiva lo que debe hacerse cada semana o cada quince días.

La programación es un instrumento de comunicación entre el equipo de planificación y el equipo de producción de la obra, que actúa como una agenda del proyecto y debe cumplirse estrictamente. Se recomienda que las reuniones semanales o quincenales vengán pautadas en la programación, ya que así se define exactamente quién está haciendo qué, y cuáles son las fechas de inicio y final previstas para cada actividad del período.

La programación convierte la red de actividades en una hoja de ruta dirigida a los equipos de obra, de forma que los trabajadores y los responsables puedan desarrollar sus tareas en una secuencia coherente con la planificación general de la obra, con un sentido del tiempo y con una visión sistémica y global del proyecto.

En resumen, la programación es la traducción de la planificación global (macro) a un horizonte de duración limitada (micro), de cara a la asignación efectiva de la mano de obra y el equipamiento, la adquisición de materiales, la designación de responsables, las deci-

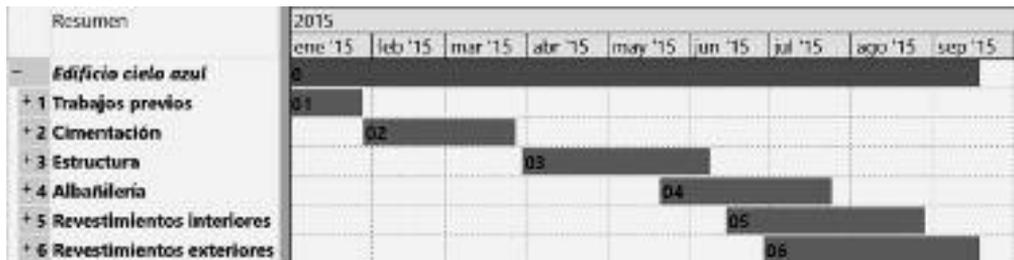
siones administrativas, la detección de desviaciones y la organización de las reuniones de coordinación.

### Programación a largo plazo

La programación se puede realizar a varios niveles de detalle y de alcance, cada uno adecuado para un tipo de decisiones y para su valoración por distintos escalones en el ámbito empresarial. Como es fácil de ver, el punto de vista de la dirección de la empresa, del director de operaciones y del jefe de obra son distintos para un mismo proyecto.

La programación a largo plazo es el primer nivel de detalle de la planificación; tiene un carácter más general y es adecuada para los niveles altos de la dirección; contiene pocos elementos, generalmente organizados por meses. La programación a largo plazo, o 'plan maestro', sirve sobre todo para visualizar de forma sintética las etapas de la obra, destacando los hitos más importantes y proporcionando una identificación preliminar de los recursos.

Para un edificio, por ejemplo, la programación a largo plazo generaría un cronograma que mostraría únicamente capítulos, paquetes o contratos.



Al tener un nivel genérico y poco detalle, la programación a largo plazo no sirve para la organización diaria del trabajo. Su fuerza radica en ver globalmente la obra, en la identificación rápida de la fecha de inicio de cada etapa, de los hitos y del ritmo al que deben ejecutarse los principales procesos de producción.

En esta programación se determina también el momento adecuado para solicitar los materiales que requieren un largo periodo de adquisición, como ascensores y carpinterías.

La programación a largo plazo corresponde al nivel estratégico de la organización.

*Programación a largo plazo.*

### Programación a medio plazo

La programación a medio plazo es el segundo nivel de detalle de la planificación. Su función es elaborar el plan para comprar materiales y equipos, identificar la necesidad de nuevos recursos, preparar

# Diagramas de espacio-tiempo

## Introducción

En la construcción hay proyectos con algunos trabajos repetitivos. Las carreteras, las viviendas en hilera y los edificios en altura son ejemplos de proyectos con características de repetitividad, en los que un núcleo de actividades se ejecuta varias veces sucesivas.

Los diagramas de espacio-tiempo (*time-location diagrams*), también conocidos como 'líneas de equilibrio' (*line of balance*), son una técnica de planificación desarrollada especialmente para este tipo de trabajo. Al tener ciclos de producción, los trabajos repetitivos pueden representarse mediante una línea recta en una gráfica de tiempo y avance. La pendiente de la línea muestra la velocidad a la que la actividad progresa.

Los métodos de red, como el PERT/CPM, han probado su eficacia en la planificación y el control de proyectos, pero no son tan adecuados para proyectos repetitivos, ya que las actividades repetidas en ciclos cortos generalmente tienen diferentes productividades.<sup>1</sup>

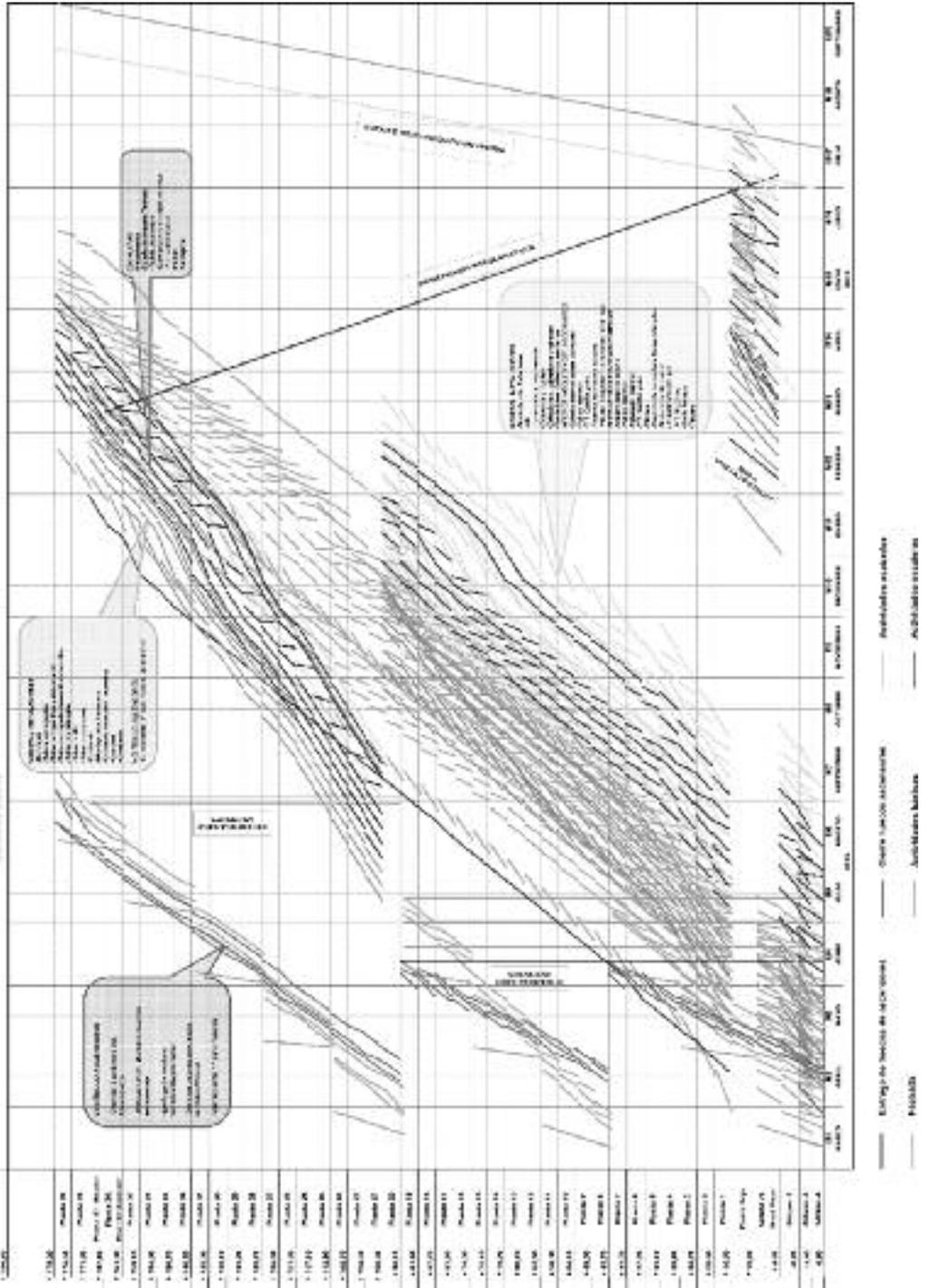
Para ilustrar la esencia del método basta con observar que el cronograma mostrado más abajo se puede rediseñar con una estructura diferente, agrupando las actividades que se repiten.

Cronograma tradicional.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Estructura</b>										
Planta 1	E									
Planta 2		E								
Planta 3			E							
<b>Albañilería</b>										
Planta 1		A								
Planta 2			A							
Planta 3				A						
<b>Revestimientos</b>										
Planta 1			R							
Planta 2				R						
Planta 3					R					

1. Véase David Arditi, Onur B. Tokdemir y Kangsuk Suh, "Challenges in line-of-balance scheduling", *Journal of Construction Engineering and Management*, noviembre-diciembre 2002, páginas 545-556.

Al presentarlas conjuntamente, las actividades revelan el aspecto general de cada trabajo, que puede ser representado también por una línea recta cuya pendiente equivale al ritmo.



Manuel Javier Martínez,  
diagrama de espacio-tiempo  
de un edificio en altura.

# Método del valor ganado EVM

## Introducción

Entre los sistemas para evaluar el desempeño de los proyectos, el método del valor ganado (*Earned Value Method*, EVM) destaca porque ofrece información precisa a partir de la integración de los datos reales de tiempo y coste, y permite que el planificador conozca el estado del proyecto en cada momento y analice las desviaciones y las tendencias.

Los indicadores de desempeño permiten prever el resultado probable del proyecto en cuanto a coste y tiempo. El EVM compara el valor del trabajo planificado con el realizado para comprobar si el comportamiento está de acuerdo con lo previsto en el cronograma.

La comparación implica tres variables:

- Valor planificado.
- Valor ganado.
- Coste real.

El valor ganado indica si el proyecto está consumiendo más dinero del previsto para realizar una tarea determinada debido a un incremento del coste, o si se gasta más dinero porque el proyecto en realidad va adelantado.

La relación entre el valor ganado y el trabajo planificado en un período determinado permite obtener un control más preciso que el basado sólo en la comparación con el gasto.

Relación entre EDT, cronograma y curva S.



El punto de partida para la aplicación del EVM es el cronograma técnico y financiero, que a su vez se basa en una Estructura de Desglose de Trabajo EDT, a partir de la cual se genera una curva S de coste. El avance del proyecto se comparará con esta curva.

## ORIGEN DEL EVM

El método de valor ganado proviene del *Cost/Schedule Control System Criteria* (C/SCSC), un conjunto de 35 requisitos establecidos por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos en 1967 para su-

pervisar los contratos ‘por administración’ o con algún incentivo para reducir los costes. El primer proyecto que tuvo una experiencia positiva con el EVM fue el misil Minuteman.

Aunque se utilizaba en los contratos con la administración pública, el EVM tardó en adoptarse para proyectos fuera del ámbito de la construcción, así como entre las organizaciones privadas. En 1995, la National Defense Industrial Association (NDIA) decidió reescribir los criterios del valor ganado y adaptarlos a las necesidades de la industria privada, con lo que se creó un nuevo estándar de 32 criterios que fue reconocido por el prestigioso American National Standard Institute en la norma ANSI/EIA 748.

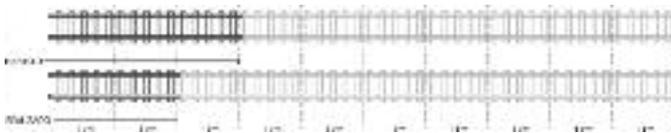
Paralelamente a estas acciones, el Congreso de los Estados Unidos ha emitido diversas leyes que requieren alguna variante del valor ganado para el análisis de los proyectos gubernamentales.

## VARIABLES PRINCIPALES

### Valor planificado PV

El ejemplo de la construcción de una vía férrea ilustra bien el método. Para simplificar, suponemos que la planificación es lineal, se prevé la construcción de 1 km de vía por mes, con un coste estimado de 100.000 € por km y una longitud total de 10 km.

Después de 3 meses de trabajo, se mide el avance del proyecto: se han construido 2 km, con un coste de 240.000 €. La figura muestra esquemáticamente lo previsto y lo realizado.



Avance previsto y realizado en 3 meses.

El valor planificado (*Planned Value*, PV) es el importe que debería haberse gastado en el período considerado; coincide con el coste presupuestado del trabajo programado o planificado hasta ese momento. El PV no coincide necesariamente con lo que se ha ejecutado físicamente; corresponde a la línea de base, que representa el objetivo del equipo de producción. El PV es lo que debería haberse gastado hasta el momento.

En este ejemplo, el planificador podría limitarse a comparar el coste previsto (300.000 €) con el real (240.000 €), y concluir que el proyecto va bien desde el punto de vista económico, porque se ha gastado menos de lo previsto para el período. Esta conclusión es falsa, porque no basta solamente con considerar el coste; es necesario tener en cuenta lo que realmente se ha construido con ese dinero. Sólo así se puede evaluar correctamente el rendimiento del proyecto. Para resolver este problema entra en juego el concepto de valor ganado EV.

## Cadena crítica CCPM

El enfoque tradicional de la planificación, representado por el PERT/CPM, parte de la hipótesis inicial de que los proyectos están condicionados por el tiempo. Los pasos clave en la planificación son la asignación de las duraciones a las actividades y la definición de las precedencias. Este método supone implícitamente que los recursos de mano de obra, equipos y materiales están siempre disponibles y en cantidad suficiente para satisfacer la secuencia constructiva establecida. En realidad, muchas veces ni siquiera se introducen los recursos de las actividades al definir la red, sino que la labor se limita a controlar el aspecto temporal de la programación.

Sin embargo, en el mundo real a menudo hay otros ‘cuellos de botella’ que determinan el cronograma. En este contexto de restricción de recursos surge el método de la cadena crítica (*Critical Chain Method CCM*, o *Critical Chain Scheduling CCS*, o *Critical Chain Project Management CCPM*), que recomienda realizar la planificación teniendo en cuenta no sólo la secuencia de las actividades (precedencias), sino también la disponibilidad de los recursos (restricciones físicas).

Pero no sólo es eso. La forma tradicional de preparar los cronogramas trabaja con duraciones que invariablemente están algo ‘hinchadas’, un fenómeno que provoca la dilatación del plazo del proyecto. El CCPM recomienda una fuerte reducción de estas estimaciones mediante la eliminación de estas protecciones del tiempo. La solución es programar el proyecto con duraciones muy ajustadas e insertar ‘colchones’ para controlar el plazo del proyecto. El método de la cadena crítica consiste en la aplicación de la teoría de las restricciones al ámbito de la gestión de proyectos, tal como se explica a continuación.

### Origen de la cadena crítica

Con la publicación de la novela *La meta* en 1984, el físico israelí Eliyahu M. Goldratt consiguió despertar el interés gracias sus innovadoras ideas de negocio.<sup>1</sup> Usando el telón de fondo de una fábrica poco eficiente y de su atormentado director, siempre lidiando con los cuellos de botella de la producción, Goldratt introdujo los principios de la teoría de las restricciones, según la cual en todo momento hay un número reducido de factores que representan obstáculos para el pleno desarrollo de la producción.

1. Eliyahu M. Goldratt y Jeff Cox, *The goal: a process of ongoing improvement* (Great Barrington, Massachusetts: North River Press, 1984); versión española: *La meta: un proceso de mejora continua* (Monterrey, México: Castillo 1992).

En 1997, con el libro *Cadena crítica*, Goldratt amplió el concepto de la teoría de las restricciones para analizar la velocidad y la fiabilidad con la que se llevan a cabo los proyectos.<sup>2</sup> El enfoque se basa en la reducción drástica de la duración de las actividades y la inserción de colchones de protección del plazo.

Elevado a la categoría de gurú del mundo empresarial, Goldratt difundió en el sector de las grandes corporaciones el concepto de la cadena crítica. Los estudiosos del tema señalan sus ideas como la mayor contribución a la planificación de proyectos en los últimos treinta años.

El método de la cadena crítica se ha aplicado progresivamente en la construcción, lo que ha conseguido reducir los plazos de entrega del orden del 10% al 50%.

### Teoría de las restricciones

Se define como 'restricción' cualquier factor que impide que un sistema alcance su nivel máximo de rendimiento. La teoría de las restricciones (*Theory of Constraints*, TOC) supone que cada sistema tiene al menos una restricción que afecta a su flujo de producción. Si no fuese así, el flujo crecería indefinidamente o, por el contrario, sería nulo, ya que el flujo máximo de producción no puede superar el flujo que atraviesa el recurso de menor capacidad (cuello de botella). La analogía de un proyecto con un flujo de corriente revela que su restricción es el eslabón más débil, el que determina la capacidad del sistema. Desde el punto de vista del plazo, la restricción de un proyecto es la secuencia más larga de actividades, la que determina el plazo total.

Las restricciones pueden ser físicas o no físicas (políticas y emocionales). El principal problema es, inevitablemente, un conflicto sin resolver (*core conflict*), que el equipo de gestión tiene que solventar o al menos minimizar.

El algoritmo de TOC para maximizar el rendimiento de una cadena de actividades tiene cinco pasos, que pueden entenderse como una estrategia de mejora continua.<sup>3</sup>

#### 1. IDENTIFICAR LA RESTRICCIÓN DEL SISTEMA

Puesto que el objetivo es completar el proyecto lo antes posible, la cadena crítica es el camino más corto, teniendo en cuenta no sólo las dependencias lógicas y las duraciones, sino también la disponibilidad de recursos.

#### 2. EXPLORAR LA RESTRICCIÓN

Se refiere a proteger la duración total del proyecto contra los retrasos en las tareas que componen la cadena crítica. Comprimir la duración de estas actividades, eliminando estorbos y protecciones de tiempo, ayuda a que el proyecto alcance plazos más breves.

2. Eliyahu Goldratt, *Critical chain* (Great Barrington, Massachusetts: North River Press, 1997); versión española: *Cadena crítica* (Monterrey, México: Castillo, 2000).

3. Véase Jyh-Bin Yang, "How the critical chain scheduling method is working for construction". *Cost Engineering* (AACE), volumen 49, número 4, abril 2007.

# El futuro de la planificación y el BIM

## Del CAD al BIM

Aunque el método PERT/CPM ha evolucionado desde sus inicios a lo largo de las líneas descritas en este libro y aunque se han desarrollado herramientas digitales muy potentes para ayudar a la planificación, hasta ahora estas herramientas no se han integrado con los demás programas utilizados durante el proyecto y la ejecución de las obras.

El CAD (*Computer Aided Design*, 'diseño asistido por ordenador') se ha limitado en la práctica al dibujo de los planos tradicionales con medios digitales. Los programas utilizados para planificar las obras, calcular las estructuras y las instalaciones, estimar los costes, redactar los documentos de seguridad y salud, analizar el comportamiento energético del edificio, y muchos otros que suelen formar parte de las herramientas de este sector se han mantenido como islas de información independientes, entre sí y con respecto a los programas de CAD.

*Aarquitectos*  
([www.aarquitectos.com](http://www.aarquitectos.com)),  
planificación de la  
ejecución de la *Spiralling*  
*Tower*, Barcelona, de  
*Zaha Hadid*.



Por ejemplo, los programas que permiten modelizar un edificio en tres dimensiones con todo detalle –existentes desde hace muchos años– se usan casi exclusivamente para generar imágenes y animaciones más o menos realistas. Pocas veces se aplican para visualizar el proceso de la construcción, como ilustra la imagen de la página anterior, correspondiente al análisis del proceso de ejecución de un proyecto.

Esta situación no ha cambiado desde los años 1980 hasta la llegada del BIM.

## BIM

El BIM (*Building Information Modeling*, ‘modelado de la información de un edificio’) es la técnica de modelar un edificio en tres dimensiones, incluyendo toda la información necesaria para analizar, definir y documentar el proyecto, construirlo e incluso operar el edificio o la instalación durante su vida útil. Como concepto, el BIM se remonta al menos a 1975;<sup>1</sup> como programa funcional en ordenadores personales, a 1984 (en ArchiCAD); y como término, a 1992.<sup>2</sup>

Por consiguiente, no se trata de una técnica nueva. Sin embargo, en estos momentos, por diversas razones, el BIM ha conseguido ya una amplia difusión, lo que ha estimulado un cambio que representa en realidad la verdadera entrada de la construcción en el mundo digital.

La modelización completa de los componentes del edificio ya mejora la planificación en sí misma, porque un diseño más detallado reduce los problemas durante la ejecución: por ejemplo, es más fácil evitar las interferencias estáticas entre elementos (*clash detection*), como las que se dan en las instalaciones entre sí o respecto de la estructura.

Si se añade a las tres dimensiones del espacio una cuarta (el tiempo), se obtiene el denominado BIM 4D, en el que a cada elemento del edificio se le asocia el momento en que se prevé construirlo. Las ventajas de la integración de la planificación en el modelo son evidentes, ya que se puede visualizar no sólo el objeto final resultante, sino la secuencia animada de la construcción, a cualquier velocidad y desde cualquier punto de vista.

Aunque en principio esta planificación sólo consiste en aplicar a los modelos sistemas de visualización que toman los datos de cronogramas tradicionales, esta integración da lugar a una forma de trabajo radicalmente distinta.

En primer lugar, este sistema permite analizar dinámicamente la ‘constructividad’, definida en el capítulo 1 como «la mayor o menor facilidad para encontrar procesos [cuyo] resultado final» sea el objeto definido en el proyecto, ya que permite simular alternativas de sistemas constructivos y procesos, con lo que se detectan a tiempo los problemas que podrían aparecer durante la ejecución. Al simu-

1. Véase el prólogo de Jerry Laiserin en Chuck Eastman, Paul Teicholz, Rafael Sacks y Kathleen Liston, *BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors* (Hoboken: Wiley, 2008).

2. Véase S. Van Nederveen, y F.P. Tolman, “Modelling multiple views on buildings”. *Automation in Construction*, volumen 1, número 3, 1992, páginas 215-224.

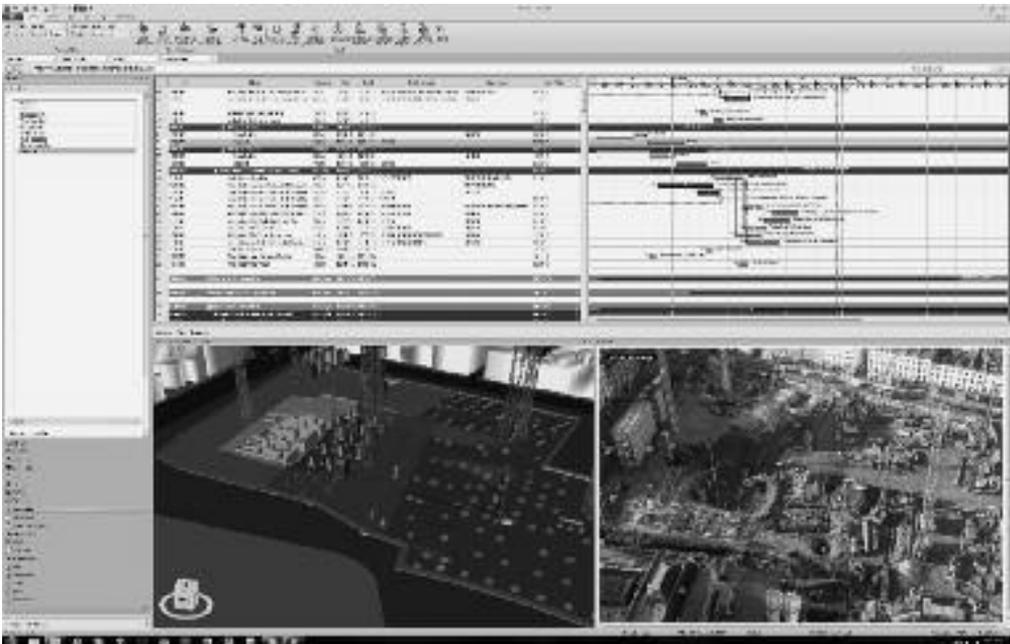
lar los procesos antes de ejecutarlos en la realidad, se pueden aplicar todas las técnicas descritas en el libro, como nivelar los recursos para no superar la capacidad disponible, con la comprobación gráfica inmediata del resultado.

Además, los sistemas de planificación 4D llevan implícito el concepto de espacio-tiempo, por lo que de forma natural ayudan a planificar las actividades que transcurren de forma sucesiva en una misma zona de trabajo. Modificando los ritmos y los equipos necesarios se comprueba inmediatamente si mantienen o no la distancia adecuada entre ellos. La superposición de la línea de tiempo al modelo espacial permite detectar muchos problemas difíciles de identificar con sistemas tradicionales:

- Interferencias dinámicas, como el conflicto entre un encofrado trepador y una grúa.
- Realización de trabajos en el mismo momento y lugar por demasiados equipos o por oficios incompatibles.
- Aparición de situaciones de inseguridad, como trabajos que se realizan por encima de otros trabajos.
- Imposibilidad de introducir la maquinaria necesaria para la construcción o los equipamientos del proyecto en su lugar de destino.

Iniciada la ejecución, es posible comparar visualmente lo planificado con lo realmente construido, analizar las causas de las desviaciones, corregir la planificación y utilizarlo como soporte de las certificaciones o pagos.

*BIM 4D (Synchro).*



Por último, el modelo *as-built*, ajustado a la realidad de lo ejecutado, se puede usar para planificar el mantenimiento, puesto que puede contener la información necesaria de todos y cada uno de los elementos de equipamiento, sus fechas de reparación o sustitución y sus costes.

## Visualizadores 4D

Aunque podría parecer la solución natural, no existe actualmente un programa BIM que pueda gestionar por sí sólo el modelo en tres dimensiones junto con la planificación, la gestión del coste y los demás aspectos y subsistemas que intervienen en la construcción. Los modeladores BIM existentes no cuentan con opciones para planificar y tampoco pueden recibir los resultados de un programa de planificación; por tanto, no pueden utilizar esos valores para visualizar el comportamiento del modelo en el tiempo.

Así pues, es necesario combinar distintas plataformas. El enfoque más habitual consiste en utilizar tres programas:

- Un modelador 3D.
- Un programa tradicional de planificación.
- Un visualizador 4D, que importa tanto el modelo como el resultado de la planificación.

Para que el visualizador pueda generar secuencias temporales los elementos gráficos del modelo deben estar asociados a las actividades usadas en el cronograma. Esta asociación no es sencilla, como ilustra un ejemplo propuesto por Jan Tulke y Jochen Hanff en 2007.<sup>3</sup> Un edificio de 78.400 m<sup>2</sup> contiene:

- 70.000 elementos en el presupuesto, de los cuales 40.000 aparecen en el modelo 3D;
- 800 actividades en la planificación, de las cuales 600 están relacionadas con elementos del modelo;

Hay varios métodos para realizar esta asignación:<sup>4</sup>

- Selección manual.
- Selección precoordinada en el modelo 3D.
- Selección basada en reglas.

La vinculación manual de elementos gráficos a actividades es sólo asequible en proyectos pequeños. Aunque el sistema disponga de utilidades para realizarlo con agilidad, al tratarse de un método de enumeración no es fácil repercutir los cambios del modelo o del cronograma. Además, cada nuevo proyecto requiere empezar el trabajo desde el inicio.

Como alternativa, se puede introducir información suficiente en el propio modelo 3D, asociando a cada elemento la actividad a que corresponde, de modo que sirva de base para crear el cronograma

3. Véase Jan Tulke y Jochen Hanff, *4D Construction sequence planning: new process and data model* (Weimar: Bauhaus-Universität, Departamento de Informática para la construcción, 2007).

4. Véase Andrés A. García-González, tesis doctoral: *Entornos virtuales de construcción volumétrica en acero* (Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica, ETSA Barcelona, UPC, abril de 2012).

y para que el visualizador 4D reciba en su momento tanto las actividades como los elementos gráficos ya asociados. Este enfoque requiere que el planificador modifique directamente el modelo para orientarlo a la planificación, completando y reorganizando la información existente, lo cual no siempre es deseable o posible. Además, el resultado aún tiene que elaborarse posteriormente para conseguir una planificación realista, por lo que no se puede automatizar por completo el proceso.

Por último, la vinculación se puede realizar asignando las actividades a conjuntos de elementos en función de un sistema de condiciones, definidas como expresiones o reglas, que pueden apoyarse en las propiedades constructivas, geométricas y de ubicación de los elementos.

Por ejemplo la actividad 'Hormigonar los soportes de la planta 7' puede contener todos los objetos que cumplan las siguientes condiciones:

Tipo 'Soportes'  
Material 'HA-25'  
Planta '7'

Este procedimiento es más fácil si el modelo 3D está preparado de la misma forma que es necesaria para el sistema anterior; pero los requerimientos son menos estrictos, ya que se pueden conectar planificaciones y modelos 3D realizados de forma completamente independiente. La escritura de reglas permite repercutir inmediatamente los cambios del modelo o del cronograma y las reglas pueden ser reutilizables en más de un proyecto, pero esto requiere un planificador con mayor nivel de capacitación.

### **Del BIM 5D al BIM 4D**

Todos estos procesos, aunque realizados con herramientas informáticas, requieren un trabajo manual importante. Es en realidad un proceso invertido: se genera la planificación con independencia del modelo y luego se sincronizan los resultados, en un tercer modelo.

Como hemos avanzado en el capítulo 1, el modelo 3D está orientado a los objetos bien definidos que componen el resultado final del proyecto, mientras que la planificación se basa en procesos formados por las actividades, no completamente determinadas en el momento del proyecto, que se pueden utilizar para construir cada uno de esos objetos.

El aprovechamiento de las nuevas capacidades digitales para facilitar el desarrollo de la planificación requiere definir mejor esta relación entre objetos y procesos.

Para ello se puede utilizar como paso intermedio el modelo de costes. El coste es una nueva dimensión, por lo que el modelo BIM valorado se suele denominar como BIM 5D. El modelo de costes tie-

ne una relación directa con el modelo 3D, ya que en general los objetos que tienen representación gráfica son los mismos componentes del edificio que aparecen en el presupuesto y, por tanto, la Estructura de Desglose de Trabajo (EDT) de costes se puede obtener directamente del modelo BIM.

A su vez, la EDT de costes puede usarse como base para obtener una planificación si se consigue transformar el modelo de costes en el modelo de los procesos necesarios para obtener los objetos a que hacen referencia.<sup>5</sup>

En algunos casos esta relación es sencilla. Un objeto del modelo que representa un componente de un nivel de detalle intermedio –ni muy sencillo, ni muy complejo– puede corresponder a una actividad: por ejemplo, el objeto ‘caldera’ corresponde a la actividad ‘instalar la caldera’.

Pero esta situación no es habitual. Algunas actividades requieren agrupar objetos similares que no tienen relevancia para dar lugar a una actividad independiente para cada uno. Otros objetos complejos se desglosan en varias actividades secuenciales o en varias fases separadas en el tiempo, o se refunden con otros por plantas o viviendas.

Sería interesante definir qué comportamientos de este tipo son habituales en la construcción y asignarlos a las unidades de obra adecuadas. Esta asignación podría realizarse incluso en las mismas bases de datos que se usan para asignar precios y recursos a las unidades de obra, de forma que el trabajo pudiera aplicarse de manera muy automatizada a los nuevos proyectos, como se hace en la actualidad con los costes. Más tarde se avanzaría también en la definición de las precedencias, ya que la construcción se ejecuta generalmente de abajo a arriba y en el orden aproximado de cualquier codificación normalizada.

### **La construcción, una industria más**

Así pues, el reto pendiente es pasar del uso de los modelos 4D como herramientas avanzadas de visualización sobre una planificación convencional, a obtener una planificación –o al menos, una buena base para la planificación– gracias a la potencia de los nuevos medios digitales.

Este objetivo no implica en modo alguno que los profesionales vayan a ser sustituidos por máquinas, al igual que el BIM 5D no hace innecesario al responsable del coste, sino que sólo elimina la tediosa tarea de la cuantificación.

Por el contrario, al reducir la intervención humana en los trabajos rutinarios el esfuerzo se puede concentrar precisamente en las tareas que aportan valor y mejoran el proyecto y el proceso de ejecución, de manera que la construcción se parezca cada vez más al resto de la industria.

5. Véase Enrique Sánchez Acosta y Fernando Valderrama, “La integral triple: BIM, tiempo, coste” (II Congreso Nacional BIM - EUBIM 2014, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, Universitat Politècnica de València, Valencia, 23 y 24 de mayo 2014).

# Bibliografía

Se incluyen aquí tanto las referencias bibliográficas procedentes de la edición brasileña de la que deriva este libro, como las que se han incorporado específicamente para esta edición española.

## Libros y revistas

- AACE INTERNATIONAL. "Forensic schedule analysis". *Recommended practice*, número 29R-G3, 2007.
- *Total cost management framework: a process for applying the skills and knowledge of cost engineering*. 2007.
- AENOR. UNE-EN 15643-4, 'Sostenibilidad en la construcción: evaluación de la sostenibilidad de los edificios', parte 4: 'Marco para la evaluación del comportamiento económico', 2012.
- ALABAU, F.J. *Eficiencia en la gestión de programas I+D+i*. Madrid: AEIPRO 2010.
- AMOS, Scott J. *Skills & knowledge of cost engineering*. AACE, 2007 (5ª edición).
- ARDITI, David; TOKDEMIR, Onur B.; SUH, Kangsuk. "Challenges in line-of-balance scheduling". *Journal of Construction Engineering and Management*, noviembre-diciembre 2002, páginas 545-556.
- BALBONTÍN BRAVO, Edmundo; JORDÁN REYES, Miguel. *Organización y equipos*. Madrid: Fundación Escuela de la Edificación, 1986.
- BALLARD, Glenn. *Lookahead planning: the missing link in production control*. Arlington (Virginia): Lean Construction Institute, 1997.
- BALOYI, L.; BEKKER, M. "Causes of construction cost and time overruns: the 2010 FIFA World Cup stadia in South Africa", *Acta Structilia: Journal for the Physical and Development Sciences*, 2011, 18 (1),
- BAPTISTA, Humberto R. "Implementação e execução de CCPM". *MundoPM* (Curitiba), n° 29, octubre-noviembre 2009.
- BARBER LLORET, Pedro. *La empresa constructora, programación y control de obra*. Alicante: Editorial Club Universitario, 2001.
- BARCAUI, André B.; QUELHAS, Osvaldo. "Corrente crítica: uma alternativa á gerência de projetos tradicional". *Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção*, número 2, julio 2004.
- "Uma introdução à corrente crítica". *MundoPM* (Curitiba), número 2, abril-mayo 2005.
- BERNARDES, Maurício Moreira e Silva. *Planejamento e controle da produção para empresas de construção civil*. Río de Janeiro: LTC, 2003.
- BOITEUX, Colbert Demaria. *Administração de projetos: PERT/CPM/ROY*. Río de Janeiro: Interciência, 1979.
- BURKE, Rory. *Project management: planning and control*. Chichester: John Wiley & Sons, 1994 (2ª edición).
- CASAROTTO FILHO, Nelson; FÁVERO, José Severino; CASTRO, João Ernesto Escosteguy. *Gerência de projetos/Educação simultânea*. São Paulo: Atlas, 1999.
- CASTRO FRESNO, Daniel; AJA SETIÉN, José Luis. *Organización y control de obras*. Textos universitarios n° 3, Ingenierías; Santander: Universidad de Cantabria, 2005.

Colección **Manuales Universitarios de Edificación**

*Director*

**Jorge Sainz**

Profesor Titular del Departamento de Composición Arquitectónica  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

*Coordinador*

**Fernando Valderrama**

Profesor del Departamento de Gestión de la Edificación  
Escuela de Arquitectura · UEM

*Asesores*

**Enrique Álvarez-Sala**

Rubio&Álvarez-Sala, estudio de arquitectura  
Profesor de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (1983-2006)

**César Bedoya**

Catedrático del Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónica  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

**Jaime Cervera**

Catedrático del Departamento de Estructuras de Edificación  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

**Federico García Erviti**

Profesor Titular del Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónica  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

**Mercedes Medina de Toro**

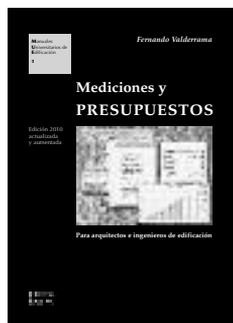
Librería Maireia  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

**Salvador Pérez Arroyo**

Catedrático del Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónica  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

*A esta lista hay que añadir los autores de los libros de la colección,  
que se convierten automáticamente en asesores.*

1



*Fernando Valderrama*  
**Mediciones y presupuestos**  
Para arquitectos e ingenieros de edificación

Edición 2010, actualizada y aumentada  
ISBN: 978-84-291-3201-4  
381 páginas · 308 ilustraciones

Edición electrónica  
ISBN: 978-84-291-9283-4

2



*Gavin Tunstall*  
**La gestión del proceso de edificación**  
Del croquis a la ejecución

ISBN: 978-84-291-3102-4  
482 páginas · 75 ilustraciones

3



*Ramón Araujo*  
**Construir en altura**  
Sistemas, tipos y estructuras

ISBN: 978-84-291-3103-1  
338 páginas · 653 ilustraciones (28 en color)

Edición electrónica  
ISBN: 978-84-291-9335-0

4



*Aldo D. Mattos · Fernando Valderrama*  
**Métodos de planificación y control de obras**  
Del diagrama de barras al BIM

ISBN: 978-84-291-3104-8  
311 páginas · 305 ilustraciones

# Métodos de planificación y control de obras

Foto: Marcelo Scandaroli



Este libro propone un recorrido por los métodos de planificación de los que disponen los profesionales de la construcción: desde los tradicionales PERT y CPM hasta las últimas teorías de la Lean Construction, pasando por el Método del Valor Ganado, las curvas S, los diagramas de espacio-tiempo, el análisis de Monte Carlo y la planificación 4D.

La teoría de grafos se utiliza exclusivamente como recurso didáctico y no se profundiza en los procedimientos manuales de cálculo, ya que se asume que el lector dispone de alguno de los programas informáticos existentes, con cualquiera de los cuales se pueden resolver los ejercicios planteados en el libro.

Al mismo tiempo, se insiste en dar su verdadero protagonismo a la actitud positiva hacia la planificación y a un punto de vista práctico e integrado sobre el proyecto que tenga en cuenta los comportamientos y los intereses de los distintos agentes de la edificación, en lugar de la aplicación exhaustiva de algoritmos y del aprendizaje de las funciones más recónditas de los programas al uso.

Una pequeña historia de los sobrecostos y los retrasos, un análisis de sus causas y algunas propuestas para evitarlos, un capítulo específico sobre la planificación económica y financiera y otro final sobre el Building Information Modeling (BIM), con posibilidades técnicas impensables en los orígenes de la planificación, completan el contenido del libro.

Todo ello ayudará a mejorar las competencias de los estudiantes de grado y posgrado y de los profesionales de la construcción, para trabajar con eficacia en este nuevo contexto.

**ALDO D. MATTOS** (Aracaju, Brasil, 1965) es ingeniero civil, abogado y geofísico; su experiencia en estimación de costes de construcción, planificación y gestión de proyectos incluye plantas de energía, transporte y vivienda pública en países como Brasil, Perú, Estados Unidos, Suráfrica, Mozambique, Egipto, Trinidad y Tobago, Costa Rica y España.

**FERNANDO VALDERRAMA** (Madrid, España, 1956) es arquitecto por la ETSAM, MBA por el IESE y arquitecto técnico por la Universidad Europea, donde da clases de grado y posgrado; es autor, entre otros libros, de Mediciones y presupuestos (2007 y 2010); y es Director General de Soft, los autores de Presto.

*Ilustración de cubierta: diagramas de barras (Presto) y planificación 4D BIM (NavisWorks, de Autodesk).*



Editorial  
Reverté

[www.reverte.com](http://www.reverte.com)

