

**UNIVERSIDAD DE ALCALÁ**

FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES

*Departamento de Fundamentos de Economía e Historia Económica*



**PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS DE PLANTAS INDUSTRIALES:  
EL EFECTO RELAJACIÓN Y MODELOS EXPLICATIVOS DE LOS  
RETRASOS**

**TESIS DOCTORAL**

*Francisco Vicente Valero*

*Año 2001*

Dr. D. Sergio Barba-Romero Casillas, catedrático del área de Fundamentos del Análisis Económico del Departamento de Fundamentos de Economía e Historia Económica de la Universidad de Alcalá,

**CERTIFICA:**

**Que:**

La tesis doctoral con el título Planificación de Proyectos de Plantas Industriales: El Efecto Relajación y Modelos Explicativos de los Retrasos elaborada por D. Francisco Vicente Valero, ha sido dirigida por mi y doy mi conformidad a su presentación para su depósito y para proceder a su lectura y defensa de acuerdo con la normativa vigente.

Y para que conste a los efectos oportunos firmo el presente certificado en Alcalá de Henares a veinte de marzo de 2001.

D. Sergio Barba-Romero Casillas

D. Carlos Mario Gómez Gómez, Ilmo. Sr. Director del Departamento de Fundamentos de Economía e Historia Económica de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de la Universidad de Alcalá,

**CERTIFICA:**

**Que:**

La tesis doctoral con el título Planificación de Proyectos de Plantas Industriales: El Efecto Relajación y Modelos Explicativos de los Retrasos elaborada por D. Francisco Vicente Valero, reúne los requisitos exigidos para su defensa y aprobación.

Y para que conste a los efectos oportunos firmo el presente certificado en Alcalá de Henares a veinte de marzo de 2001.

D. Carlos Mario Gómez Gómez  
DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO

# **UNIVERSIDAD DE ALCALÁ**

**FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES**

*Departamento de Fundamentos de Economía e Historia Económica*

## **PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS DE PLANTAS INDUSTRIALES: EL EFECTO RELAJACIÓN Y MODELOS EXPLICATIVOS DE LOS RETRASOS**

### **TESIS DOCTORAL**

*Autor: Francisco Vicente Valero*

*Director: Dr. D. Sergio Barba-Romero Casillas*

*Alcalá de Henares, Año 2001*

## *Agradecimientos*

No hubiera sido posible la culminación de esta tesis, sin contar con el tiempo que los destinatarios de la dedicatoria me han cedido a lo largo de los últimos siete años. A ellos mi primera mención.

Debo agradecer a Sergio Barba-Romero Casillas, mi director de tesis, la confianza depositada desde el primer momento y las orientaciones y comentarios a lo largo de su desarrollo.

También a Joaquín Pérez Navarro, por los innumerables ratos de escucha, sus valiosas sugerencias y oportunas correcciones. Por similares razones tampoco puedo dejar de mencionar a Ethel Mokotoff Miguel.

En general a todos los miembros del Departamento de Fundamentos, que de una u otra forma han contribuido a facilitarme la tarea.

Es imposible olvidar la contribución de mi amigo Francisco Moreno Verdulla, por sus ánimos, sugerencias y crítica constructiva.

Francisco Vicente Valero

*A Maricarmen, Beatriz y Francisco*

## Prólogo

*La anticipación de los fenómenos sociales –en contraposición con los fenómenos físicos– no es posible con precisión, debido a que no se conocen bien las leyes que los rigen. No obstante, seguimos obcecados en la predicción de esos fenómenos sociales, justificando las desviaciones con el recurso a la incertidumbre que los rodea. ¿Es esa incertidumbre un índice de nuestro desconocimiento de esas leyes o es puro azar?*

*Si es puro azar, está bien que nos esforcemos en encontrar las distribuciones de probabilidad más adecuadas a cada fenómeno social que estudiemos, así podremos cuantificar con precisión las magnitudes de nuestros desaciertos.*

*Pero, ¿y si lo que realmente ocurre es lo primero? Entonces deberíamos dedicar nuestro esfuerzo a profundizar en el conocimiento de esos fenómenos sociales para, robándole terreno a la incertidumbre, mejorar en la comprensión de las leyes que los rigen.*

*Francisco Vicente Valero*

## **EXTRACTO**

La tesis analiza el casi universal fenómeno del retraso de los proyectos respecto a su duración prevista, centrándose en el marco concreto de los proyectos de plantas industriales. La única forma eficaz de atajar dichos retrasos es la de actuar sobre las causas que los generan. Tradicionalmente se ha pensado que la principal causa del retraso reside en una defectuosa estimación del tiempo de ejecución del proyecto. El objetivo del presente trabajo es poner de manifiesto otras posibles causas y su cuantificación, localizadas en el entorno en que se ejecuta el proyecto, englobándolas bajo el concepto de “Efecto Relajación”. Para ello se elabora una familia de modelos que sirve para cuantificar la incidencia del Efecto Relajación en cada actividad del proyecto. Otra familia de modelos relaciona determinados parámetros asociados al proyecto con su retraso. Estos últimos modelos permiten, partiendo del análisis de proyectos reales anteriormente ejecutados, identificar el parámetro “Constante de la Organización”. En este valor se fundamentan las acciones a tomar para la neutralización del Efecto Relajación y, en consecuencia, de los retrasos.

## **ABSTRACT**

This dissertation work analyses the almost universally observed delay in finishing the projects with respect to the estimated completion date. The analysis focuses on the specific framework of industrial plant projects. The only efficient way of dealing with such delay is acting on the real causes of it. The main cause of delays has been traditionally thought to be a faulty estimate of the project completion date. The aim of the present work is to show, analyse and quantify other causes, which are located in the working environment, through the concept of “loosening effect”. To this end, we develop a family of models quantifying the incidence of the loosening effect in each project activity. Another family of models connect some parameters of the project with the final completion delay. The later models allow us to identify the “Organization Constant” from the analysis of past real projects. In this constant value are to be based the actions needed to neutralize the loosening effect and the consequent delays.



## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
1 OBSERVACIONES EN LAS QUE SE FUNDAMENTA LA TESIS	9
2 CAUSAS DE LOS RETRASOS	12
3 OBJETIVOS DEL PRESENTE TRABAJO	12
4 EXPLICACIÓN DEL TÍTULO DE LA TESIS Y DELIMITACIÓN DE LA MISMA	13
5 PRINCIPALES APORTACIONES DE ESTE TRABAJO	15
6 FUENTES DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN	17
7 UN BREVE RECORRIDO POR LOS CAPÍTULOS QUE SIGUEN	18
<b>CAPÍTULO I: INGENIERÍA: UNA ORGANIZACIÓN PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE PLANTAS INDUSTRIALES</b>	<b>21</b>
1.1 INTRODUCCIÓN	21
1.1.1 Algunas definiciones introductorias	22
1.2 LA PLANTA INDUSTRIAL: Descripción y objetivos	25
1.2.1 Proyecto de una Planta Industrial	27
1.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA PLANTA INDUSTRIAL	28
1.3.1 Estructura orgánica del proyecto de una Planta Industrial	29

<i>I.4 LA INGENIERÍA: Una Organización para el desarrollo de Proyectos de Plantas Industriales</i>	<i>31</i>
<i>I.4.1 Un procedimiento para la asignación de actividades a las especialidades</i>	<i>33</i>
<i>I.4.2 Un procedimiento para la imputación de costes a los proyectos</i>	<i>37</i>
<i>I.5 EL COMPORTAMIENTO HUMANO: Un factor esencial en la Planificación</i>	<i>43</i>
<i>I.5.1 Modificadores del comportamiento desde la perspectiva clásica</i>	<i>43</i>
<i>I.5.2 Modificadores del comportamiento desde nuestra perspectiva</i>	<i>44</i>

## **CAPÍTULO II: PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS: ORIGEN Y EVOLUCIÓN** **47**

<i>II.1 INTRODUCCIÓN</i>	<i>47</i>
<i>II.2 EL ORIGEN DE LAS TÉCNICAS MODERNAS PARA LA PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS</i>	<i>49</i>
<i>II.2.1 La técnica PERT</i>	<i>49</i>
<i>II.2.2 Algunas opiniones sobre la técnica PERT</i>	<i>52</i>
<i>II.2.3 El método del camino crítico (CPM)</i>	<i>57</i>
<i>II.3 EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO “PERT” EN EL TIEMPO</i>	<i>58</i>
<i>II.3.1 Consideración de los recursos disponibles</i>	<i>59</i>
<i>II.3.2 Consideración de la calidad</i>	<i>60</i>
<i>II.3.3 Consideración de la relación tiempo-coste en forma discreta</i>	<i>61</i>
<i>II.4 VOCACIÓN DEL CONCEPTO “PERT” Y SU EVOLUCIÓN POSTERIOR</i>	<i>62</i>
<i>II.4.1 Algunos aspectos de la evolución del concepto PERT</i>	<i>64</i>
<i>II.4.2 Algunas técnicas variantes de la técnica PERT</i>	<i>66</i>
<i>II.4.3 Algunas observaciones sobre las técnicas informáticas al servicio de la Planificación de Proyectos</i>	<i>69</i>
<i>II.5 CONCLUSIONES SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS: NUESTRA POSICIÓN</i>	<i>70</i>

II.5.1	<i>Etapas de un proceso de planificación</i>	72
II.5.2	<i>Nuestra visión evolutiva de Planificación de Proyectos</i>	75
<b>CAPÍTULO III: PLANTEAMIENTO TEÓRICO</b>		<b>79</b>
III.1	<i>INTRODUCCIÓN</i>	79
III.2	<i>EL OBJETO DEL PRESENTE TRABAJO DENTRO DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA</i>	80
III.3	<i>ALGUNAS PECULIARIDADES DE LA PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS DE PLANTAS INDUSTRIALES</i>	82
III.3.1	<i>Consideraciones generales</i>	82
III.3.2	<i>Algunas definiciones</i>	83
III.3.3	<i>Consideraciones relativas al tiempo de ejecución de las actividades</i>	85
III.3.4	<i>Una observación frecuente: El retraso en la terminación de los proyectos</i>	87
III.3.5	<i>Consideraciones relativas al tiempo de ejecución del proyecto</i>	88
III.4	<i>FORMAS DE EJECUTAR UNA ACTIVIDAD</i>	89
III.4.1	<i>Planteamientos clásicos</i>	89
III.4.2	<i>Planteamiento de Leachman</i>	90
III.4.3	<i>Nuestro planteamiento</i>	91
III. 4.3.1	<i>Modo de ejecución estándar de una actividad</i>	93
III. 4.3.2	<i>Otros modos de ejecución de una actividad</i>	93
III.5	<i>FORMALIZACIÓN DE NUESTRO PLANTEAMIENTO</i>	94
III.5.1	<i>Intensidad media de una actividad y modos de ejecución</i>	94
III.5.2	<i>El efecto relajación</i>	98
III.5.3	<i>Factor de relajación</i>	99
III.6	<i>MODELIZACIÓN GENERAL DE LA ACTIVIDAD</i>	102
III.6.1	<i>Función de intensidad instantánea inicial de la actividad “<math>z_1(\alpha, w)</math>”</i>	102
III.6.2	<i>Función de modos de ejecución “<math>z_2(w)</math>”</i>	103
III.6.3	<i>Función de intensidad instantánea de la actividad “<math>I(\alpha, w)</math>”</i>	104

III.6.4	<i>Objetivos de los modelos</i>	106
III.7	<b>MODELO DE LA ACTIVIDAD BÁSICO</b>	106
III.7.1	<i>Función de intensidad instantánea inicial “<math>z_1(\alpha, w)</math>” en el modelo MABIT</i>	107
III.7.2	<i>Función de intensidad instantánea de la actividad “<math>I(\alpha, w)</math>” en el modelo MABIT</i>	108
III.7.3	<i>Forma de cuantificar los mecanismos correctores del ER</i>	109
III.8	<b>MODELIZACIÓN DEL PROYECTO</b>	110
III.8.1	<i>Fundamentos del modelo</i>	111
III.8.2	<i>Objetivos del modelo</i>	114
III.8.3	<i>Descripción del modelo</i>	114
III.8.4	<i>Funcionamiento del modelo</i>	115
 <b>CAPÍTULO IV: EL RETRASO EN LA TERMINACIÓN DE LOS PROYECTOS</b>		 119
IV.1	<b>INTRODUCCIÓN</b>	119
IV.2	<b>EL RETRASO EN LOS PROYECTOS: El enfoque clásico</b>	122
IV.2.1	<i>Método de Fulkerson</i>	122
IV.2.2	<i>Observaciones de Klingel</i>	124
IV.2.3	<i>Observaciones de King y Wilson</i>	126
IV.2.4	<i>Observaciones de King y Otros</i>	127
IV.2.5	<i>Método de Britney</i>	129
IV.2.6	<i>Fundamentos de Schonberger</i>	130
IV.2.7	<i>Planteamiento de Kamburowski</i>	132
IV.2.8	<i>Opinión de Liu y Horowitz</i>	134
IV.2.9	<i>Opinión de Littlefield y Randolph</i>	135
IV.2.10	<i>Método de Golenko y Gonik</i>	135
IV.3	<b>ANTECEDENTES CERCANOS</b>	137
IV.3.1	<i>Propuesta de Leachman</i>	137
IV.3.2	<i>Opinión de Tavares</i>	140
IV.3.3	<i>Propuesta de Tavares y otros</i>	141

IV.3.3.1	<i>Nivel jerárquico de la actividad</i>	143
IV.3.3.2	<i>Morfología de un proyecto</i>	145
IV.3.3.3	<i>Resultados gráficos</i>	147
IV.3.3.4	<i>Interpretación de los resultados</i>	148
IV.4	<i>EL RETRASO EN LOS PROYECTOS: Una observación extraída de la realidad</i>	150
IV.5	<i>EL RETRASO EN LOS PROYECTOS: Nuestra propuesta</i>	151
IV.6	<i>CONCLUSIONES</i>	153

<b>CAPÍTULO V: EL EFECTO RELAJACIÓN: MODELOS EXPLICATIVOS</b>		<b>155</b>
V.1	<i>INTRODUCCIÓN</i>	155
V.2	<i>DESCRIPCIÓN, TRATAMIENTO Y FUNDAMENTOS DEL EFECTO RELAJACIÓN</i>	157
V.2.1	<i>Descripción del Efecto Relajación</i>	157
V.2.2	<i>Tratamiento del Efecto Relajación</i>	160
V.2.3	<i>Fundamentos del Efecto Relajación</i>	161
V.3	<i>MODELOS EXPLICATIVOS DE LA ACTIVIDAD</i>	162
V.3.1	<i>Planteamiento general para los modelos explicativos</i>	167
V.4	<i>MODELO DE ACTIVIDAD BÁSICO INTENSIDAD-TIEMPO (MABIT)</i>	168
V.4.1	<i>Funcionamiento del modelo “MABIT”</i>	169
V.5	<i>MODELO DE ACTIVIDAD POTENCIAL INTENSIDAD-TIEMPO (MAPIT)</i>	174
V.5.1	<i>Funcionamiento del modelo “MAPIT”</i>	177
V.6	<i>COMPENSACIÓN DEL EFECTO RELAJACIÓN</i>	181
V.6.1	<i>Hipótesis Ingenua</i>	182
V.6.2	<i>Hipótesis Realista</i>	183
V.7	<i>CONCLUSIONES RELATIVAS A LOS MODELOS PRESENTADOS</i>	184

<b>CAPÍTULO VI: EL EFECTO RELAJACIÓN: SU INCIDENCIA EN LA DEMORA DEL PROYECTO</b>	<b>187</b>
VI.1 INTRODUCCIÓN	187
VI.2 PERFIL DEL PROYECTO	189
VI.2.1 Perfil tipo escalera	190
VI.2.2 Perfil tipo general (función continua)	192
VI.2.2.1 Expresiones más significativas de los avances	195
VI.2.3 Perfil tipo “MB” (de recursos constantes o básico)	196
VI.2.4 Perfil tipo “MLRCD” (de recursos crecientes decrecientes o de las dos pendientes)	198
VI.2.4.1 Puntos singulares del modelo MLRCD	199
VI.2.4.2 Función $R(t)$ del modelo MLRCD	200
VI.2.4.3 Cálculo del retraso en el modelo MLRCD	202
VI.2.4.4 Eficiencia perdida en el modelo MLRCD	203
VI.2.4.5 Los avances en el modelo MLRCD	204
VI.3 LA CONSTANTE “k” DE LA ORGANIZACIÓN	205
VI.4 LA FUNCIÓN $D(h,m,q)$ “DEMORA DEL PROYECTO”	207
VI.5 EJEMPLO NUMÉRICO	212
VI.6 TRATAMIENTO DE UN PERFIL CUALQUIERA	214
VI.7 FORMA DE OPERAR LA APLICACIÓN DESARROLLADA SOBRE Excel™	218
VI.7.1 Ajuste de un perfil “libre” al modelo “MLRCD”	219
VI.7.2 Forma de operar la aplicación para ajustar un perfil cualquiera al modelo “MLRCD”	220
<b>CAPÍTULO VII: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PROYECTOS REALES</b>	<b>223</b>
VII.1 INTRODUCCIÓN	223
VII.2 SELECCIÓN DE LOS PROYECTOS RELEVANTES	224
VII.3 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS	225
VII.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	237

VII.4.1	<i>Resultados mostrados por la aplicación</i>	237
VII.4.2	<i>Análisis estadístico de los resultados</i>	237
VII.4.3	<i>Influencia del parámetro “h” en los retrasos</i>	239
VII.5	<b>VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS</b>	240
VII.6	<b>EL CENTRO DE GRAVEDAD DE LOS RECURSOS Y SU IMPACTO EN LOS RETRASOS</b>	244
VII.6.1	<i>Observaciones de este efecto en los proyectos reales analizados</i>	249
 <b>CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y PRINCIPALES APORTACIONES</b>		<b>251</b>
VIII.1	<b>INTRODUCCIÓN</b>	251
VIII.2	<b>CONCLUSIONES DERIVADAS DE LA DELIMITACIÓN REALIZADA</b>	252
VIII.3	<b>CONCLUSIONES DERIVADAS DE NUESTRO PLANTEAMIENTO TEÓRICO</b>	254
VIII.4	<b>CONCLUSIONES SOBRE EL ENFOQUE CLÁSICO DE LOS RETRASOS</b>	256
VIII.5	<b>CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE PROYECTOS REALES</b>	258
VIII.6	<b>PRINCIPALES APORTACIONES</b>	260
VIII.6.1	<i>Particular concepto de actividad</i>	260
VIII.6.2	<i>Modo de ejecución estándar de una actividad</i>	261
VIII.6.3	<i>Concepto de “utilidad de un proyecto”</i>	262
VIII.6.4	<i>Concepto de “utilidad de una actividad”</i>	262
VIII.6.5	<i>Concepto de “modos de ejecutar una actividad”</i>	263
VIII.6.6	<i>Función de modos de ejecución de una actividad</i>	264
VIII.6.7	<i>Concepto de “horizonte temporal”</i>	264
VIII.6.8	<i>Concepto de “efecto relajación”</i>	264
VIII.6.9	<i>Concepto de “factor de relajación”</i>	265
VIII.6.10	<i>Concepto de “constante de la Organización”</i>	266
VIII.6.11	<i>Modelo de actividad intensidad-tiempo</i>	266
VIII.6.12	<i>Concepto de “presión sobre el procesador”</i>	267

---

VIII.6.13	<i>Modelo lineal de recursos crecientes-decrecientes</i>	267
VIII.6.14	<i>Aplicación para adaptar el perfil real de un proyecto al modelo MLRCD</i>	268
<b>ANEXO-CÁLCULOS</b>		<b>269</b>
<b>I</b>	<b>CÁLCULOS RELATIVOS A LOS MODELOS EXPLICATIVOS DE LA ACTIVIDAD</b>	<b>269</b>
I.1	<i>Cálculos relativos al modelo “MABIT”</i>	269
I.1.1	<i>Cálculos relativos a una variante del modelo “MABIT”</i>	272
I.2	<i>Cálculos relativos al modelo “MAPIT”</i>	273
<b>II</b>	<b>CÁLCULOS RELATIVOS A LOS MODELOS “MB” Y “MLRCD”</b>	<b>275</b>
II.1	<i>Cálculos relativos al modelo “MB”</i>	275
II.2	<i>Cálculos relativos al modelo “MLRCD”</i>	276
II.2.1	<i>Cálculo de los recursos totales en el modelo “MLRCD”</i>	277
II.2.2	<i>Cálculo del retraso en el modelo “MLRCD”</i>	278
II.2.3	<i>Cálculo de la eficiencia perdida en el modelo “MLRCD”</i>	281
II.2.4	<i>Cálculo de los avances en el modelo “MLRCD”</i>	282
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>285</b>



## **INTRODUCCIÓN**

### **1 OBSERVACIONES EN LAS QUE SE FUNDAMENTA LA TESIS**

Hemos observado en la práctica cómo los proyectos casi siempre se terminan después de la fecha inicialmente estimada, al margen de si la planificación realizada es o no correcta. Este fenómeno, que ha sido ya analizado por muchos autores sin una respuesta clara y totalmente aceptada, nos ha movido a buscar una explicación nueva a algo tan común.

Como paso previo a la realización de la planificación de un proyecto se procede a su fragmentación en partes o actividades. Dicha fragmentación tiene como objetivo fundamental posibilitar la posterior cuantificación de cada una de las actividades, asociándoles un tiempo de ejecución. Dicho proceso de cuantificación se conoce como “métrica de las actividades”. Es evidente que, a mayor fragmentación, mayor facilidad para delimitar cada actividad y, en consecuencia, mayor precisión en su cuantificación. Pero, a su vez, resultará una red de actividades más compleja en sus relaciones y en el cálculo del tiempo de ejecución global, por lo que la labor de fragmentación del proyecto no es algo neutral. Yendo un poco más lejos, podríamos afirmar que una fragmentación óptima es una condición necesaria para el éxito de la planificación. En el planteamiento clásico se concede poca importancia a la fragmentación del

proyecto, aduciendo que es un problema puramente técnico. En nuestro planteamiento supondremos que tal condición es necesaria e importante de tener en cuenta.

Una de las componentes fundamentales del éxito al que nos referimos en el párrafo anterior es la de “acertar” en la fecha de finalización del proyecto. Pero si, como ya hemos dicho, la experiencia muestra en la mayoría de los casos que esa fecha supera a la estimada, es porque una fragmentación óptima no es una condición suficiente para el éxito de la planificación de aquél. Pero ¿por qué el error en la estimación suele apuntar siempre en el mismo sentido de retrasar la fecha de finalización del proyecto?

La respuesta clásica a este interrogante es la de que no se aplican correctamente los métodos de cálculo para la obtención del tiempo de ejecución del proyecto debido, principalmente, a la complejidad de dichos métodos. Esta respuesta se fundamenta en que cuando se emplean funciones de distribución para la estimación de los tiempos de las actividades, el resultado es mayor que cuando se emplean tiempos medios. En cualquier caso, nosotros pensamos que el método empleado no debería producir más error que la utilización de datos erróneos en sí mismos. Pero independientemente de que los datos sean erróneos o el método incorrecto o mal aplicado, debe existir algo más que explique esa tendencia al alargamiento del tiempo de ejecución del proyecto: Esta es nuestra postura ante ese interrogante.

Nuestra hipótesis fundamental considera que una de las principales causas del retraso en la terminación de los proyectos, reside en cierta percepción de los procesadores responsables de la ejecución de las diferentes actividades en que aquellos fueron fragmentados. Esa percepción es la que dará lugar a que cada procesador adopte una determinada actitud frente al desarrollo de su actividad, que normalmente se traducirá en un alargamiento del tiempo necesario para su ejecución.

Dado que son diversos los procesadores que contribuyen al desarrollo de cualquier proyecto y que es tan común que sus diferentes actividades se concluyan con retraso, pensamos que puede haber una causa que oriente las actividades de esos procesadores en el mismo sentido. Si es así, esa causa podría residir en el entorno en que interactúan los procesadores. Con estas premisas plantearemos su detección y aislamiento de otras causas, y diseñaremos mecanismos dirigidos a su neutralización.

## 2 CAUSAS DE LOS RETRASOS

Del análisis de la literatura que aborda la preocupación por los tan habituales retrasos en la terminación de los proyectos se desprende que, dichos retrasos, son debidos a alguna de las siguientes causas o a cualquier combinación de las mismas:

- Deficiencias en los métodos para la asignación a las actividades de su tiempo de ejecución.
- Deficiencias en el proceso para el cálculo del tiempo necesario para la ejecución del proyecto<sup>1</sup>.
- Deficiencias en la estimación de los recursos necesarios para el correcto desarrollo del proyecto.

Se suele pensar que una vez subsanadas esas deficiencias se obtendrán resultados más acordes con la realidad para los tiempos de desarrollo de los proyectos, o lo que es lo mismo, resultados mayores (estimaciones más largas). La realidad viene mostrando que sea cual sea el método empleado para el cómputo de ese tiempo, el retraso está casi siempre presente. Por otra parte, si consideramos que un determinado método es mejor porque sus resultados se

---

<sup>1</sup> En este apartado cabe incluir las diferentes interpretaciones sobre las formas de las funciones de distribución, en el caso probabilista.

refieren a tiempos más largos, y a pesar de todo el proyecto se sigue retrasando, estaremos creando una espiral teóricamente sin límite.

La explicación que en este trabajo damos al retraso de los proyectos está en una línea diferente, que a grandes rasgos resumimos en los puntos siguientes:

- La metodología empleada para el cálculo del tiempo de ejecución del proyecto es totalmente válida, sus resultados correctos y la asignación de recursos para su desarrollo adecuada<sup>2</sup>.
- Si existe retraso, se debe a determinados factores intrínsecos a la Organización en cuyo seno se ejecuta el proyecto.
- Es posible establecer mecanismos correctores de aquellas causas que provocan los retrasos.
- Para la compensación de los retrasos, será necesario aplicar esos mecanismos correctores en el momento oportuno y con la intensidad adecuada a ese momento.

### 3 OBJETIVOS DEL PRESENTE TRABAJO

El objetivo principal del presente trabajo es formular una teoría explicativa del retraso en que con tanta frecuencia incurren los proyectos, fundamentada en un determinado conjunto de hipótesis. Para referirnos a aquello que engloba las supuestas posibles causas responsables del retraso utilizaremos el término “*Efecto Relajación*”. Para referirnos a nuestra teoría utilizaremos el nombre de “*Teoría del Efecto Relajación*”.

Un segundo objetivo es el planteamiento y descripción de una familia de modelos de la actividad, sustentados en ese conjunto de hipótesis planteadas.

---

<sup>2</sup> Esta consideración no implica por nuestra parte un total acuerdo con la metodología que se viene aplicando en la práctica de la planificación de proyectos.

Estos modelos son traducciones de las observaciones reales y servirán para la cuantificación de cierto mecanismo corrector del Efecto Relajación. Para referirnos a ese mecanismo utilizaremos el término “*presión sobre el procesador*”, que expresaremos mediante un parámetro.

Un tercer objetivo se refiere al planteamiento y descripción de otra familia de modelos, esta vez del proyecto como conjunto de todas las actividades. Estos modelos permiten establecer la relación entre los retrasos de los proyectos y el Efecto Relajación, dando lugar a los mecanismos analíticos que nos conducirán a la obtención de otro parámetro al que llamaremos “*constante de la Organización*”.

Un cuarto objetivo es el de la medición de la constante de la Organización. Para ello se desarrolla una aplicación informática que admite como datos el perfil de un proyecto real y determina el modelo equivalente con sus parámetros asociados. El resultado de analizar un conjunto de proyectos de una misma Organización, si nuestras hipótesis fueran acertadas y la muestra reuniese las condiciones adecuadas, nos mostraría un conjunto de valores para este parámetro, con la uniformidad suficiente para aceptarlo como constante para esa Organización.

#### **4 EXPLICACIÓN DEL TÍTULO DE LA TESIS Y DELIMITACIÓN DE LA MISMA**

La primera parte del título asignado al presente trabajo “*Planificación de Proyectos de Plantas Industriales*”, trata de delimitar el campo en que serían aplicables las hipótesis, teorías y conclusiones que sucesivamente vayan siendo expuestas. Esta delimitación se realiza con la finalidad de aprovechar, para el objetivo de esta tesis, la experiencia personal del doctorando en una Organización donde se elaboran planificaciones y se desarrolla este tipo de proyectos. Aún así,

no se renuncia a la posible utilidad que, por traslación, tengan los resultados obtenidos a otros campos de la Planificación.

Tradicionalmente, la parte de la Planificación de Proyectos que ha sido estudiada aplicando técnicas de la Investigación Operativa ha sido la programación<sup>3</sup>. Así, la programación o scheduling y su resultado principal (tiempo de desarrollo del proyecto) cobran gran relevancia, apareciendo diversas teorías, técnicas y metodologías que están evolucionando desde la aparición del clásico PERT (Program Evaluation and Review Technique) (Malcolm y otros, 1.959) hasta las más recientes, que en la mayoría de los casos se fundamentan en aquél.

Cuando intentamos demarcar el tema propuesto, al tratarse de una disciplina del extenso campo de la Economía, nos detenemos en la “Dirección de Proyectos”<sup>4</sup> con sus tres facetas fundamentales: Planificar, Organizar y Controlar (Steward, 1.981b). Elegimos la planificación como contenedora de la programación.

La Dirección de Proyectos es una disciplina que está cobrando una gran vitalidad, como lo demuestra la existencia de un foro de discusión europeo (EURO Working Group on Project Management and Scheduling), donde se plantean y discuten todos los temas de este campo de la Investigación Operativa (Herroelen y Demeulemeester, 1996).

La Planificación de Proyectos será el término que utilicemos, con la mayor generalidad, cuando nos refiramos a aquella función de la Dirección de Proyectos cuyo objetivo es investigar, asignar, analizar y programar una matriz de actividades y recursos que debe culminar con la materialización de la planificación.

---

<sup>3</sup> Traducción del término anglosajón “Scheduling”.

<sup>4</sup> Traducción del término anglosajón “Project Management”.

La segunda parte del título asignado al presente trabajo: “*El Efecto Relajación y modelos explicativos de los retrasos*”, trata de referirse al objeto principal del mismo y que basaremos en los cuatro conceptos fundamentales que siguen:

- *El procesador: El agente encargado de la ejecución de la actividad.* Estableceremos modelos de análisis que permitan cuantificar un factor importante de su “actitud”, que denominaremos “*Efecto Relajación*”.
- *La actividad: Una de las partes elementales de un proyecto.* Estableceremos una definición acorde con la realidad, la precisión y la coherencia que requieren las hipótesis que serán planteadas en lo sucesivo.
- *El proyecto: Un conjunto estructurado de actividades.* Estableceremos modelos de análisis que, asociando el retraso real en que se ha incurrido con la forma en que se han aplicado los recursos, permitan cuantificar el efecto relajación mediante un parámetro inherente a esa Organización.
- *La Organización: El ente en cuyo seno se desarrollan los proyectos.* Propondremos las hipotéticas causas que dan lugar al efecto relajación y los mecanismos para su compensación, estableciendo su cuantificación mediante un parámetro que resuma los referidos mecanismos.

Con relación a cada uno de los cuatro conceptos, trataremos de aportar algo nuevo a la ciencia de la Planificación de Proyectos.

## **5 PRINCIPALES APORTACIONES DE ESTE TRABAJO**

Aunque no es momento de resúmenes ni de conclusiones, creemos oportuno anticipar una breve mención a los aspectos más relevantes del presente trabajo. No entraremos en planteamientos ni en definiciones de conceptos, únicamente realizaremos un rápido repaso por las principales aportaciones, que serán expuestas con más detalle en el capítulo VIII.

Al referirnos a aspectos de la Planificación de Proyectos que aún no han sido tratados por la literatura existente, debemos establecer varias definiciones nuevas relativas a conceptos de este campo. En particular destacaremos aquí el concepto de “*Efecto Relajación*”, que consideramos como la principal aportación de este trabajo. En torno a él esbozaremos el conjunto de hipótesis que soporta a nuestra teoría, partiendo de nuevas ideas en torno a la actividad, utilidad aportada, modos de ejecución de la misma y su traslación al proyecto.

Una segunda aportación es el concepto de “*presión sobre el procesador*”, parámetro que servirá de referencia para la compensación del efecto relajación, y el conjunto de modelos que nos permitirán su cuantificación. Cada visión de la dinámica de la actividad en su progreso, determinará un modelo diferente que conducirá a la obtención de un parámetro distinto.

También destacaremos aquí la originalidad del concepto de “*constante de la Organización*”, como cuantificación del efecto relajación. Así como la construcción del modelo que nos conducirá a su obtención, partiendo de datos extraídos de la realidad de los proyectos.

Una cuarta aportación de menor relevancia sería la elaboración de la aplicación informática que soporta los modelos a los que hemos hecho referencia. Esta aplicación nos permitirá, partiendo del banco de datos de la Organización que desarrolla los proyectos, obtener el valor de la referida constante o bien, partiendo de su valor conocido, estimar el retraso en que incurriría un determinado proyecto (en el caso de no tomar medidas conducentes a la compensación del efecto relajación).



## 6 FUENTES DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

Como fuentes de información y documentación para la elaboración del presente trabajo, se han tenido en cuenta aquellos documentos relacionados con la Planificación de Proyectos que hemos seleccionado de la amplia bibliografía existente sobre el tema. Desde los orígenes de esta disciplina se han sucedido infinidad de publicaciones, lo que ha motivado que algunos autores se hayan ocupado de seleccionar y clasificar los artículos y publicaciones más relevantes. Bigelow (1962) se refiere a las publicaciones entre los años 1959 y 1961<sup>5</sup>. Lerda-Olberg (1966) recoge la bibliografía sobre Planificación de Proyectos existente entre 1962 y 1965. Adlakha y Kulkarni (1989) realizan la clasificación bibliográfica entre los años 1966 y 1987. No hemos encontrado ninguna referencia que sintetice la bibliografía existente desde 1988 hasta fechas recientes. También hemos considerado como fuente la práctica habitual de las Organizaciones donde se desarrollan las planificaciones de los proyectos como antesala de su desarrollo.

En concreto, clasificaremos a las fuentes de información y documentación en dos grandes apartados según su origen:

- *Fuentes bibliográficas:* La bibliografía ha sido seleccionada de publicaciones periódicas, sin descartar algún libro como complemento teórico. La mayoría de los artículos son relativamente recientes ya que el tema propuesto conecta con las investigaciones más modernas sobre este campo. Tampoco se han descartado artículos o libros más antiguos que, en la mayoría de los casos, servirán como apoyo teórico o como eslabón con los orígenes de estas inquietudes.
- *Otras fuentes:* Las inquietudes y la experiencia personal del doctorando que se sustentan en su actividad profesional en una Ingeniería durante los últimos 24 años, donde ha tenido la oportunidad de observar la falta de

---

<sup>5</sup> Es de destacar cómo en este periodo predominan las referencias de origen y aplicación a proyectos militares.

credibilidad de las herramientas tradicionales para la Planificación. Quizá porque dichas herramientas carecen de una fuerte conexión con la realidad material de los Proyectos.

## **7 UN BREVE RECORRIDO POR LOS CAPÍTULOS QUE SIGUEN**

El capítulo I, titulado “INGENIERÍA: UNA ORGANIZACIÓN PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE PLANTAS INDUSTRIALES”, será de mayor utilidad para los lectores no conocedores de este tipo de Organizaciones, aun cuando es recomendable su lectura, dado que introduce algunos elementos originales. Describe el entorno o marco que rodea al tipo de proyectos a que nos estamos refiriendo. Se acomete cada uno de los conceptos desde el enfoque que más conviene al presente trabajo, dando definiciones acordes con las hipótesis que plantearemos posteriormente y estableciendo la terminología básica. Se justifica la estructura organizativa de las ingenierías y se propone una metodología original para la asignación de actividades (reparto entre las especialidades) y la imputación de costes (reparto entre los proyectos).

El capítulo II, titulado “PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS: ORIGEN Y EVOLUCIÓN”, realiza una incursión por la bibliografía analizada, poniendo énfasis en los planteamientos que se han venido sucediendo en el terreno de la Planificación de Proyectos. En particular analiza la evolución que ha seguido la técnica PERT, como herramienta clave en este terreno.

El capítulo III, titulado “PLANTEAMIENTO TEÓRICO”, pretende poner de manifiesto el objeto fundamental de esta tesis sin necesidad de entrar en los detalles. Se trata de un intento de transmitir las ideas fundamentales de forma breve pero rigurosa, estableciendo las hipótesis y definiciones necesarias. Una lectura hasta este punto debe ser suficiente para la comprensión de lo que deseamos transmitir. Los capítulos que siguen servirán para profundizar en el

tema de los retrasos y en los modelos explicativos, así como en la aplicación de nuestro modelo teórico a proyectos reales.

El capítulo IV, titulado “EL RETRASO EN LA TERMINACIÓN DE LOS PROYECTOS”, expone las diferentes posiciones e interpretaciones que, sobre este tema, hemos encontrado en la bibliografía. El planteamiento se hace de forma cronológica, haciendo referencia al autor y un resumen de su aportación con el detalle imprescindible para detectar y resaltar los matices diferenciales.

El capítulo V, titulado “EL EFECTO RELAJACIÓN: MODELOS EXPLICATIVOS”, amplía el concepto de “Efecto Relajación” introducido en el capítulo III, exponiendo y desarrollando dos modelos explicativos del mismo, cuantificando su compensación en cada uno de ellos. En particular presentamos un modelo lineal y otro potencial, como paradigmas de las diversas formas de interpretar la incidencia del efecto relajación y su forma de compensación.

El capítulo VI, titulado “EL EFECTO RELAJACIÓN: SU INCIDENCIA EN LA DEMORA DEL PROYECTO”, amplía los conceptos introducidos en el capítulo III sobre la relación existente entre el efecto relajación y la demora del proyecto, que pasa por la forma de su perfil. De esta relación podremos extraer el valor del parámetro que sirve de expresión al efecto relajación, así como los valores de aquellos otros parámetros que conforman los modelos propuestos.

En el capítulo VII, titulado “RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PROYECTOS REALES”, nos referiremos a los resultados obtenidos cuando aplicamos nuestro modelo teórico a proyectos reales, que han sido ejecutados en una determinada Organización que pone a nuestra disposición su banco de datos históricos. Hemos analizado todos los proyectos disponibles, seleccionando aquellos que han tenido un desarrollo normal (sin interrupciones, suspensiones, aplazamientos, etc.).

En el capítulo VIII, titulado “CONCLUSIONES Y PRINCIPALES APORTACIONES”, intentaremos poner de relieve las claves de nuestro planteamiento, con el fin de extraer conclusiones y plantear posibles líneas de futura investigación. Por último, destacaremos lo que consideramos principales aportaciones del presente trabajo.

En un “ANEXO” se recogen con todo detalle (paso por paso) los desarrollos matemáticos que corresponden a los modelos expuestos, con el fin de no cargar innecesariamente los capítulos afectados.

Por último, en la “BIBLIOGRAFÍA” se reseñan los principales textos que han sido consultados para la labor de investigación, y que en algún momento del desarrollo del presente trabajo hemos referenciado.

## **CAPÍTULO I**

# **INGENIERÍA: UNA ORGANIZACIÓN PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE PLANTAS INDUSTRIALES**

### **I.1 INTRODUCCIÓN**

Consideramos de interés realizar una descripción del entorno en que se ejecutan los proyectos de plantas industriales, pensando que su conocimiento servirá para la mejor comprensión del desarrollo posterior del presente trabajo. Cuando nos referimos al “entorno” lo estamos haciendo a la Organización en cuyo seno se ejecutan los referidos proyectos, con su hábitat, estructura, procedimientos, herramientas, historia, etc., donde distinguiremos dos claras componentes:

- *Entorno material:* Será el entorno inmediato, caracterizado por el espacio físico y su distribución. Siendo una componente muy variable, se caracteriza por ciertos mínimos marcados por la legislación.

- *Entorno abstracto:* Sería la componente de mayor peso, constituida por aquellos elementos abstractos que dan a estas estructuras categoría de Organización en sentido clásico<sup>6</sup>.

Cada una de estas componentes hacen su aportación, influyendo sobre determinados aspectos del proyecto. Aunque no podemos despreciar ninguno de esos aspectos, incidiremos en aquellos que se refieren a su desarrollo, afectando a la planificación y en particular a su tiempo de ejecución.

### **I.1.1 Algunas definiciones introductorias**

Como los términos “*Actividad*”, “*Planificación*”, “*Proyecto*”, “*Planta Industrial*”, serán utilizados con profusión a lo largo de todo el trabajo, pensamos que puede ser útil establecer sus definiciones con la finalidad de que el lector las asuma desde este momento.

**ACTIVIDAD:** En la documentación analizada no hemos encontrado una definición de actividad que satisfaga las pretensiones del presente trabajo. La generalidad con la que los diferentes autores se refieren a este concepto hace que se confunda actividad con proyecto. Con el fin de restar ambigüedad al concepto, proponemos nuestra definición:

#### ***Definición de “actividad”:***

*Conjunto de operaciones y trabajos dirigidos a completar algo útil en el contexto de un proyecto. Dichas operaciones son ejecutadas por una persona<sup>7</sup>*

---

<sup>6</sup> Consideramos que las estructuras creadas para el desarrollo de proyectos son organizaciones de acuerdo con la conceptualización clásica (ver definiciones de Organización en Weber, Mooney, Simon, Argyris, Quijano, entre otros).

<sup>7</sup> Nótese cómo nos referimos a “una” persona. Así suele ocurrir cuando se realiza la fragmentación de un proyecto de ingeniería de una planta industrial.

*(procesador), con un conjunto manejable de medios (herramientas y/o procedimientos), en un determinado entorno.*

**PLANIFICACIÓN:** Son muchos los tratados y artículos especializados que dan definiciones del término “Planificación”. Inicialmente se utiliza este término con frecuencia en los tratados sobre Economía, adquiriendo posteriormente connotaciones políticas. Es a partir de la segunda mitad del siglo XX cuando empieza a utilizarse en el sentido que aquí nos interesa. Al no haber encontrado una definición inequívoca en la bibliografía consultada, intentaremos esbozar la que consideramos más útil:

***Definición de “planificación”:***

*Proceso de investigación, asignación, análisis y programación de las actividades y los recursos necesarios, que se materializan en un plan concreto de acción, para la consecución futura de determinados objetivos.*

La definición dada para “planificación” pretende ser lo suficientemente amplia para que el concepto sea aplicable en cualquier contexto en que se manifieste la actividad humana. Su aplicación más frecuente está en todas las facetas de la economía, en particular en la producción de bienes y servicios.

**PROYECTO:** Aunque la definición de proyecto está recogida en los tratados con mayor homogeneidad que la de actividad, también en este caso creemos conveniente dar una definición matizada:

***Definición de “proyecto”:***

*Conjunto de actividades, previamente planificadas o no, cuya ejecución (sucesiva y/o simultánea) produce efectos acumulativos, culminando con la consecución de un determinado objetivo (objeto del proyecto).*

**PLANTA INDUSTRIAL:** Las definiciones encontradas asimilan este término a Industria, Fábrica, Empresa etc. Como en los casos anteriores, avanzamos una definición que sea útil a las pretensiones de este trabajo:

***Definición de “Planta Industrial (PI en lo sucesivo)”:***

*Sistema de una industria, que está integrado por un conjunto de máquinas e instalaciones cuya función es la transformación de determinadas materias primas (inputs) en ciertos productos acabados (outputs).*

Una *PI*, en sí misma, es un bien (aunque su función sea, a su vez, producir otros bienes) y el proyecto es lo que conducirá a su producción (como el medio que nos conduce a un fin), es decir, es el proceso o línea de producción de la *PI*. Así pues, una Ingeniería<sup>8</sup> es una “fábrica” de *PI*, pudiendo tener en funcionamiento una o varias líneas de producción. Esta “fábrica” no tiene máquinas<sup>9</sup> en términos convencionales, sus “máquinas” o “procesadores” son personas cuya función es la ejecución del conjunto de actividades que conforman cada proyecto.

Aunque el concepto “*PI*” no es fundamental para los objetivos de este trabajo, sí lo es para entender mejor determinados aspectos de la estructura de las Organizaciones en las que se desarrollan proyectos de este tipo, ya que la referida estructura es un reflejo de la correspondiente a una *PI*. Una Ingeniería puede desarrollar varios proyectos simultáneamente, pero cada uno de ellos goza de independencia y personalidad propias. Esa autonomía confiere a cada uno de ellos categoría de Organización, cuyo conocimiento ayudaría a entender mejor el proceso de planificación.

---

<sup>8</sup> Cuando utilicemos el término “Ingeniería” nos estaremos refiriendo a una Organización en cuyo seno se desarrollan proyectos de plantas industriales.

<sup>9</sup> Las máquinas que posee una Ingeniería, a las que nos referiremos como herramientas (Ordenadores, calculadoras, fotocopiadoras, etc.), no producen, sólo materializan la producción.



A esta “Organización de organizaciones” le conviene una estructura del tipo “matricial”, para cuyo funcionamiento equilibrado es preciso tener definidos dos procedimientos fundamentales:

- Procedimiento de asignación de actividades a las especialidades.
- Procedimiento de imputación de costes a los proyectos.

Se consideran fundamentales porque del primero depende un correcto dimensionamiento de las especialidades y en consecuencia posibilitar planificaciones equilibradas (sin restricciones estructurales). Del segundo depende que se realice de forma adecuada el reparto de costes a los diferentes proyectos, de forma que reflejen en cada caso la utilización real de los recursos disponibles.

## 1.2 LA PLANTA INDUSTRIAL: Descripción y objetivos

De acuerdo con la definición dada en la introducción, una *PI* puede ser considerada como un “Sistema de una Industria”. Sistema en cuanto a su autonomía y objetivos, consistentes en la obtención de uno o varios productos que reportan utilidad social desde cualquier perspectiva. La pertenencia a una determinada Industria vendrá marcada por la especialidad de los productos que esa *PI* pone a disposición social.

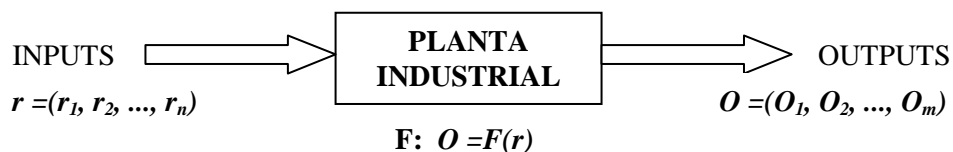


Fig. I.1

La obtención de esos productos (“m” outputs en la Fig. I.1) tiene lugar mediante un proceso que transforma “n” inputs y que está caracterizado por una función de transferencia técnica “F”. La referida función de transferencia viene determinada por la tecnología en cada momento, permaneciendo invariable hasta

el momento en que la *PI* es reconvertida o declarada obsoleta. A toda “F” va asociada otra función de transferencia económica “R” de carácter periódico (anual normalmente) que suele llamarse resultado de la explotación (Fig. I.2). Esta función es de la forma:  $\mathbf{R} = \mathbf{P}_0 \times \mathbf{O} - \mathbf{C}_r \times \mathbf{r} - \mathbf{C} - \mathbf{A}$ , donde:

- $\mathbf{P}_0$ : Vector de precios de los productos (outputs)
- $\mathbf{O}$ : Vector de outputs
- $\mathbf{C}_r$ : Vector costes de los recursos (inputs)
- $\mathbf{r}$ : Vector de los recursos (inputs)
- $\mathbf{C}$ : Costes fijos de la explotación (determinados recursos humanos, alquileres, seguros, etc.)
- $\mathbf{A}$ : Amortizaciones

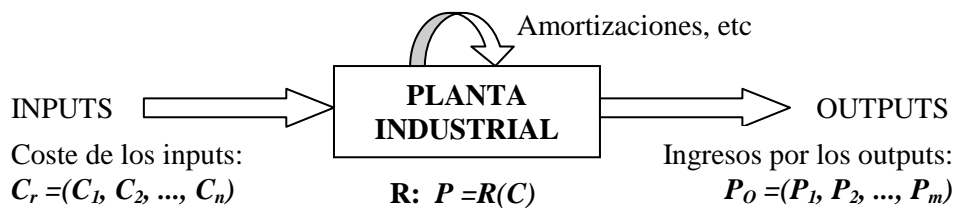


Fig. I.2

Cuando se plantea la construcción y puesta en marcha de una *PI*, normalmente se conoce la función “F” por experiencias previas y se estima la función “R” a lo largo de la vida de la *PI*. El resultado de esta estimación, actualizado al momento presente, determina la conveniencia o no de construir la *PI*. Si dicho resultado es atractivo se decide la construcción y en caso contrario se desestima. El acto de decisión conlleva la aprobación de la inversión necesaria para que la *PI* sea una realidad. La recuperación de esta inversión tendrá lugar a lo largo de la vida útil de la misma.

### ***1.2.1 Proyecto de una Planta Industrial***

La inversión necesaria para la construcción y puesta en marcha de una *PI*, no solo incluye el coste de todos los equipos, materiales y servicios asociados a la construcción, sino también el coste de un servicio que ya ha iniciado su andadura cuando se decide la inversión: *Proyecto de la Planta Industrial*.

A cierta etapa previa a todo proyecto propiamente dicho la llamaremos anteproyecto o aquella fase que tiene por objeto realizar las estimaciones necesarias para la toma de la decisión de inversión. Si esa decisión es negativa se habrá incurrido en unos gastos que no serán recuperables (costes del anteproyecto). En esta fase se realizará una planificación previa de las actividades del proyecto. Por tanto, desde el inicio debe estar bien definido el proceso tecnológico en que se fundamentará la futura *PI*. Esta planificación previa es la que tiene más relevancia desde el punto de vista económico, al estar en juego la decisión de inversión; es por tanto el momento de atender a una planificación, que si no es detallada, sí es rigurosa en el sentido de cómputo del tiempo necesario para el desarrollo del proyecto. Esto es necesario cuando la decisión de inversión está fundamentada en aspectos económicos<sup>10</sup>, ya que cuanto antes se concluya aquél antes se iniciará la construcción y, en consecuencia, antes estará produciendo y generando flujos positivos la *PI*. Cuando nos refiramos a un proyecto entenderemos que ha superado esa primera fase (anteproyecto), es decir, consideraremos que siempre se materializará en una *PI*.

Entenderemos por proyecto de una *PI* el conjunto de actividades necesarias para la definición de todos sus elementos (equipos, sistemas, materiales, documentación, etc.) y su puesta a disposición en el lugar de construcción para la materialización de la *PI*. A veces también se considera la construcción

---

<sup>10</sup> A veces la decisión de inversión no obedece a razones económicas, sino a otras de tipo político, ecológico, etc., que vienen impuestas por la normativa. En este caso, la importancia de la planificación es, si cabe, aún más relevante, ya que se debe poner en producción la *PI* lo más tarde posible sin incurrir en penalización.

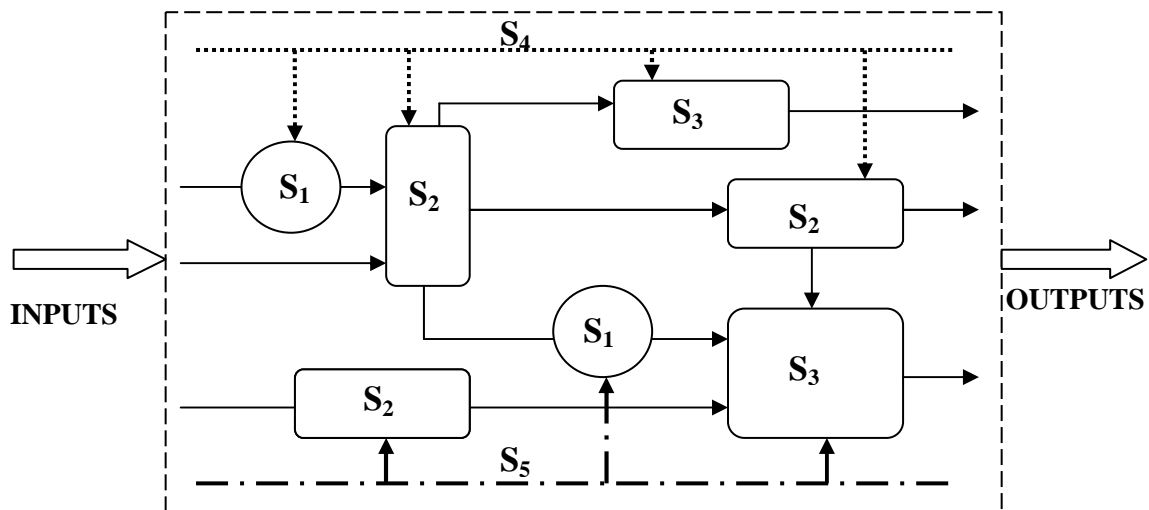
propriadamente dicha como parte del proyecto. Con estas premisas entramos en la definición de proyecto de una *PI*, como particularización de la definición de general dada en la introducción:

***Definición de “proyecto de una Planta Industrial”:***

*Es el conjunto de actividades de ingeniería que conducen al diseño, especificación y contratación de los diferentes elementos físicos, sus interconexiones y auxiliares necesarios para la construcción de una Planta Industrial.*

### ***I.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA PLANTA INDUSTRIAL***

Un análisis estructural de una *PI* nos ayudará a entender el marco o entorno en que se desarrollan los proyectos: La Ingeniería. Por otra parte, nos permitirá llegar a la concepción de su estructura como Organización y de la parte más elemental de una actividad o “acto”.



**Fig. I.3**

Contemplamos a la *PI* como un Sistema, con unas capacidades dadas y con unos objetivos productivos determinados. Estará integrada por unas partes o subsistemas (órganos de la *PI*) caracterizados por su función, capacidad y especialización. La expresión gráfica de esta idea se recoge en la Fig. I.3. Cada subsistema (“S” en la Fig.I.3) está formado por uno o más elementos discretos o por unas redes, que a su vez podrán estar integradas por elementos discretos o continuos. Denominaremos “*materia*” a cada uno de esos elementos del subsistema. A su vez, cada materia estará integrada por ciertos elementos indivisibles que llamaremos “*componentes*”.

El diseño y la integración armónica de todos los subsistemas de la *PI* permitirán su funcionalidad como un Sistema. Este es el objetivo principal de este proyecto: Diseñar cada uno de los diferentes subsistemas e integrarlos en una unidad capaz de cumplir los objetivos recogidos en las bases de diseño de esa *PI*. Para tal fin se constituye un “*Equipo de Proyecto*”, formado por un conjunto de “*procesadores*”, que serán los responsables de la ejecución del conjunto de actividades en las que se ha fragmentado el mismo. Este equipo estará liderado por la figura del “*Director del Proyecto*”.

### **I.3.1 Estructura orgánica del proyecto de una Planta Industrial**

El análisis de una *PI* (realizado anteriormente) nos lleva a admitir que la estructura más adecuada para dotar de organización a una Ingeniería es la matricial, como se refleja en la Fig. I.4. Ya hemos visto que un proyecto es cierta parte de la producción de una Ingeniería que tiene personalidad propia. Esta personalidad otorgada al conjunto y no a sus diferentes partes, nos permite establecer un paralelismo entre un proyecto y un ser vivo. Otro paralelismo (ser vivo – Organización) ha sido establecido anteriormente por lo teóricos clásicos de las Organizaciones. Aquí, al utilizarlo para un proyecto, estamos otorgando categoría de Organización al mismo y así es, ya que en él son fáciles de

identificar todos los elementos que se dan en una Organización. Es lo que convendremos en llamar “*Modelo Orgánico del Proyecto*” apoyándonos en el concepto clásico de Organización. Lo describimos a continuación:

- *Proyecto*: Lo equiparamos a un ser vivo con sus peculiaridades y su personalidad. Estará integrado por ciertos “órganos”, cada uno con su función específica, especializada, sin posibilidad de existencia independiente.
- *Especialidad*: La consideramos como un órgano (parte del ser vivo), caracterizado por su clara funcionalidad. Aun no teniendo posibilidad de existencia por separado, sí podría aplicar su función a otro ser vivo cualquiera (otro proyecto). Cada órgano está integrado por ciertas partes o “tejidos” característicos suyos.
- *Actividad*: Será considerada como una parte del órgano (tejido). Los tejidos son específicos (la mayoría de las veces) de cada órgano y son los elementos que lo dotan de una estructura concreta. Cada tejido estaría integrado por “células” que pueden ser específicas de ese tejido o estar presentes en otros.
- *Acto*: Lo consideramos la parte más elemental del proyecto, equiparable también a la parte más elemental del ser vivo (célula). La célula otorga la estructura al tejido, sirviendo su análisis para la mejor comprensión del funcionamiento del mismo. Los “actos”, como parte más elemental del proyecto y al igual que las células en los seres vivos, no son específicos ni de la actividad ni de la especialidad. Así, al ser más generales, serán mejor entendidos y sobre todo predecibles de una manera más objetiva.

El análisis estructural del proyecto y su paralelismo con la estructura de un ser vivo que proponemos, no es más que una visión metodológica original que ayuda a sustentar el concepto de actividad y de su parte más elemental “el acto”. De la misma manera que un ser vivo se desarrolla mediante un proceso sumatorio de

células, un proyecto se desarrollará ordenando adecuadamente un conjunto de actos.

#### **I.4 LA INGENIERÍA: Una Organización para el desarrollo de Proyectos de Plantas Industriales.**

El análisis de una *PI* (realizado en el punto anterior) nos debe conducir a la concepción de la organización más adecuada para el desarrollo de Proyectos de Plantas Industriales. Si tenemos en cuenta que esa organización debe tener capacidad para acometer varios proyectos simultáneamente, los procesadores tendrán que ser compartidos por los proyectos concurrentes en el tiempo. Esto nos lleva a la agrupación de los procesadores en “especialidades” con un responsable a la cabeza, de forma que la relación entre esos procesadores y el director del proyecto sea puramente funcional.

El director del proyecto, como responsable del mismo, asumirá ciertas funciones, entre las que consideramos más relevantes:

- *La planificación:* es una función característica de esta figura. Suele realizarse en la etapa del anteproyecto y consiste en generar un plan para el desarrollo del mismo, que sea óptimo en tiempo y coste para un nivel de calidad dado.
- *La coordinación:* Se trata de establecer los procedimientos y medios necesarios para el establecimiento de los canales de información entre los procesadores que desarrollan las actividades del proyecto en cuestión.
- *El control:* es otra función específica del director del proyecto, que se realiza a lo largo del desarrollo del mismo y que consiste en comparar los avances reales con los previstos en la planificación. Este control abarca también a determinados aspectos económicos, contrastando el progreso de la inversión comprometida con la cadencia de fondos prevista por las estimaciones. Como resultado del control surgen las acciones correctoras oportunas.

Una Ingeniería es una Organización pensada para el desarrollo de proyectos de *PI*. Su estructura está diseñada a imagen y semejanza de una *PI*, de tal forma que el diseño de cada órgano de la referida *PI* (subsistema de la planta) estará asumido por una especialidad (subsistema de la Organización)<sup>11</sup>. En un artículo reciente (Kilduff y otros, 1997) se pone de manifiesto algo similar, descubierto en un estudio realizado sobre la forma de organizarse un grupo de ingenieros en una fábrica japonesa: “De forma continua y consciente promovían un isomorfismo entre la estructura del grupo de trabajo y las máquinas que estaban diseñando”.

La estructura matricial es un buen diseño de organización para facilitar la adaptación a los cambios rápidos, de ahí que esa estructura sea adoptada por la mayoría de las Ingenierías que interactúan en entornos de rápida evolución (Jones y otros, 1994). En la Fig. I.4 se aprecia la típica estructura matricial, donde las especialidades (filas) prestan sus recursos a los proyectos (columnas). Los responsables de las especialidades controlan y canalizan sus recursos hacia los diferentes proyectos, mientras sus responsables coordinan las actividades que las especialidades desarrollan.

Es normal que las Ingenierías ejecuten simultáneamente varios proyectos, que compiten por los recursos de las especialidades. La tipología de aquellos debe determinar el dimensionamiento<sup>12</sup> de éstas. Si consideramos al proyecto como un conjunto de actividades, su definición debe servir para la cuantificación de los recursos que detraerá de cada una de las especialidades. Para ello es necesario que la asignación de las actividades a aquellas no ofrezca dudas. La realidad muestra que existen actividades para las que resulta dudosa su asignación a una determinada especialidad, por lo que a continuación proponemos un procedimiento original para la asignación de aquéllas a las especialidades.

---

<sup>11</sup> Aquí estamos considerando a la organización como un Sistema. Se trata de una concepción más moderna, definida por Katz & Kahn.

<sup>12</sup> Con “dimensionamiento” nos estamos refiriendo al número de procesadores de las especialidades, o lo que es lo mismo, a su dotación de recursos.



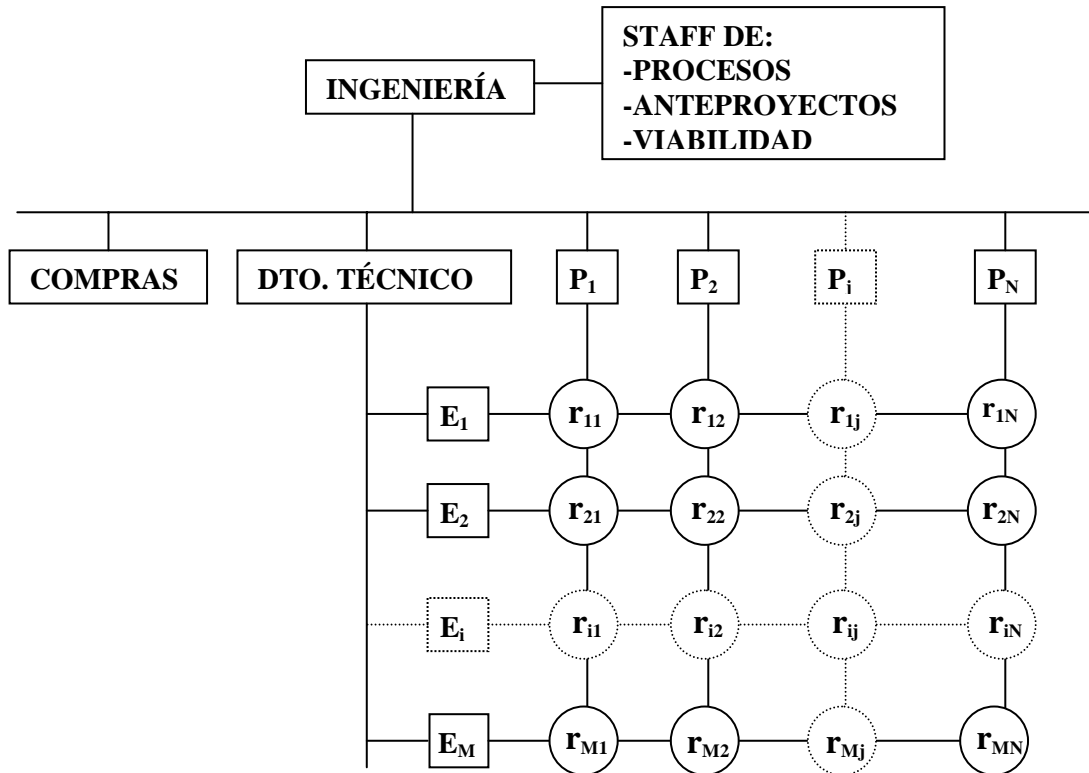


Fig. I.4

#### I.4.1 Un procedimiento para la asignación de actividades a las especialidades.

Para poder realizar una buena asignación de los recursos de una especialidad a los diferentes proyectos, es preciso que las responsabilidades de esa especialidad dentro de cada uno estén bien definidas. Se trata de delimitar el subconjunto de actividades que corresponden a cada especialidad en cada proyecto (ver Fig. I.5).

El procedimiento que se propone trata de definir unos criterios que permitan, lo más objetivamente posible, clarificar los límites existentes entre las distintas especialidades. Cada especialidad es responsable de un conjunto de “materias” con las que está relacionada ese subconjunto de actividades. Toda “materia” (que definimos a continuación) está relacionada con una o más actividades<sup>13</sup>, de acuerdo

<sup>13</sup> En la Fig. I.5 se puede observar que se ha considerado una relación biunívoca (cada materia relacionada con una actividad exclusivamente) entre el conjunto de materias y el de actividades (“p” elementos).

con los criterios y definiciones que se irán introduciendo. Si como criterio general definimos el de la función que en la *PI* cumple cada materia, es fácil determinar, para la mayoría de éstas, si pertenecen o no al ámbito de responsabilidad de la especialidad en cuestión.

Este procedimiento se fundamenta en considerar a cada especialidad  $E_i$  ( $i = 1 .. M$ ) como un conjunto cuyos elementos  $M_k$  ( $k = 1 .. p$ ) son las distintas materias definidas en esa especialidad.

Llamaremos “*materia*” a todo bien material o servicio que preste utilidad a los objetivos del proyecto. En este sentido, todo proyecto es un conjunto heterogéneo de materias:

$$P = \{ M_{11}, M_{21}, .. M_{k1}, .. M_{p1}, M_{12}, M_{22}, .. M_{k2}, .. M_{p2}, M_{1i}, M_{2i}, .. M_{ki}, .. M_{pi} .. \}$$

Donde  $M_{ki}$  es la materia “*k*” de la especialidad “*i*”.

Si tenemos definido claramente un criterio de pertenencia de una materia a una especialidad, el anterior conjunto podría ser expresado de la forma:

$$P = E_1 \cup E_2 \dots \cup E_i \dots \cup E_p , \quad \text{donde:}$$

$$E_i = \{ M_{1i}, M_{2i}, \dots M_{ki}, \dots M_{pi} \}$$

Por otra parte, si una materia pertenece a una especialidad, entonces no pertenece a otra, es decir:

$$E_h \cap E_i = \emptyset, \quad \forall h, i = 1 \dots M, h \neq i$$

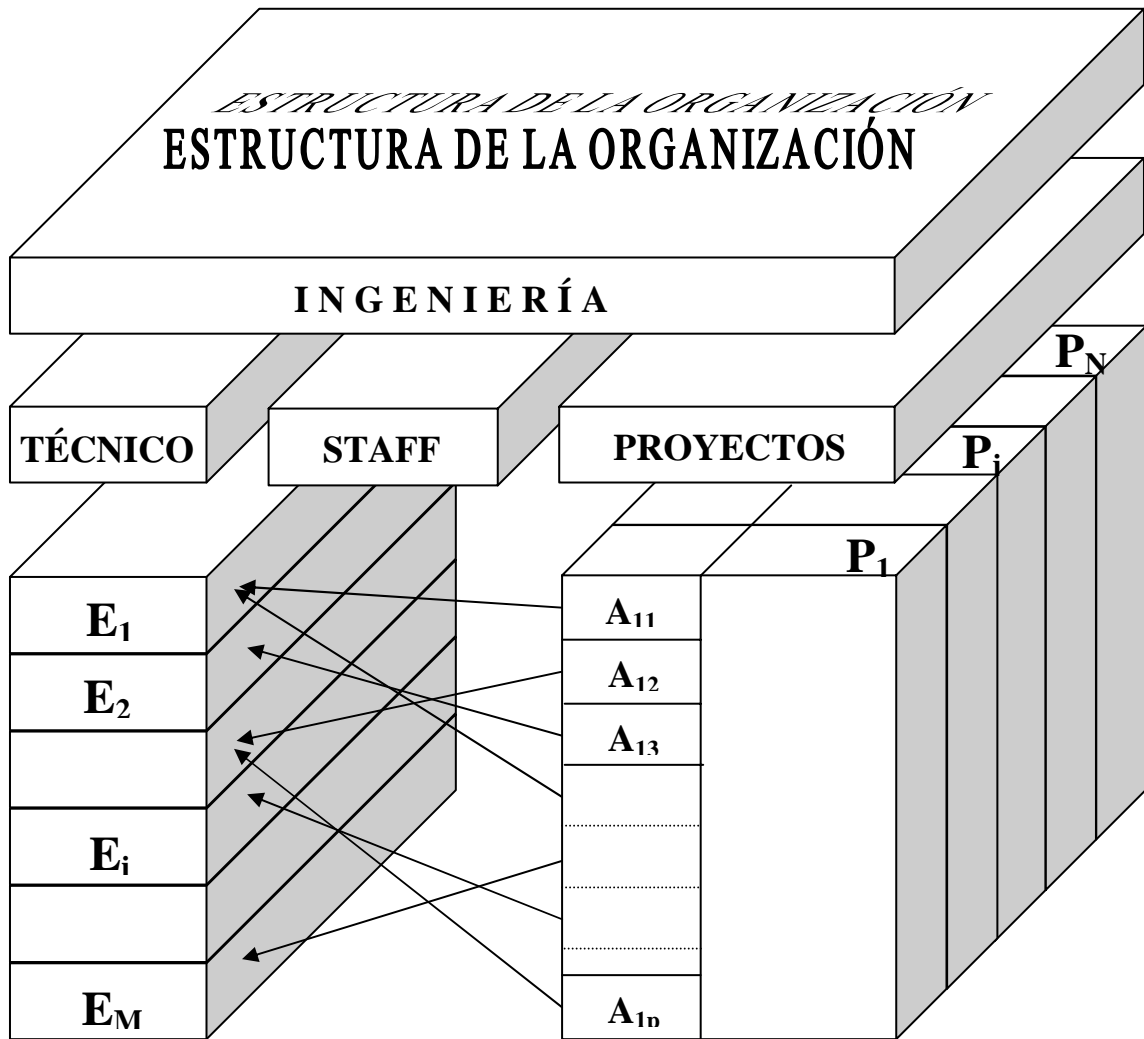


Fig. I.5

Una vez definida una especialidad como integrante de la estructura de la Ingeniería, automáticamente asume determinadas materias que llamaríamos “*materias nucleares*”. El problema es determinar si otras, que denominaremos “*materias fronterizas*”, pertenecen o no a esa especialidad.

A toda materia corresponde una función física en el proyecto. Y a la inversa, cualquier función física definida como integrante de un proyecto, tendrá que ser satisfecha por una materia. Vemos como esta correspondencia es biunívoca.

Todas estas funciones del proyecto están interconectadas, dando origen a una compleja red de relaciones “*inter-materias*”, que fundamentalmente vienen definidas por los procesos físicos determinantes de la *PI*.

Toda materia mantiene al menos dos relaciones (nexos) con otras materias o con el mundo exterior, en cuyo caso, el nexo de unión con otras materias es único. A éstas las llamaremos “*materias periféricas*”, constituyendo la “transición” del proyecto con el mundo exterior.

Diremos que una materia pertenece con toda seguridad a una determinada especialidad, si se relaciona exclusivamente con otras de esa especialidad. Así quedan determinadas las materias nucleares.

Cuando la relación no es exclusiva con materias de una especialidad, sino que intervienen otras especialidades o el mundo exterior, entonces recurrimos al criterio de la “*función principal*”. Este criterio consiste en encajar esa función principal en la especialidad cuya definición acoja mejor dicha función. Estas materias serán las llamadas *fronterizas*, teniendo siempre un nexo con otras de la especialidad a la que pertenecen y otro nexo con materias de otras especialidades o con el mundo exterior. A esta última categoría pertenecen las que hemos llamado “*periféricas*”.

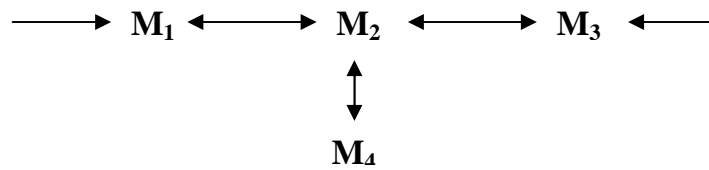
A continuación hacemos un recorrido por los diferentes casos que pueden presentarse:

*CASO 1 (materia nuclear)*



$$\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_3 \in \mathbf{E}_i \Rightarrow \mathbf{M}_2 \in \mathbf{E}_i$$

CASO 2 (materia nuclear)



$$M_1 \in E_i; M_3, M_4 \in E_h \Rightarrow M_2 \in E_h$$

CASO 3 (materia fronteriza)



$$M_1 \in E_i; M_3 \in E_h \Rightarrow M_2 \in E_i \text{ o } M_2 \in E_h \text{ (Criterio de la función principal)}$$

CASO 4 (materia periférica)



$$M_1 \in E_i \Rightarrow M_2 \in E_i \text{ o } M_2 \in E_h \text{ (Criterio de la función principal)}$$

**I.4.2 Un procedimiento para la imputación de costes a los proyectos.**

La estructura matricial representada en la Fig.I-4, muestra “M” filas cuyas cabeceras expresan las distintas especialidades disponibles ( $E_1, E_2, \dots E_i, \dots E_M$ ). Estas especialidades prestarán recursos a los proyectos en desarrollo que son mostrados en “N” columnas ( $P_1, P_2, \dots P_j, \dots P_N$ ), de forma que los elementos de la columna “j” son los recursos solicitados por el proyecto  $P_j$  a las diferentes especialidades. Los referidos recursos son los que, en forma de actividades ejecutadas, aportan “utilidad” al proyecto y constituyen la mayor parte de los costes

imputables al mismo. No obstante, existen otros costes también imputables a aquél que proceden de la estructura común de la Ingeniería. El procedimiento que se describe a continuación apunta una manera de evaluar los recursos reales aplicados a los proyectos, el coste de los mismos será obtenido conociendo los costes unitarios de los diferentes recursos.

La unidad utilizada normalmente para la medición de los recursos es la hora-hombre (*hh*). La Ingeniería dispone de un montante de *hh* para asignar a los proyectos en ejecución, que puede proceder de tres fuentes diferenciadas:

- Recursos totales de las especialidades (*RTE*).
- Recursos propios de la dirección de proyectos (*RD*).
- Recursos comunes de la estructura (*RC*).

De estas fuentes, la de más peso (*RTE*) será tomada como referencia para la distribución de los recursos *RC*, suponiendo que *RD* es claramente asignable a cada proyecto en particular.

Por otra parte, los recursos *RTE* que no sean imputables directamente a proyectos, serán asignados a cada uno de ellos en proporción a los recursos que sí lo son. En este sentido existirá una fracción de *RTE*, que llamaremos “*recursos residuales de las especialidades*” (*RR*).

De este forma, podría establecerse una expresión que recoja las suma de las cuatro componentes mencionadas como los recursos absorbidos por un proyecto. Si este es el proyecto “*j*”, podemos escribir:

$$RP_j = RE_j + RR_j + RC_j + RD_j \quad \text{donde,}$$

$RP_j$  Son los recursos totales absorbidos por  $P_j$ .

$RE_j$  Son los recursos de las especialidades directamente imputables a  $P_j$ .

$RR_j$ : Son los recursos residuales de las especialidades imputables a  $P_j$ .

$RC_j$ : Son los recursos comunes de la Estructura imputables a  $P_j$ .

$RD_j$ : Son los recursos de la Dirección de proyectos imputables a  $P_j$ .

A continuación, analizaremos con más detalle cada uno de los cuatro sumandos de la expresión anterior, para lo que previamente definiremos los términos siguientes:

$r_{ij}$ : Son los recursos que  $P_j$  solicita a la especialidad  $E_i$ .

$RTE_i$ : Son los recursos totales disponibles por  $E_i$ .

**a) Recursos prestados por las especialidades**

Estos recursos son los de mayor peso y los que pueden afectar al éxito de la Planificación.  $P_j$  detraerá del conjunto de las especialidades los recursos  $RE_j$ , que vienen dados por la expresión:

$$RE_j = \sum_{i=1}^M r_{ij} \quad [I.1]$$

Si suponemos que las especialidades no están saturadas, es decir, no son absorbidos sus recursos disponibles por los diferentes proyectos, los recursos totales disponibles por  $E_i$  vendrán dados por la expresión:

$$RTE_i = \sum_{j=1}^N r_{ij} + R_i \quad [I.2]$$

Donde  $R_i$  serán los recursos residuales de  $E_i$ .

Los recursos totales disponibles por todas las especialidades, vendrán dados por la expresión:

$$RTE = \sum_{i=1}^M RTE_i = \sum_{i=1}^M \left( \sum_{j=1}^N r_{ij} + R_i \right) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N r_{ij} + \sum_{i=1}^M R_i \quad [I.3]$$

**b) Imputación de recursos residuales**

El segundo sumando de la expresión [I.3] determina la totalidad de recursos residuales de todas las especialidades. El criterio de reparto de los mismos a los distintos proyectos será el proporcional a los que cada proyecto detrae del conjunto de las especialidades, por tanto la imputación a  $P_j$  será:

$$RR_j = \sum_{i=1}^M R_i \times \frac{\sum_{i=1}^M r_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N r_{ij}} \quad [I.4]$$

**c) Recursos comunes de la Estructura. (Administración, Dirección, etc.)**

Estos recursos corresponden a la superestructura matricial. A falta de mejor criterio de reparto, utilizaremos el de proporcionalidad a los que el proyecto detrae del conjunto de las especialidades, por lo que vendrán dados por la expresión:

$$RC_j = RC \times \frac{\sum_{i=1}^M r_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N r_{ij}} \quad [I.5]$$

**d) Recursos propios de la Estructura. (Director del Proyecto)**

Estos recursos son fijos, estando constituidos por el director o directores de proyectos y ocasionalmente por un equipo de apoyo. En un momento dado, esta figura puede estar al cargo de uno o más proyectos. En el caso de uno solo, todos los recursos serán absorbidos por él y si son varios será establecido un mecanismo de reparto. Si llamamos a los recursos cedidos a  $P_j$  “ $RD_j$ ”, se verificará la igualdad:



$$RD = \sum_{j=1}^N RD_j \quad [I.6]$$

De acuerdo con estas cuatro componentes, podremos expresar los recursos absorbidos por el proyecto  $P_j$ , de la forma:

$$\sum_{i=1}^M r_{ij} + \sum_{i=1}^M R_i \times \frac{\sum_{i=1}^M r_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N r_{ij}} + RC \times \frac{\sum_{i=1}^M r_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N r_{ij}} + RD_j; \quad \text{que simplificando: [I.7]}$$

$$\sum_{i=1}^M r_{ij} \times \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^M R_i + RC}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N r_{ij}}\right) + RD_j = \sum_{i=1}^M r_{ij} \times \left(\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N r_{ij} + \sum_{i=1}^M R_i + RC}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N r_{ij}}\right) + RD_j =$$

$$\sum_{i=1}^M r_{ij} \times \left(\frac{RTE + RC}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N r_{ij}}\right) + RD_j = \frac{\sum_{i=1}^M r_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N r_{ij}} (RTE + RC) + RD_j \quad [I.8]$$

En la expresión última, reaparece el cociente que se ha venido utilizando como coeficiente de proporcionalidad a los recursos que el proyecto “ $j$ ” detrae del conjunto de las especialidades. Si lo denominamos “*coeficiente de acaparamiento*” y lo designamos por  $W_j$ , la expresión de  $RP_j$  queda:

$$RP_j = W_j(RTE + RC) + RD_j$$

Analizando la expresión anterior y teniendo en cuenta que  $RD_j$  es constante<sup>14</sup> y  $(RTE + RC)$  es también constante y conocido, se desprende que  $RP_j$  es una

---

<sup>14</sup> Desde el momento en que se inicia el proyecto, son conocidos los recursos que van a ser asignados al mismo procedentes de la Dirección de Proyectos. Normalmente se mantienen constantes a lo largo del desarrollo del proyecto.

función lineal de  $W_j$ . Por otra parte,  $W_j$  es doblemente dependiente, por un lado de la planificación que se realice con respecto a  $P_j$  y por otro de la que se haya realizado de los demás proyectos en desarrollo en ese momento.

Los recursos totales de la Ingeniería ( $RTE + RD + RC$ ), se distribuyen entre los “ $N$ ” proyectos en ejecución, debiéndose verificar:

$$\sum_{j=1}^N RP_j = RTE + RD + RC, \quad \text{y también:} \quad [I.9]$$

$$\sum_{j=1}^N RP_j = \sum_{j=1}^N [W_j \times (RTE + RC) + RD_j] = (RTE + RC) \times \sum_{j=1}^N W_j + RD \quad [I.10]$$

De donde se desprende, como cabría esperar por su definición que:

$$\sum_{j=1}^N W_j = 1, \quad \text{por tanto se verificará } \forall j: 0 < W_j \leq 1$$

Esta formalización del procedimiento de asignación de los recursos internos, está realizada suponiendo que los recursos ociosos, si existen, son aplicados a los proyectos de forma indirecta.

En la realidad, los defectos de la planificación a veces crean recursos ociosos, pero otras veces también saturación de los mismos, dando lugar a menor calidad del trabajo realizado. En el primer caso deberíamos pensar cómo tratarlos para que no pesen innecesariamente sobre el proyecto. En el segundo caso se debería estudiar la relación entre el “abaratamiento” involuntario del proyecto y la merma ocurrida en su calidad.

## **I.5 EL COMPORTAMIENTO HUMANO: Un factor esencial en la Planificación**

Cuando se realiza la planificación de un proyecto, se utilizan como datos los resultados esperados de la acción de las personas que conforman su equipo. Estas personas son básicamente los procesadores, que ejecutarán las diferentes actividades en que se haya fragmentado el proyecto. Los datos a los que nos referimos surgen de la estimación de los expertos (a veces los mismos procesadores) o del banco de datos de la Organización. Con independencia del origen de los datos, consideramos que, una vez elaborada la planificación es algo objetivo y esperamos que los resultados se acomoden o mejoren lo planificado. Pero los resultados no fluirán con la precisión de la producción de máquinas, sino con la incertidumbre asociada a los procesadores humanos. Existen mecanismos incentivadores que intentan conducir los resultados a lo esperado. El análisis de esos mecanismos (modificadores del comportamiento humano) corresponde a disciplinas ajenas al objeto principal de este trabajo, no obstante, más adelante nos referiremos a ellos con la denominación “*presión sobre el procesador*”, aunque son más conocidos por el nombre global de “*motivación*”.

### **I.5.1 Modificadores del comportamiento desde la perspectiva clásica.**

Las diferentes teorías de la motivación que más repercusión y aplicaciones han tenido dentro del campo de la Organización, pertenecen a dos campos conceptuales distintos, pero en cierta forma complementarios (Giménez, 1993):

- Las primeras teorías sobre la motivación, ligadas a lo emocional, están centradas en las necesidades, siendo Maslow su principal representante.
- El segundo conjunto de teorías motivacionales pertenece al ámbito de la psicología cognitiva. Aquí, los aspectos emocionales pasan a un segundo plano, cobrando relevancia los mecanismos y estrategias de pensamiento que

definen la acción. Las teorías que encajan en este apartado también son conocidas como teorías del “proceso”, siendo su objetivo explicar el proceso mental que sigue el individuo para alcanzar un determinado nivel de esfuerzo, que le conduzca a un resultado satisfactorio<sup>15</sup>.

Dentro de este conjunto de teorías destacan: La Teoría de la Finalidad (Locke), la Teoría de la Equidad (Adams) y la Teoría de las Expectativas (Lawler), que respectivamente se refieren a:

- La motivación aumenta en la medida en que se cumplan las metas esperadas por el procesador.
- La motivación aumenta en la medida en que se verifique el equilibrio entre lo que el procesador cree aportar a la Organización y lo que ésta le devuelve.
- La motivación aumenta en la medida en que se cumplan las expectativas que el procesador tiene sobre sus preferencias y conductas. Cuanto mayor sea la confianza subjetiva en alcanzar determinados niveles de actuación y cuanto mayor sea la probabilidad subjetiva de que esos actos serán seguidos de las consecuencias esperadas, mayor será el nivel de motivación.

### **I.5.2 Modificadores del comportamiento desde nuestra perspectiva.**

En una Ingeniería, como organización pensada para la ejecución de proyectos de *PI*, el agente principal es el procesador. Para que lo ejecutado se ajuste a lo planificado (en cuanto a tiempo principalmente), es necesario corregir oportunamente las trayectorias de los comportamientos que supuestamente seguirán los procesadores. Es por lo que pensamos que el comportamiento humano es un factor esencial en la planificación de proyectos, planteándonos la

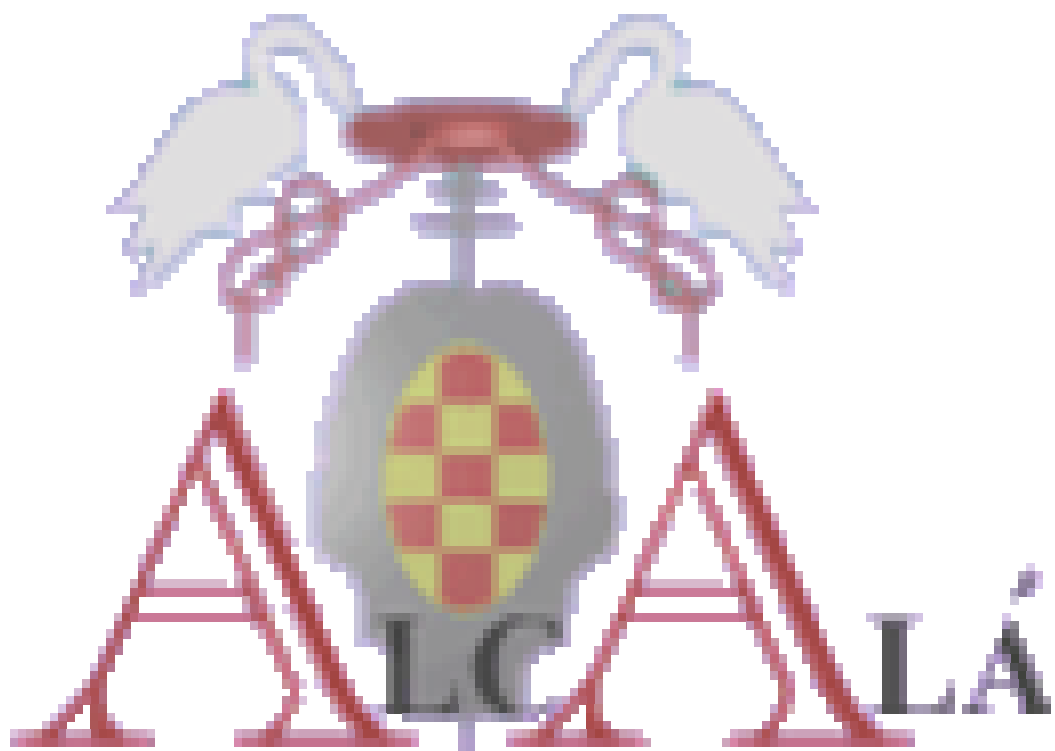
---

<sup>15</sup> Nuestra teoría del Efecto Relajación, aún perteneciendo al campo de la Investigación Operativa de acuerdo con el contexto del presente trabajo, podría encajar en este apartado si atendemos a su componente de pura explicación del comportamiento de un procesador humano.

siguiente pregunta: ¿Es posible predecir las trayectorias de esos comportamientos? Si así fuera, podríamos diseñar mecanismos correctores de esas trayectorias. Los estudiosos del comportamiento humano han demostrado cómo determinadas acciones, conocidas por “incentivos”, son capaces de incrementar la motivación y modificar el comportamiento, produciendo como resultado que aquellas actividades humanas que se derivan de un proceso de razonamiento, sean conducidas por esos incentivos. Entonces, ¿Son los incentivos las fuerzas que “esculpen” las trayectorias de esos comportamientos?

Un incentivo esencial es la existencia de un auténtico “*equipo de proyecto*”. Existe tal equipo cuando se entiende y se asume el grado de participación que cada procesador tiene en el esfuerzo. Y, además, cuando reconociendo la vital importancia de cada aportación (por pequeña que sea), se considera también la magnitud de cada una de ellas y en consecuencia se observa un reconocimiento proporcional a esa magnitud.

Esas expectativas futuras de reconocimiento del grado de participación en un determinado proyecto, creemos que son parte importante de los incentivos para que la aportación personal de cada procesador sea óptima en el sentido de no incidir negativamente en la planificación. La magnitud asignada a cada aportación (actividad) debe estar definida y consensuada desde el momento de realizar la planificación, a modo de reglas del juego o marco que establece las diferentes relaciones de dependencia.



## **CAPÍTULO II**

# **PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS: ORIGEN Y EVOLUCIÓN**

## **II.1 INTRODUCCIÓN**

La investigación llevada a cabo para la sustentación del presente trabajo se ha desarrollado en el terreno de la Planificación de Proyectos (*PP* en lo sucesivo). La exploración realizada ha seguido un camino cronológicamente inverso, fundamentado en el interés por analizar las inquietudes más recientes en este terreno. Una de esas inquietudes centra de forma especial nuestra atención; nos referimos a una de las consecuencias que se derivan de las imprecisiones inherentes a las técnicas y herramientas para la *PP*: El retraso en la terminación de los proyectos. Pero lejos de ser una inquietud reciente, los hilos de la investigación nos muestran que perdura desde los orígenes de esta parte de la Investigación Operativa (*IO* en lo sucesivo) que es la *PP*.

Como ya se menciona en el capítulo introductorio, ha sido el secular retraso en la terminación de los proyectos lo que ha centrado nuestro esfuerzo investigador, intentando encontrar algo concluyente en la literatura especializada. No cabe duda de que esta preocupación permanente seguirá durante mucho tiempo, ya que nuestra contribución, en caso de serlo, no pasaría de ser una modesta componente de ese vector de circunstancias que rodea a la ejecución de cada actividad y por ende, al proyecto.

Hemos observado que muchas de las inquietudes originales perduran en estas fechas, pese al esfuerzo de modelización, diseño de algoritmos, procedimientos de cálculo e incluso pese a la evolución de las aplicaciones informáticas<sup>16</sup> diseñadas como ayuda a la *PP*.

En lo que parece estar de acuerdo la mayoría de los autores es en que los tiempos de las actividades no deben considerarse deterministas, sea cual sea la fuente de los mismos. Este enfoque supone que el tiempo de la actividad es una variable aleatoria (en adelante v.a.), presentando el problema de qué “forma” se le asocia, lo que parece tener menos importancia. Los escasos defensores de los tiempos deterministas abogan por la sencillez en el cálculo y la facilidad para obtener el camino crítico; sin embargo, reconocen la imprecisión del resultado que siempre es inferior al real y en consecuencia (según ellos) origen del retraso del proyecto. Esto, de alguna manera, está reconociendo la validez de la técnica PERT como herramienta para la planificación y la obtención del resultado más importante: Fecha de terminación del proyecto.

Esta disciplina de la *PP* como parte de la *IO*, tiene su origen cuando aparece la técnica PERT (Program Evaluation and Review Technique) como herramienta para el análisis de proyectos y su optimización. Hemos elegido la técnica PERT como foco de nuestra investigación porque sus planteamientos persiguen desde

---

<sup>16</sup> Un análisis comparativo de las aplicaciones informáticas existentes como ayuda a la planificación de proyectos se encuentra en De Wit y Herroelen, 1990.



su origen, no solo la optimización de recursos, sino el cálculo de la incertidumbre de determinados hitos y en particular la fecha de terminación del proyecto.

Como veremos a lo largo del presente capítulo, en una primera fase los esfuerzos se centran principalmente en el tratamiento de los tiempos de las actividades, sin considerar la actividad en sí misma. No obstante, algunos autores se han referido a la actividad y sus diferentes modos de ejecución.

## **II.2 EL ORIGEN DE LAS TÉCNICAS MODERNAS PARA LA PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS**

Los orígenes de las técnicas modernas para la *PP* se localizan hacia mitad del siglo XX cuando aparecen los métodos PERT y CPM (Critical-Path Method) casi simultáneamente. Con anterioridad se hacían planificaciones, pero sin una metodología explícita. Cuando se tienen que acometer grandes proyectos, caracterizados por un gran número de actividades que se desarrollan en un periodo de tiempo importante, cobra relevancia la calidad de las predicciones sobre la duración de esas sucesiones de actividades en el tiempo. Es entonces cuando aparecen incentivos para el desarrollo de métodos que ayuden a la ordenación de las actividades y su programación temporal. Los métodos o técnicas PERT o CPM surgen como herramientas para la *PP* impactando de tal forma que aún hoy son objeto de infinidad de análisis críticos y fuentes de métodos alternativos, en particular la técnica PERT.

### **II.2.1 La técnica PERT**

La técnica PERT surge como resultado de la aplicación de un método para la optimización de un proyecto militar (Malcolm y otros, 1959). La idea inicialmente planteada consistió en la creación de una metodología para la Dirección de Proyectos, que podríamos resumir en los tres objetivos siguientes:

- Reflejar el progreso del proyecto, visionando el cumplimiento de los objetivos.
- Establecer la programación para el cumplimiento de los referidos objetivos.
- Reflejar los efectos derivados de los cambios efectuados en la marcha del proyecto.

Básicamente se trata de llegar a la planificación de un conjunto de actividades que sea óptima desde tres perspectivas:

- Recursos empleados (mano de obra, materiales, métodos de producción, etc.)
- Requerimientos técnicos (de los sistemas, subsistemas y componentes técnicos)
- Tiempo

Si consideramos cada una de esas perspectivas como una macrovariable y definimos un criterio integrador de las mismas en un solo concepto lleno de significado (utilidad), llegaríamos a la configuración de una función de tres variables a la que aplicaríamos los criterios de optimización.

Si sólo tenemos en consideración la variable tiempo, podemos diseñar un gráfico que refleje la secuencia de actividades con expresión de los instantes en que se inician y terminan. El tiempo transcurrido entre el inicio y la terminación de una determinada actividad es el tiempo dado por el “ingeniero competente”<sup>17</sup>.

En el proceso de obtención de las estimaciones se detecta la conveniencia de obtener tres datos para cada actividad, que corresponderían a los tres conceptos de “optimista”, “más probable” y “pesimista”<sup>18</sup> (a, m, b,

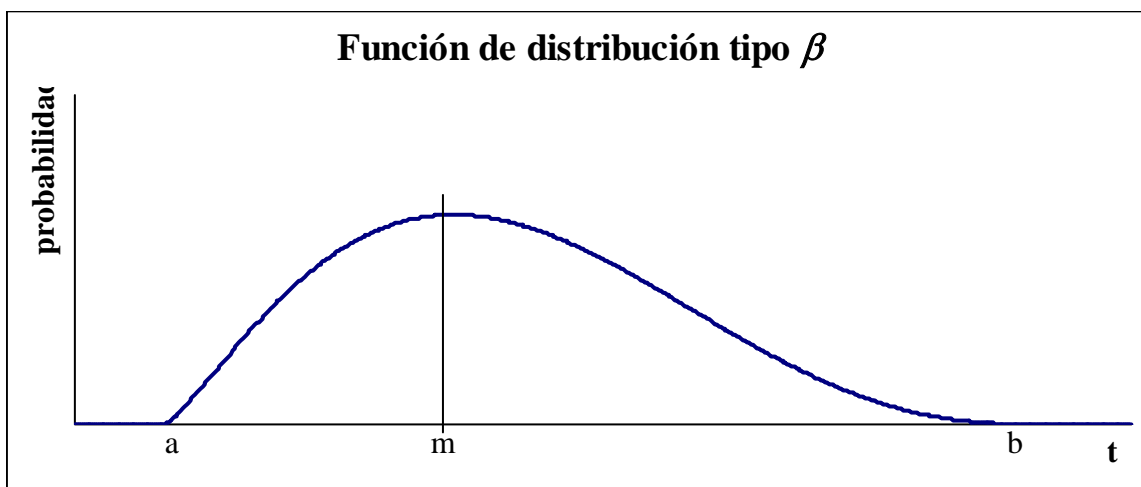
---

<sup>17</sup> Es como Malcolm llama al experto evaluador.

<sup>18</sup> Para la obtención de estos tres datos Malcolm se refiere a determinados criterios a aplicar en el proceso de interrogación a los ingenieros, criterios que hace explícitos.

respectivamente). Se considera oportuno construir con estos tres datos una función de probabilidad que partiría desde “a” (probabilidad cero), pasaría por “m” (probabilidad máxima) y llegaría hasta “b” (probabilidad cero). El resultado se representa en la Fig. II.1.

Esta es la expresión del juicio del experto evaluador, que suele asociarse con la forma de la función de distribución tipo  $\beta$ <sup>19</sup>, que viene dado por la expresión [II.1].



**Fig. II.1**

$$f(t) = k(t - a)^\alpha (b - t)^\gamma \quad [\text{II.1}]$$

donde la media y varianza tienen por expresión, respectivamente:

$$\text{media: } t_e = \frac{a + 4m + b}{6} \quad [\text{II.2}]$$

$$\text{varianza: } \sigma_e^2 = \frac{(b - a)^2}{36} \quad [\text{II.3}]$$

<sup>19</sup> La asociación de la función tipo  $\beta$  al juicio del experto sigue siendo hoy la más defendida.

De las tres variables, es la variable tiempo la que tiene y ha tenido más relevancia desde los orígenes del PERT frente a las otras dos variables, que de alguna manera vienen dadas por el estado de la tecnología en cada momento, evolucionando lentamente en el tiempo<sup>20</sup>.

### II.2.2 Algunas opiniones sobre la técnica PERT

Cuando irrumpe la técnica PERT como herramienta para la planificación, se asume la distribución tipo  $\beta$  (sin justificar por qué esta y no otra distribución)<sup>21</sup> como expresión de los tiempos de las actividades, así como la media y varianza que se dan en las expresiones [II.2] y [II.3] (tampoco se justifica por qué estos valores). El tiempo estimado para cada una de las actividades consiste en una estimación media ( $m$ ) y un rango ( $a$ ,  $b$ ) que obedecen únicamente a consideraciones subjetivas. Así, el valor “ $a$ ” sería el tiempo en que se desarrollará la actividad si todo se conduce de acuerdo con la “buena suerte”, análogamente, el valor “ $b$ ” correspondería al caso en que nada pudo ir peor (Clark, 1962).

#### a) Algunas defensas de la técnica PERT

Numerosos autores han defendido la oportunidad de la distribución tipo  $\beta$ , ya que a pesar de sus imperfecciones es la que mejor representa la asimetría de los tiempos de las actividades. Golenko se refiere a este punto indicando que su sustitución por otras funciones no asimétricas es un error, a pesar de no ser estable respecto a la operación de convolución<sup>22</sup> (Golenko, 1989).

---

<sup>20</sup> Los procesos, procedimientos y tecnología, una vez definidos, tienen pocas posibilidades de modificación con fines de optimización.

<sup>21</sup> Posteriormente otros autores han defendido la conveniencia de emplear otras distribuciones de probabilidad, como por ejemplo la normal (Sculli, 1983), la exponencial (Fisher y otros, 1985) y números difusos (Litoiu y Tadei, 1997).

<sup>22</sup> Una distribución de probabilidad es inestable respecto a la convolución, cuando la suma de dos variables de esa distribución resulta otra distribución de probabilidad diferente.

Cuando aparece la técnica PERT constituye un hito importante en la teoría y práctica de *IO* por varias razones (Elmaghraby, 1989):

- Por primera vez se contempla la “aleatoriedad” en los tiempos de ejecución de las actividades.
- Responde a algunas preguntas que se vienen planteando los directores de proyectos, como: ¿Duración esperada del proyecto?, ¿Probabilidad de terminarlo entre dos fechas dadas?.
- Interesó no sólo a los teóricos de la *PP*, sino también a los prácticos, porque su origen tuvo lugar en la práctica.
- La técnica PERT ha sido la semilla para infinidad de investigaciones posteriores en este campo de la *IO*.

#### **b) Algunas críticas a la técnica PERT**

Cuando al utilizar la técnica PERT se asume que las distribuciones de probabilidad son del tipo  $\beta$ , se están introduciendo tres fuentes de errores (MacCrimmon y Ryavec, 1964):

- La verdadera forma de la distribución de los tiempos de ejecución de una actividad, así como su media y varianza son datos muy probablemente desconocidos. La suposición de que se trata de distribuciones del tipo  $\beta$  introducirá un error de difícil evaluación.
- Si se asume que se trata de distribuciones del tipo  $\beta$  y suponemos que su media y varianza vienen dadas por las expresiones [II.2] y [II.3], estamos introduciendo un error adicional.
- Finalmente, asumamos que se trata de distribuciones del tipo  $\beta$  y que su media y varianza vienen dadas por las expresiones [II.2] y [II.3]. La suposición de que los valores (a, b, m) son conocidos y exactos introducirá otro error de difícil evaluación.

Estos autores (MacCrimmon y Ryavec) establecen un criterio de estimación de los errores que habitualmente se están cometiendo, llegando a la conclusión de que podrían alcanzar valores hasta del 30%, cuando se estima el tiempo total de ejecución del proyecto.

Encontrar las bases teóricas de la técnica PERT es de fundamental importancia para la IO (Grubbs, 1962). Este autor establece ciertas restricciones para que se cumplan las expresiones [II.2] y [II.3], que afecta a los exponentes de la expresión [II.1]:  $\alpha + \gamma = 4$ . En la misma línea están otros autores, como por ejemplo Donaldson (1964), proponiendo métodos alternativos para obtener la varianza conocida la media.

Los valores que se obtienen con las expresiones [II.2] y [II.3] no están exentos de errores, por lo que es conveniente evaluarlos (McBride y McClelland, 1967). Estos autores desarrollan un método para la obtención de soluciones exactas en la ecuación cúbica que expresa la varianza en una distribución del tipo  $\beta$ . Para ello parten de la definición rigurosa de la función de probabilidad tipo  $\beta$  estándar:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \gamma + 2)}{\Gamma(\alpha + 1)\Gamma(\gamma + 1)} t^\alpha (1-t)^\gamma, & \text{para } 0 < t < 1 \\ 0, & \text{para cualquier otro caso} \end{cases} \quad \text{[II.4]}$$

donde  $\alpha > -1$  y  $\gamma > -1$ , siendo:

$$\Gamma(p) = \int_0^\infty v^{p-1} e^{-v} dv \quad \text{[II.5]}$$

Son muchos los autores que han cuestionado las expresiones [II.2] y [II.3], como el caso de Sasieni (1986)<sup>23</sup>, a este autor se refiere Littlefield y Randolph

---

<sup>23</sup> Esta referencia no ha podido ser localizada por nosotros. Suponemos errónea la primera fuente, ya que las sucesivas encontradas son idénticas a la primera.

(1987), al que contesta deduciendo la expresión [II.2], con las asunciones siguientes:

- La forma de la distribución de los tiempos de las actividades en el PERT sigue la ley  $\beta$ .
- La estimación que se realiza de los valores (a, m, b) es aceptada como buena.
- Para la distribución considerada se acepta como valor exacto de la varianza  $1/36$  con rango estándar (0, 1).
- Si consideramos un rango estándar (0, 1), aceptamos que el valor aproximado de la media sea  $(1 + 4m)/6$ .

Poco después Gallagher (1987) presenta otro conjunto de asunciones que permiten estimar el valor de la expresión [II.2]. Estas asunciones difieren de las consideradas por Littlefield y Randolph en que consideran la varianza aproximada y la media exacta, estableciendo la restricción de  $\alpha + \gamma = 4$ .

Hasta ahora la única justificación para aceptar las expresiones [II.2] y [II.3] es puramente empírica. Son muchos los autores que han criticado la falta de una justificación teórica (Farnum y Stanton, 1987). Estos autores consideran las dificultades para la obtención de los valores (a, m, b), en particular el “b” que suele tomarse demasiado grande. Esto hace que el valor “m” esté situado relativamente cerca de la izquierda del intervalo (a, b). Estos autores demuestran que a partir de una determinada relación entre los valores (a, m, b), dejan de tener validez las expresiones [II.2] y [II.3], siendo esta relación:

$$0,13(b - a) \leq m \leq 0,87(b - a) \quad \text{[II.6]}$$

La técnica PERT se caracteriza por realizar (implícitamente) algunas asunciones básicas conocidas como “asunciones clásicas”, a las que hacen

referencia ininidad de autores, en algunos casos con espíritu crítico, como las reflejadas a continuación (Shtub, 1997):

- Las actividades tienen definido claramente donde empiezan y donde terminan. Crítica: La mayoría de los proyectos, especialmente los más complejos, cambian con el tiempo, de forma que una red establecida en la fase preliminar no se parecerá a otra construida a medida que el proyecto avanza.
- La secuencia de actividades está definida y reflejada en una red. Crítica: Existen proyectos en los que el orden de las actividades está condicionado a la evolución de las previas.
- El control principal del proyecto está en la vigilancia del camino crítico. Crítica: No necesariamente el camino más largo va a determinar la duración del proyecto. A veces una determinada actividad, no localizada inicialmente en el camino crítico, es la causa principal del retraso.
- Los tiempos de las actividades siguen una distribución de probabilidad del tipo  $\beta$ , asumiendo que la varianza del tiempo de ejecución del proyecto es la suma de las varianzas de las actividades que conforman el camino crítico. Crítica: Los errores derivados de comparar la media y varianza dadas por las expresiones [II.2] y [II.3] con las reales de una distribución tipo  $\beta$  son del orden del 10%.

La mayoría de los estudiosos sobre la Planificación de Proyectos no se apartan de la línea tradicional, preocupándose de encontrar algoritmos exactos que permitan obtener los tiempos de ejecución del proyecto tratando los tiempos de las actividades como variables aleatorias. Sin embargo, algunos se preguntan abiertamente: “Si tenemos en cuenta que los datos de partida para la definición de la duración de las actividades son normalmente imprecisos, nos preguntamos qué ventaja existe en buscar algoritmos exactos, si su resultado estará basado en los dudosos datos de entrada” (Hagstrom, 1990).



### II.2.3 El método del camino crítico (CPM)

Prácticamente contemporánea con la técnica PERT se desarrolla otra técnica conocida como CPM por Kelley y Walker, esta vez en el entorno industrial a finales del año 1956. Esta técnica surge en el seno del Grupo de Ingeniería de la compañía duPont de Nemours & Co, con el objetivo de crear un procedimiento de seguimiento y control de los proyectos de ingeniería que fuera compatible con las entonces incipientes técnicas de computación<sup>24</sup>. Otro objetivo es que viniera a sustituir las técnicas tradicionalmente empleadas, prácticamente basadas en la intuición y experiencias personales de los planificadores.

La técnica CPM determina el concepto de “diagrama de proyecto” como expresión gráfica de todas las actividades del mismo, donde las referidas actividades son flechas que conectan dos eventos. Este análisis gráfico de un proyecto es una novedad que aporta innumerables ventajas a los planificadores y analistas de la evolución del proyecto (Kelley y Walker, 1959).

Las razones por las que surgen ambas técnicas (PERT y CPM) son similares, sin embargo, difieren en la consideración de los tiempos de las actividades. Para la técnica CPM la naturaleza del proyecto determinará una u otra consideración. En general considera al tiempo de la actividad como variable aleatoria con función de probabilidad conocida; si la varianza es pequeña se considera determinista, en otro caso no determinista. En el caso de la técnica PERT los tiempos de las actividades siempre son considerados v.a.

Con relación al caso determinista, se calculará el intervalo en que cada actividad tiene probabilidad de ser iniciada (fecha más temprana, fecha más tardía). Dicho intervalo dependerá de las relaciones de precedencia en la red y de los tiempos de las actividades anteriores. Se llama tiempo máximo disponible a la

---

<sup>24</sup> En el trabajo de Malcolm aparece también el concepto de camino crítico y la facilidad con que puede alterarse este camino, según cómo se haya considerado a las v.a. que expresan los tiempos de las actividades.

diferencia entre la fecha más tardía para concluir una actividad y la más temprana de su inicio. Cuando una determinada actividad tiene un tiempo de ejecución igual al tiempo máximo disponible, se llamará “actividad crítica”. En todo proyecto existirá al menos un camino que conduzca de principio a fin por actividades críticas: Es el camino crítico del proyecto.

En el caso no determinista los autores reconocen algunas dificultades inherentes a la consideración de los tiempos de las actividades como v.a. Estas son en parte filosóficas y en parte matemáticas. Las dificultades matemáticas son las inherentes al cálculo con funciones estadísticas, ya que el tiempo de cada evento será una v.a. De ahí que algunos autores posteriores hayan contemplado a la técnica CPM asociada siempre al caso determinista. Otros, sin embargo, consideran que son equivalentes en su planteamiento y se refieren a ellas como técnica PERT/CPM<sup>25</sup>.

### II.3 EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO “PERT” EN EL TIEMPO

Desde la aparición de la técnica PERT en 1959 se están sucediendo con mucha rapidez técnicas y desarrollos fundamentados en aquella (Davis, 1973). Davis realizó una incursión a fondo por la literatura existente en esa época, describiendo someramente cada uno de los métodos y variantes de las técnicas PERT/CPM. La mayoría de las técnicas no son más que modificaciones de la técnica PERT en algunos de sus planteamientos, destacando el nuevo enfoque con relación a la disponibilidad de recursos. Es de interés la amplia referencia bibliográfica que abarca un total de 138 artículos. Resalta también la importancia que las aplicaciones informáticas van adquiriendo en este terreno.

---

<sup>25</sup> La impresión que hemos obtenido del análisis de las dos técnicas encaja con la opinión de este grupo de autores. Realmente y según se desprende de las publicaciones originales de ambas técnicas, la técnica CPM fue desarrollada con anterioridad a la técnica PERT (la primera se inició en 1956 y la segunda en 1958), pero fue publicada unos meses después (ambas en 1959).

### II.3.1 Consideración de los recursos disponibles

Cuando las disponibilidades de recursos necesitan ser contrastadas con las demandas, surge el problema de la “asignación de recursos escasos”. Si la demanda supera la disponibilidad en un determinado periodo de tiempo significa la demora en la ejecución de alguna actividad que se traducirá en un retraso en la terminación del proyecto<sup>26</sup>. Esta nueva consideración sobre los recursos en los modelos de redes de Planificación de Proyectos da lugar a una nueva serie de problemas que podrían resumirse en tres apartados:

- Problemas en los que es relevante la relación tiempo/coste: Una actividad puede adelantarse si se ponen a su disposición más recursos. Los recursos adicionales son con frecuencia de mayor coste que los inicialmente previstos, por lo que en cualquier caso la actividad tendrá un coste adicional. Vemos que cada duración correspondería a un coste diferente (bajo la suposición de recursos ilimitados) (Kelley y Walker, 1959).
- Problemas en los que es relevante el nivel de demanda de determinados recursos: Cuando varias actividades compiten por los mismos recursos pudiera interesar “descrestar” el perfil de recursos requerido por una en beneficio de otra, lo que podría afectar a la duración del proyecto (Burgess y Killebrew, 1962).
- Problemas en los que el nivel de recursos es fijo (limitado): Cuando la disponibilidad de recursos no es suficiente para satisfacer la demanda de las actividades concurrentes es necesario decidir sobre la secuencia de actividades mas adecuada para minimizar la duración del proyecto (Christofides y otros, 1987).

Otra gran clasificación realizada de los procedimientos existentes en función de los resultados que producen es:

---

<sup>26</sup> Caso de estar esa actividad en el camino crítico.

- Procedimientos heurísticos: Consistentes en el uso de reglas empíricas para determinar las prioridades en la aplicación de los recursos entre las actividades simultáneas.
- Procedimientos exactos o analíticos: Consistentes en la aplicación de procedimientos analíticos rigurosos o programación matemática para la determinación de las prioridades.

### II.3.2 Consideración de la calidad

Algunos autores han criticado las técnicas para la planificación aseverando que se pierde tiempo en realizar planificaciones y estimaciones que poco contribuyen a la calidad del proyecto. “Los ingenieros deben hacer ingeniería” (Bolte, 1986), el tiempo dedicado a la planificación es inútil porque no sirve para mejorar la productividad y calidad del proyecto y ni siquiera mide el grado de eficiencia con que se desarrolla la ingeniería.

Hasta fechas recientes no se ha tenido en cuenta la calidad como componente del desarrollo de un proyecto (Babu y Suresh, 1996). Estos autores ponen de manifiesto que sólo se han aplicado modelos cuantitativos tiempo-coste para determinar la duración de un proyecto. Proponen un modelo cualitativo donde se tiene en consideración la calidad del proyecto, relacionando las tres variables tiempo-coste-calidad.

Los resultados tradicionales consideran que la anticipación de la terminación de las actividades significa un incremento del coste ¿pero cómo afecta a la calidad esa anticipación? La experiencia demuestra que acortar el tiempo de los proyectos significa mayores costes y simultáneamente menor calidad.

Los autores proponen tres modelos lineales que respectivamente actúan sobre cada una de las variables:

- Minimizando el tiempo de ejecución del proyecto: Los resultados muestran que la anticipación de la terminación del proyecto afecta fuertemente al coste (incrementándolo) y a la calidad (disminuyéndola).
- Minimizando el coste de ejecución del proyecto: La reducción del coste trae consigo un incremento del tiempo de ejecución del proyecto, mientras se adapte a los requerimientos de calidad.
- Maximizando la calidad del proyecto<sup>27</sup>: Considerando que son aceptables los niveles de calidad reconocidos universalmente como medios, observamos que acercarse a ellos implica un crecimiento simultáneo del coste y duración del proyecto.

### II.3.3 Consideración de la relación tiempo-coste en forma discreta

La mayoría de los autores que han considerado la relación tiempo-coste lo han hecho en forma continua (De y otros, 1995). Así lo manifiestan estos autores haciendo un repaso por la literatura existente sobre el tema desde 1970. En contraste, las referencias al caso discreto ha sido escasa e inconexa, quizás debido a la dificultad intrínseca al problema en este caso. Sin embargo, existen buenas razones para pensar en la versión discreta del problema tiempo-coste, al ser lo más común en la práctica y teniendo en cuenta que su “discretización” se presta a la modelización de cualquier relación tiempo-coste.

La versión simple del problema tiempo-coste discreto, es decir, cuando se considera el tiempo y el coste por separado, es fácil de resolver: Para minimizar el tiempo se selecciona por cada actividad la alternativa de menor tiempo y para

---

<sup>27</sup> Estos autores se refieren a la calidad como algo ambiguo al no entrar a definir “nivel de calidad” ni a su cuantificación (por otra parte creemos que bastante difícil).

minimizar el coste la alternativa de menor coste. Algunos autores han contemplado este problema como “multiobjetivo” cuando se plantean simultáneamente tiempo y coste, de forma que el decisor opta por una u otra alternativa guiándose por la intuición experimental y el buen juicio (Deckro y Hebert, 1990).

El problema que se plantea en la realidad suele ser la minimización del coste sujeto a la restricción de la fecha de terminación del proyecto o bien minimizar el tiempo sujeto a la restricción de un coste dado. Ambos casos son difíciles de resolver, debido a que en general son problemas del tipo NP-HARD<sup>28</sup>. En algunos casos particulares como el caso de redes “paralelo puro” o “serie puro” la solución es viable al tratarse de problemas polinomiales o pseudopolinomiales.

Para el caso NP-HARD se propone un método llamado de “descomposición modular” basado en considerar a un módulo de la red<sup>29</sup> como una “superactividad” cuyo conjunto de valores tiempo-coste viene dado por la solución del problema del tipo polinomial. Pero este método entraña dificultades a medida que la red se va complicando.

## **II.4 VOCACIÓN DEL CONCEPTO “PERT” Y SU EVOLUCIÓN POSTERIOR**

El primer tratado sobre la técnica PERT (Malcolm, 1959), contempla un proyecto caracterizado por la incertidumbre que rodea a las actividades (típico en todos los proyectos de I+D). La gran aportación de esta técnica al tratamiento de la planificación dentro de la *IO*, ha sido la forma de tratar el tiempo de ejecución

---

<sup>28</sup> El término NP-HARD se utiliza para aquellos problemas que trata la *IO* del tipo no polinómicos, lo que los hace virtualmente irresolubles (Lewis y Papadimitriou, 1978; Brucker, 1995).

<sup>29</sup> El módulo estaría integrado por un conjunto de actividades del tipo “paralelo puro”, “serie puro” u otras que pueden reducirse a éstas.

de las actividades, por lo que su aplicación a los proyectos de I+D es muy conveniente. Podríamos deducir que inicialmente el equipo de Malcolm buscaba una metodología para poder estimar los tiempos de las actividades de investigación; no en balde las siglas “PERT” se derivaron inicialmente de “*Program Evaluation Research Task*”. La extensión de esta técnica a otros tipos proyectos está justificada cuando la incertidumbre que caracteriza a las actividades es importante. Cuando el grado de definición de las actividades es alto o la intervención de procesadores humanos está limitada, parece excesiva la aplicación de la técnica PERT, dado que vendrá únicamente a complicar de forma desproporcionada el cálculo del tiempo para la ejecución del proyecto. Las ingenierías suelen decir que utilizan esta técnica como herramienta para la planificación. Si así fuera, se estaría abusando de su utilización al aplicarla a todo tipo de proyectos, guiados quizás por su grado de popularidad y no por el grado de conocimiento que los directores de proyecto tienen sobre la misma. Lo que nosotros pensamos es que se utilizan algunos aspectos de la técnica PERT, pero no precisamente el de la estimación de la duración del proyecto considerando a los tiempos de las actividades como v.a. Una prueba de su creciente popularidad se recoge brevemente en los dos párrafos que siguen.

“La técnica PERT nacida para aplicaciones militares va ganando terreno en las aplicaciones industriales, como lo demuestra el rápido crecimiento de compañías que vienen utilizando esta técnica recientemente, estimándose que las aplicaciones industriales ya llegan a ser la tercera parte frente a las dos terceras partes que aún son militares. En este momento se vislumbra la herramienta PERT como una más para la Planificación de Proyectos, pero está en el camino de ser la más importante” (Pocock, 1962).

“En la década de los 70 se acentúa la popularidad de la técnica PERT como clave para la Planificación de Proyectos, generalizándose su utilización y apareciendo infinidad de artículos sobre la misma” (Chacko, 1976).

### II.4.1 Algunos aspectos de la evolución del concepto PERT

Lo realmente innovador de la técnica PERT es la consideración de los tiempos de ejecución de las actividades como variables aleatorias y la referencia a las tres estimaciones para los mismos. En ellas se fundamentará la forma de las distribuciones de probabilidad que expresarán el tiempo de ejecución de cada una de las actividades. También en ellas estará el origen de la complejidad del cálculo para obtener el tiempo de ejecución del proyecto. Esto atraerá a infinidad de autores proponiendo métodos aproximados de cálculo y realizando críticas, sin que por ello merme el interés que los estudiosos de la planificación tienen por esta técnica ni su popularidad. A continuación transcribimos la opinión de algunos autores y alguna referencia somera al método alternativo que proponen.

“La consideración de los tiempos en las redes PERT como v.a. trae consigo enormes dificultades de cálculo” (Clark, 1961). Este autor propone considerar los tiempos de una red PERT como distribuciones de probabilidad del tipo normal, presentando el proceso de cálculo para un conjunto de 5 actividades. El tiempo esperado para la terminación del proyecto es una v.a. que tiene un valor esperado o media ( $T_E$ ) y una varianza ( $V_E$ ). El método recorre todos los caminos posibles en la red PERT, estableciendo las correlaciones y dependencias entre los mismos y realizando el cálculo de los cuatro primeros momentos. Realiza la comparación con otras formas de distribución (en particular la exponencial y uniforme), concluyendo que cualquier otra distribución no normal sólo añadiría complejidad al cálculo, aún teniendo en cuenta que las diferencias observadas en los resultados son relativamente grandes (8%). No obstante, si tenemos en cuenta el ahorro en los costes computacionales, puede resultar aceptable para la mayoría de los casos. Una mejora del algoritmo de Clark, que obtiene mejores acotaciones para el tiempo de ejecución del proyecto, se encuentra en Kamburowski (1985b).

Otros autores han propuesto métodos de cálculo que sin considerar a los tiempos de las actividades como v.a., producen resultados mejores que si se



consideran deterministas. Es el caso de Fulkerson (1962), que analizaremos con más detalle en el capítulo IV.

“Cualquier función de densidad podría aproximarse mediante una polinomial” (Martin, 1965). Esta consideración permitiría acometer el arduo problema de obtención del tiempo de terminación de un proyecto expresado por una red PERT. Este autor propone un método para simplificar el cálculo expresando los tiempos de las actividades como v.a. polinomiales (v.a. cuya función de densidad está formada por segmentos lineales), posteriormente se van reduciendo conjuntos de arcos serie-paralelo a un solo arco, hasta llegar a un simple arco como expresión equivalente de la red PERT de partida. Este método de Martin fue perfeccionado posteriormente por Hagstrom (1990).

Las tres estimaciones (optimista, más probable y pesimista) no reducen el problema de la incertidumbre. “Cuando una función de probabilidad (por ejemplo la tipo  $\beta$ ) se define en base a esos tres valores, el resultado de la distribución no será mejor que los datos originales en que se basa” (Chacko, 1976).

“Las duraciones de las actividades de un proyecto son v.a. continuas e independientes entre sí, con una distribución de probabilidad conocida. El tiempo para la terminación del proyecto será otra v.a. cuya exacta función de distribución será muy difícil de calcular. Esta dificultad es práctica más que conceptual, aumentando rápidamente con el número de actividades, habiendo derivado en muchos estudios y propuestas de aproximación” (Dodin, 1985):

- Procedimientos analíticos de aproximación para la obtención de un valor medio ( $T_E$ ) (Malcolm y otros, 1959; Fulkerson, 1962; Devroye, 1979; Elmaghraby, 1967; por ejemplo).
- Procedimientos analíticos para aproximar una función de distribución (Dodin, 1985; Martin, 1965; por ejemplo).
- Método Montecarlo (Van Slyke, 1963; por ejemplo).

- Procedimientos analíticos de acotación (Kleindorfer, 1971; Shogan, 1977; por ejemplo<sup>30</sup>).

El método propuesto por Dodin encaja en el segundo apartado, consistiendo en reducir la red PERT a un solo arco del que se obtiene la función de distribución buscada (tiempo para la terminación del proyecto). La reducción se efectúa duplicando las actividades que sean necesarias en cada paso, siendo el resultado una cota inferior del que supuestamente se obtendría con el método ortodoxo.

“Los valores asignados a la media y varianza de las distribuciones tipo  $\beta$  que expresan los tiempos de ejecución de las actividades son una aproximación de los valores reales con errores en torno al 10%, además, obtener tres valores para cada actividad es en la práctica muy difícil, dado que ya lo es obtener sólo uno que sea medianamente fiable” (Shtub, 1997).

#### II.4.2 Algunas técnicas variantes de la técnica PERT

Existen algunas técnicas con nombre propio que surgen como variaciones de la técnica PERT, que se caracterizan por incorporar alguna innovación. De la literatura analizada extraemos las siguientes:

- GERT (Graphical Evaluation and Review Technique): Es una técnica debida a Pritsker (1966)<sup>31</sup>, consistente en un procedimiento analítico que combina las disciplinas del análisis gráfico de flujos con la técnica PERT, aplicándose a problemas estocásticos.

---

<sup>30</sup> Estas dos referencias no han sido analizadas por nosotros. Se citan como ejemplos de estos procedimientos a los que se refiere Dodin.

<sup>31</sup> Esta referencia no ha sido analizada por nosotros. Se cita por su potencial interés, siguiendo a Moeller y Digman.

- CAAN (Controlled Alternated Activity Networks): Incluye a las técnicas PERT y GERT, siendo de especial interés para la Planificación de Proyectos de I+D (Golenko y otros, 1996).
- VERT (Ventura Evaluation and Review Technique): Diseñada para el análisis de redes mediante ordenador, que se caracteriza por asociar a cada actividad tres parámetros (tiempo, coste, performance). Para modelar la actividad pueden asociarse hasta trece distribuciones diferentes a cada uno de los parámetros (Moeller y Digman, 1981).
- PETRI NETS es una técnica gráfica y matemática desarrollada como herramienta para la toma de decisiones. La Planificación de Proyectos es una disciplina que se presta fácilmente a la aplicación de esta técnica, ya que, de alguna forma engloba las propiedades de las técnicas GERT y VERT simultáneamente sin perder ninguna ventaja de las tradicionales PERT/CPM. Además introduce nuevas posibilidades en la modelización, como por ejemplo la presencia de anillos que permitan simulaciones de las actividades en situaciones dinámicas y asíncronas (Kumar y Ganesh, 1998).
- PDM (Precedence Diagramming Method) es una técnica que surge para acometer grandes proyectos con ventajas frente a la clásica técnica PERT/CPM. Esta técnica asume una red en la que las actividades están ocupando los nodos (AON) en lugar de los arcos (AOA) típico de la técnica PERT. Las particularidades de esta técnica introducen importantes cambios en el concepto tradicional de camino crítico, debido a las nuevas relaciones de precedencias que se contemplan (Wiest, 1981).

Otras veces se proponen modelos y variantes a la técnica PERT, cada uno caracterizado por la aplicación en concreto o por la tipología a la que pertenece el proyecto. De estos casos se citan algunos ejemplos a continuación:

- Modelo heurístico para la planificación de grandes proyectos, contemplando limitaciones en la disponibilidad de recursos (Wiest, 1967).

- Algoritmo para la minimización de la duración de los proyectos contemplando varios recursos por actividad, con limitación en los recursos disponibles (Davis y Heidorn, 1971).
- Técnica SADT (Structure Analysis and Design Technique), diseñada especialmente para su aplicación al desarrollo de grandes proyectos de software (Ross y Schoman, 1977).
- Modelo DSS (Design Structure System), aplicado a proyectos donde la complejidad requiera minuciosidad en el análisis. Consiste en una matriz que refleja la secuencia y relaciones técnicas entre las diferentes actividades (Steward, 1981a; Steward, 1981b).
- Modelo IDEF (ICAM<sup>32</sup> Definition) caracterizado por la sucesiva descomposición de las actividades en otras cada vez más simples, pero que conservan la estructura de la original. El método va dirigido a las Organizaciones que desarrollan grandes proyectos de ingeniería (Bravoco y Yadav, 1985; Busby y Williams, 1993).
- Método para la maximización del valor actual neto, que se fundamenta en la Programación Dinámica, utilizando condiciones de optimalidad derivadas del cálculo de variaciones (Tavares, 1987).
- Método “Branch and Bound”, consistente en un algoritmo que elige entre caminos alternativos, para resolver los conflictos que aparecen cuando las actividades compiten por recursos limitados (Christofides y otros, 1987).
- Modelo para la organización de actividades, aplicado a los proyectos de desarrollo de productos, se trata de una particularización del modelo DSS (Eppinger y otros, 1994).
- Modelo de aplicación a proyectos de software, con el objetivo de minimizar los tiempos de coordinación del equipo (Koushik y Hookerjee, 1995).
- Modelo para establecer la secuencia óptima de revisiones que minimizará la duración del proyecto. La aplicación está relacionada con la ingeniería de diseño de productos, donde cada vez más se aplica el concepto de “ingeniería concurrente” (Ha y Porteus, 1995).

---

<sup>32</sup> Siglas de “Integrated Computer Aided Manufacturing”.

- Modelo para el establecimiento de la comunicación adecuada entre los miembros del equipo, con el fin de anticipar algunas actividades y acortar el tiempo de ejecución del proyecto (Loch y Terwiesch, 1996).
- Modelo de reducción de la incertidumbre en “ingeniería concurrente”, cuando se recurre al solape de actividades para la reducción del tiempo de ejecución del proyecto (Terwiesch y Loch, 1996).
- Algoritmo “Búsqueda Tabú”, consistente en un procedimiento heurístico para la resolución de problemas de optimización en general, por tanto, aplicable al problema de la Planificación de Proyectos con limitación de recursos (Tsai y Gemmill, 1998)

#### **II.4.3 Algunas observaciones sobre las técnicas informáticas al servicio de la Planificación de Proyectos.**

Desde los orígenes de la *PP* se vienen utilizando ordenadores y el software diseñado al efecto, como herramientas de ayuda a la planificación. A medida que los ordenadores van ganando velocidad de procesamiento es posible implementar nuevos algoritmos más complejos (software), lo que antes era impensable por el tiempo de cómputo exigido. Un estudio detallado de las ventajas de las herramientas más estándares del mercado puede consultarse en De Wit y Herroelen (1990).

Algunos autores han desarrollado algoritmos específicos para la obtención de redes gráficas o para analizar con rapidez la influencia de determinados parámetros o cambios en las relaciones de precedencia sobre los resultados (Fisher y otros, 1985; Demeulemeester y Herroelen, 1992; Demeulemeester y otros, 1993; Demeulemeester, 1994; Agrawal y otros, 1996; entre otros).

De todas formas, las herramientas informáticas están limitadas al cálculo del tiempo global del proyecto, cálculo de costes y determinadas formas de

representación gráfica de las redes de los proyectos. La clave de la fiabilidad en los resultados está en los “inputs” de ese software, que suele ser el conjunto de tiempos de las actividades y el conjunto de relaciones de precedencia.

## II.5 CONCLUSIONES SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS: NUESTRA POSICIÓN

Cuando se considera que una función de distribución expresa el tiempo de ejecución de una actividad como v.a., las posibles fluctuaciones en los tiempos se deberán a elementos absolutamente imprevisibles. Pero si se considera que esas fluctuaciones son debidas a elementos determinados (como por ejemplo: diferentes combinaciones de recursos o diferencias de calidad en los mismos), entonces estamos ante un problema determinista. Este es el enfoque que han considerado muchos autores (por ejemplo: Berman, 1964; Panagiocopulos, 1977; Bartusch y otros, 1986; Leachman y otros, 1990; Boctor, 1993), cuyos planteamientos analizaremos con más profundidad en el capítulo III.

Como hemos visto, existe consenso en situar los orígenes de la Planificación de Proyectos en la aparición de la técnica PERT. También sabemos, según se desprende del significado inicial de las siglas “PERT”, que surge esta técnica como intento de diseñar un mecanismo que sirva para la evaluación de los tiempos necesarios para el desarrollo de actividades de I+D<sup>33</sup>. Como consecuencia, podemos deducir que la distribución tipo  $\beta$ , como expresión de las posibles duraciones de las actividades, se refiere a la naturaleza intrínseca de la actividad y no a la naturaleza del procesador que la ejecuta. Si efectivamente es así, la técnica PERT no resuelve el problema de la incertidumbre asociada al procesador encargado de ejecutar una determinada actividad, por lo que a la distribución tipo  $\beta$  habría que añadir “algo más” si queremos que refleje

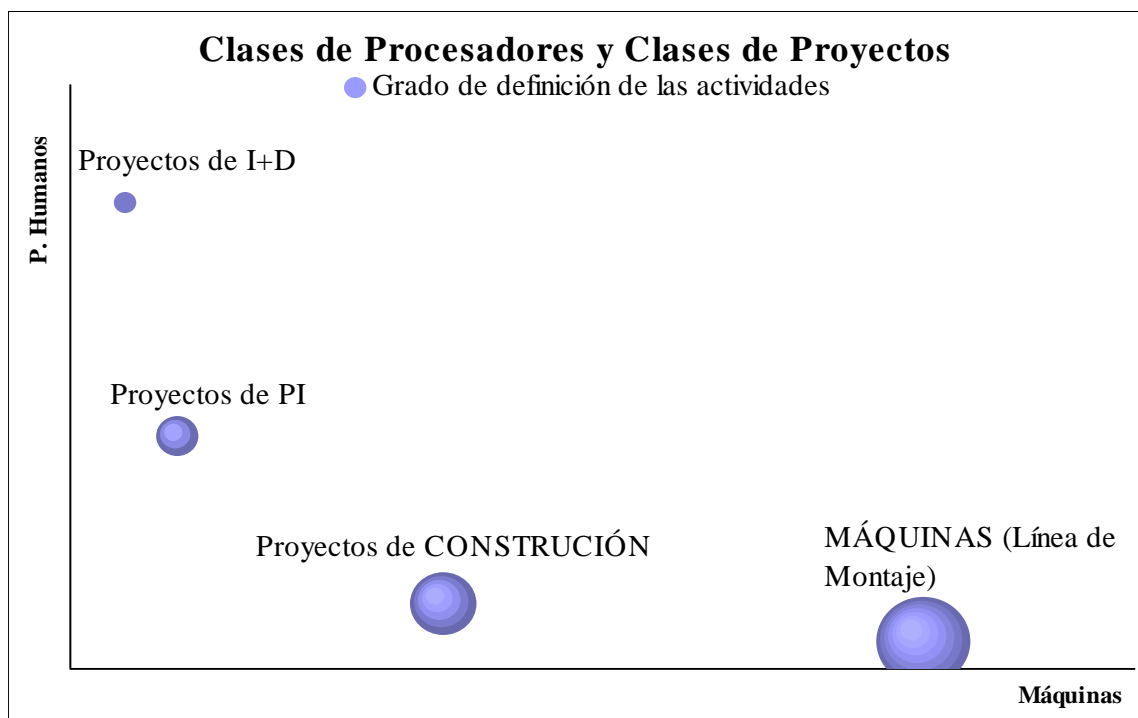
---

<sup>33</sup> Sin embargo, en un estudio publicado en 1983 sobre las técnicas de gestión empleadas en la dirección de proyectos de I+D, se pone de manifiesto cómo en la práctica se aplican técnicas poco rigurosas para el tratamiento de la incertidumbre. En este mismo estudio se hace referencia a que las técnicas PERT/CPM son usadas más selectivamente en los proyectos de desarrollo e ingeniería. (Liberatore y Titus, 1983).

fielmente la realidad. Sin duda, en el desconocimiento que se tenga de la actividad y, por tanto, de la distribución tipo  $\beta$  que la representa, reside parte de la culpa de que con tanta frecuencia aparezca el interrogante: ¿Porqué lo que se observa en la práctica no se ajusta a los resultados de los cálculos?. Nos preguntamos si estará en aquél “algo más” la respuesta a este interrogante o, al menos, parte de ella.

El problema de la “línea de montaje” está asociado a operaciones repetitivas y ordenadas rígidamente, aplicado a un gran número de productos todos iguales, mientras el problema de la planificación (programación) de proyectos es, generalmente, cada vez un problema diferente (Wiest, 1967).

Con estas ideas y otras extraídas del tratamiento que la literatura analizada ha dado a la incertidumbre asociada a la variada tipología de proyectos, construimos el gráfico de la Fig. II-2.



**Fig. II.2**

La extrapolación de la técnica PERT a otro tipo de proyectos sólo contribuye a complicar el proceso de cálculo para obtener el tiempo total del proyecto. La necesidad de simplificar los cálculos ha favorecido la aparición de métodos alternativos a cuya simplicidad se achaca la discordancia con las observaciones reales. Pensamos que a medida que las actividades están más definidas (ver Fig. II.2), debería abandonarse la idea de que sus tiempos son v.a., para acercarnos al extremo en que serían deterministas. En el proceso de ordenación de proyectos por el grado de definición de sus actividades, pasamos por posiciones intermedias que corresponden a los caracterizados por un cambio en la composición de sus procesadores (si la ordenación es de menor a mayor, de procesadores humanos en exclusiva llegamos a casi todas máquinas). Los proyectos de ingeniería de *PI* están en un estadio intermedio entre los de construcción y los de I+D, caracterizándose por una mayor definición en sus actividades (como los de construcción) y porque la práctica totalidad de sus procesadores son humanos (como los de I+D). Entonces, ¿hacemos bien en considerar a estos proyectos como si fueran de I+D en cuanto a la definición de sus actividades? Nuestra respuesta es no. El grado de concreción intermedia de las actividades de los proyectos de *PI* los haría candidatos al empleo de tiempos deterministas<sup>34</sup>, siempre que las actividades estén bien definidas y consideremos que las discrepancias con los resultados reales se deben a otro grupo de factores.

### II.5.1 Etapas de un proceso de planificación

Atendiendo a nuestra definición de planificación, que a título recordatorio transcribimos:

*“Proceso de investigación, asignación, análisis y programación de las actividades y los recursos necesarios, que se materializan en un plan concreto de acción, para la consecución futura de determinados objetivos”.*

---

<sup>34</sup> En la práctica real se hace así, debido principalmente a las dificultades en la aplicación de la técnica PERT de forma ortodoxa. Lo que ocurre es que las actividades dejan mucho que desear en cuanto a su definición.



Detectamos cuatro etapas, a las que ahora nos referiremos brevemente por su interés en todo el desarrollo posterior del trabajo:

- *Investigación:* Al enfrentarnos a una planificación, lo primero será investigar el proyecto en cuestión, identificando y nombrando las actividades que será necesario ejecutar para su materialización. También podríamos llamar a esta etapa “identificación del conjunto de actividades”.
- *Asignación:* Una vez identificado el conjunto de actividades, será necesario asignarlas a los diferentes procesadores que intervendrán en ese proyecto. También podríamos llamar a esta etapa “creación de la matriz actividades-recursos”.
- *Análisis:* Una vez conocida la matriz actividades-recursos, se analiza con detenimiento el binomio actividad-procesador, siendo el principal resultado la obtención del tiempo asociado a cada una de las actividades. También podríamos llamar a esta etapa “métrica de las actividades”.
- *Programación:* Consiste en el establecimiento de la secuencia óptima para la ejecución de las actividades y, posteriormente, el cálculo del tiempo de ejecución o duración del proyecto. Esta etapa culmina con el establecimiento del “plan” de trabajo para el desarrollo del mismo.

Aunque estamos enfocando el proceso de planificación como un todo, cada una de las etapas se caracteriza por su especialidad. Así, la primera etapa (Investigación) está caracterizada por la necesidad de conocer técnicamente el proyecto, con el fin de realizar su fragmentación en actividades con la mayor coherencia.

Para la segunda etapa (Asignación), aparte de los fundamentos técnicos necesarios para comprender el alcance de cada actividad, se precisan dotes organizativas y de conocimiento de los recursos disponibles. Es una etapa donde se efectúa la clasificación de las actividades, encuadrándolas en especialidades.

La tercera etapa (Análisis) se caracteriza por la necesidad de conocer la eficacia de los recursos asignados a cada actividad, la entidad de la misma y el entorno en que va a desarrollarse. Normalmente es la etapa en que interviene el “experto” (conocedor del binomio actividad-procesador), con el fin de asignar a cada actividad su tiempo de ejecución (el parámetro más importante para el cálculo de la duración del proyecto). Una hipótesis fundamental del presente trabajo es la consideración de que el resultado de esta etapa es el adecuado, es decir, se está suponiendo que dicho resultado corresponde a una cierta “normalidad” en el desarrollo de la actividad. La literatura tradicionalmente ha dado poca importancia a esta etapa<sup>35</sup>, que es donde el experto efectúa su estimación de la forma más objetiva posible; para ello es fundamental el conocimiento de la actividad. Este proceso de evaluación de los tiempos de ejecución de las actividades está falto de herramientas que ayuden al experto a emitir un juicio más objetivo, por lo que se mantienen abiertas ciertas líneas de investigación que conduzcan a nuevas metodologías para la métrica de las actividades.

La cuarta etapa, ya ajena a los aspectos técnicos del proyecto, adquiere relevancia sólo cuando es posible adaptar el orden de las actividades a las restricciones impuestas por la limitación de los recursos, minimizando su duración. Como veremos más adelante, esta posibilidad está muy limitada en los proyectos de  $PI$ <sup>36</sup>, por lo que esta etapa queda especializada en el cálculo del tiempo de duración del proyecto (estimación) y en la materialización de la planificación en documentos que servirán para su posterior seguimiento y control.

---

<sup>35</sup> En algún caso hace mención la literatura a este problema, como por ejemplo: “La calidad y garantía de una planificación depende fuertemente del sistema empleado para la estimación de los tiempos de las actividades. Pocas investigaciones se han realizado sobre métodos fiables para estimar esos tiempos” (Hershauer y Nabielsky, 1972).

<sup>36</sup> La secuencia de actividades viene muy marcada por las relaciones de precedencia técnica.

## II.5.2 Nuestra visión evolutiva de la Planificación de Proyectos

La Planificación de Proyectos, como disciplina de la *IO*, ha ido evolucionando y especializándose, atendiendo a su objetivo fundamental. Nuestra impresión de esa evolución, recibida de la bibliografía analizada, la reflejamos brevemente a continuación en tres etapas. Esta simple expresión de la evolución (pasado-presente-futuro) nos permite detectar la dirección en que se mueve esta disciplina y encontrar nuestra posición en ella con suficiente aproximación.

### a) Fundamentos pasados (clásicos) de la Planificación de Proyectos

Desde la aparición de la técnica PERT como herramienta útil a la Planificación de Proyectos y durante las tres décadas siguientes se han venido considerando ciertos fundamentos conocidos como “suposiciones clásicas” (Demeulemeester y Herroelen, 1996), siendo las más relevantes:

- Una actividad no puede comenzarse hasta que sus predecesoras han concluido. (Relaciones de precedencia estrictas).
- Una actividad que está en proceso de ejecución no puede ser interrumpida. (No se admite el establecimiento de prioridades).

Estas son las restricciones típicas del flujo de la información “serie” que forman parte del planteamiento de los diferentes métodos de optimización, dirigidos a la obtención del tiempo de ejecución del proyecto o del coste del mismo.

### b) Fundamentos presentes de la Planificación de Proyectos

Actualmente se observa una clara evolución de las concepciones clásicas en la dirección de fragmentar la actividad, con el fin de sustituir la secuencia o flujo de la información “serie” por una secuencia “paralelo-serie”. Es el concepto de “Ingeniería simultánea o en paralelo”<sup>37</sup>, del que se viene hablando desde hace

---

<sup>37</sup> Traducción del término anglosajón “Concurrent Engineering”.

algo más de una década (Stinson, 1990) y que consiste en permitir el trabajo casi en paralelo de procesadores, que tradicionalmente lo harían en serie. Es fácil deducir que esta nueva concepción permitirá reducir los tiempos de desarrollo de los proyectos<sup>38</sup>, siempre que la disponibilidad de recursos lo permita. El desarrollo de las actividades (tradicionalmente consecutivas o en serie) en paralelo implica el establecimiento de canales de comunicación “verticales” entre diferentes procesadores que van a consumir recursos. Evidentemente estamos ante un problema de optimización, habida cuenta que habrá que evaluar el ahorro producido en la fecha de terminación del proyecto y los nuevos recursos consumidos (Ha y Porteus, 1995; Loch y Terwiesch, 1996). Por otra parte, estamos ante un cambio en la concepción de la actividad, que requiere establecer fragmentaciones o “hitos” intermedios que representen avances parciales y de los que se derive información útil para la actividad dependiente. En esta línea está nuestro “Modelo Orgánico del Proyecto” (ver capítulo I), que permite la fragmentación de la actividad en partículas, que hemos llamado “actos”.

### c) **Fundamentos para el futuro de la Planificación de Proyectos**

El concepto de Ingeniería simultánea evoluciona hacia el de “Ingeniería simultánea global”. El matiz diferencial se apoya en la tendencia de las herramientas informáticas al servicio de la Ingeniería. El nuevo concepto futuro es el límite a que tiende el concepto presente, cuando la fragmentación de la actividad tiende a infinito. Esta tendencia teórica está limitada por la ausencia de continuidad de la función que expresa el desarrollo de la actividad (función escalera creciente), siendo cada escalón la mínima cuantificación del progreso de la actividad, es decir, el avance menor de la actividad en cuestión que es capaz de aportar utilidad a la actividad dependiente. Esta concepción cuántica de la actividad, cuya partícula elemental llamaremos “dato”, será posible cuando toda la información del proyecto, sea cual sea su procedencia, esté disponible para cualquier procesador en una base de datos debidamente estructurada. De esta

---

<sup>38</sup> En un entorno cada vez más competitivo, en el que la vida de los productos se está acortando, es necesario reducir los tiempos de diseño (Luh y otros, 1999).

forma el mínimo avance de una actividad estará dispuesto, en tiempo real, como “input” de la actividad dependiente. Una descripción parecida puede encontrarse en Kerzner (1989).



## **CAPÍTULO III**

### **PLANTEAMIENTO TEÓRICO**

#### **III.1 INTRODUCCIÓN**

En este capítulo centraremos el objeto del presente trabajo dentro del amplio campo de la *IO* y definiremos los conceptos necesarios para cimentar el desarrollo teórico que iniciaremos a continuación.

En particular, analizaremos los diferentes enfoques existentes sobre las formas de ejecutar una actividad, donde enraizaremos el nuestro que será el fundamento para la formalización del planteamiento. Construiremos los modelos para la actividad, definiremos sus objetivos y describiremos el mecanismo de cuantificación del efecto relajación. También construiremos los modelos del proyecto, estableciendo el soporte teórico para la estimación de los retrasos y la obtención de la constante de la Organización.

### III.2 EL OBJETO DEL PRESENTE TRABAJO DENTRO DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA.

Dentro de la *IO* existe un campo que se caracteriza por una gran diversidad de tipos de problemas. Todos estos problemas, que giran en torno al “Scheduling”<sup>39</sup> (Fig. III-1), han sido recientemente muy estudiados. Así lo demuestra la existencia de un foro de discusión europeo, integrado por los investigadores más relevantes en esta materia a escala mundial. En este foro, conocido como “EURO Working Group on Project Management and Scheduling”, se plantean y discuten todos los temas de este campo de la *IO*, tanto los relativos a la Programación de Máquinas (Machine Scheduling) como los relativos a la Programación de Proyectos (Project Scheduling)<sup>40</sup>, (Herroelen y Demeulemeester, 1996).

La mayoría de los autores consideran a los dos conjuntos de problemas con las similitudes suficientes como para enmarcarlos en un sólo campo de la *IO*. Este campo nosotros lo entenderemos dividido en dos subcampos más específicos, a los que nos referiremos como “Programación de Máquinas” y “Planificación de Proyectos” respectivamente. Nótese cómo para el segundo subcampo utilizamos el término “Planificación” en lugar de “Programación”.

A la Programación de Proyectos, en el sentido que determina la traducción del término anglosajón “Project Scheduling”, la encuadramos dentro de la Planificación de Proyectos (término más amplio), que además de la Programación abarcaría la Investigación, Asignación y Análisis del Proyecto, conceptos expuestos en el capítulo II.

Una diferencia fundamental entre la Programación de Máquinas y la

---

<sup>39</sup> En el contexto del presente trabajo, traduciremos el término anglosajón “Scheduling” como “Programación”.

<sup>40</sup> Los términos “Machine Scheduling” y “Project Scheduling” son de los autores citados.



Programación de Proyectos, es el comportamiento del Procesador. Para la primera los procesadores son constantes en su comportamiento. Para la segunda los procesadores son todo lo contrario, como corresponde a procesadores humanos. Por lo demás, las dos disciplinas comparten la mayor parte del cuerpo de la teoría. En este sentido, parece que se ha abusado de la similitud entre ellas, como se aprecia en algunos trabajos analizados (Graham, 1978).

También es conveniente resaltar las diferencias debidas a la tipología de proyectos según las características de los procesadores. Nos podemos encontrar, desde el proyecto cuyos procesadores todos son máquinas, hasta aquel en que todos son procesadores humanos (ingenieros, proyectistas, etc.), pasando por toda una extensa gama de combinaciones entre los dos tipos. Posiblemente sea difícil encontrar proyectos que encajen en el primer extremo (todos los procesadores máquinas), pero sí es común el proyecto del segundo extremo. Dentro de esta categoría encontramos los proyectos de ingeniería, de desarrollo de software, de estudios de viabilidad, de auditoría, etc. En particular, dentro de los proyectos de ingeniería encuadramos los Proyectos de Plantas Industriales, a los que nos referimos en el presente trabajo (Fig. III.1).

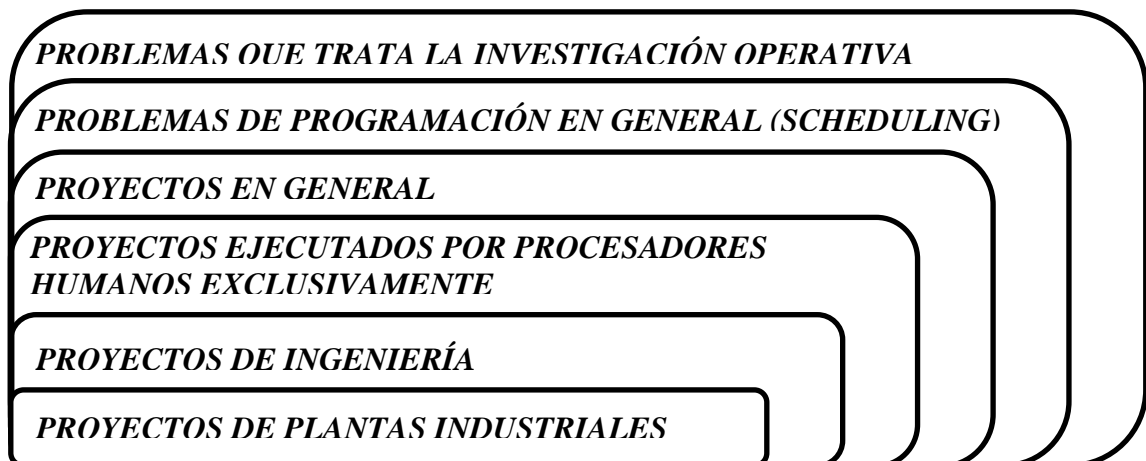


Fig. III.1

### III.3 ALGUNAS PECULIARIDADES DE LA PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS DE PLANTAS INDUSTRIALES

#### III.3.1 Consideraciones generales

Cuando se realiza la planificación de un proyecto, se fragmenta en un conjunto de actividades  $\{A_1, A_2, \dots, A_N\}$  que obedecen a una secuencia fundamentada en un conjunto de relaciones de precedencia<sup>41</sup>. Tal secuencia es característica de cada proyecto en particular, aunque guardan gran similitud en proyectos de una misma familia. A cada actividad se le asocia un tiempo de ejecución. El conjunto de actividades se asigna<sup>42</sup> al equipo del proyecto. Todo esto nos conducirá a la obtención del valor estimado para el tiempo de desarrollo del proyecto. (No entraremos ahora a considerar el método de obtención de los tiempos de ejecución de las actividades, sólo indicaremos que esa ejecución obedece a una forma estándar).

En las Ingenierías, los procesadores encargados de la ejecución de las actividades, pertenecen a las especialidades que prestan recursos a los proyectos. El director del proyecto es el responsable de la gestión y control de los recursos aplicados y en particular de dirigir el equipo del proyecto, conformado por los procesadores.

En el capítulo I ya fueron definidos los conceptos de Ingeniería, Proyecto, Planta Industrial y Actividad. Aquí conviene recordar sucintamente esos conceptos, con el fin de sustentar las sucesivas definiciones e hipótesis planteadas:

---

<sup>41</sup> El concepto de precedencia en una red PERT fue introducido por Kelley y Walker (1959).

<sup>42</sup> El resultado de tal asignación es una aplicación sobreyectiva.

- *Planta Industrial (PI)*: Conjunto de máquinas e instalaciones que transforman determinadas materias primas (inputs) en productos acabados (outputs).
- *Ingeniería*: Organización dedicada al desarrollo de proyectos de plantas industriales. Normalmente está dotada de una estructura matricial<sup>43</sup> formada por Directores de Proyecto y Especialidades. Determina el entorno en el que interaccionan los procesadores.
- *Proyecto de una PI*: Conjuntos de actividades de ingeniería que conducen al diseño, especificación y contratación de los diferentes elementos físicos, sus interconexiones y auxiliares necesarios para la construcción de una Planta Industrial.
- *Actividad*: Conjunto de operaciones y trabajos dirigidos a completar algo útil en el contexto de un proyecto. Dichas operaciones son ejecutadas por una persona (procesador)<sup>44</sup>, con un conjunto manejable de medios (herramientas y/o procedimientos), en un determinado entorno.

### III.3.2 Algunas definiciones

A continuación introduciremos algunos términos y conceptos exclusivos, que serán utilizados en el desarrollo del presente trabajo.

#### **Definición de “modo de ejecución estándar”:**

*Es aquel que presupone, en cuanto a los medios, la utilización de herramientas y/o procedimientos conocidos; y en cuanto al procesador, una actitud que implica niveles de destreza y presteza considerados normales. Al modo de ejecución estándar le asignamos un tiempo estimado o “tiempo de ejecución”.*

---

<sup>43</sup> Es la estructura de organización más adecuada para el desarrollo de los proyectos (Jones y otros, 1994).

<sup>44</sup> Cuando decimos que una actividad es ejecutada por sólo un procesador, no se trata de imponer una restricción. Simplemente suponemos que el proyecto se ha fragmentado de forma adecuada para que esto sea posible.

**Definición de “utilidad de un proyecto de una planta industrial”:**

*Es cierta capacidad intrínseca al proyecto para satisfacer su transformación en Planta Industrial (mediante el proceso de construcción). Esto sería equivalente a considerar que esa utilidad reside en la expectativa de un beneficio futuro (a veces evitar una penalización)<sup>45</sup>.*

**Observación:** Hemos empleado el término “utilidad” por considerarlo el más intuitivo para transmitir nuestro concepto de esa “cierta capacidad intrínseca”. No debe confundirse con el concepto de “utilidad” dentro de la Ciencia Económica.

En el proceso de fragmentación del proyecto en actividades, que tiene lugar dentro de la planificación, se transmite esa “capacidad” a cada una de ellas. Nuestra definición lleva implícita la consideración del proyecto como un todo, en el sentido de que si no se concluye, su utilidad es nula; bastando para ello que no se concluya una actividad.

**Definición de “utilidad de una actividad”:**

*Es la aportación que esa actividad realiza al proyecto y que significará cierto incremento de la utilidad acumulada por el mismo. Convendremos en que la unidad para medir la utilidad sea la hora-hombre (hh)<sup>46</sup>, y su valor la medida del tiempo de ejecución de la actividad correspondiente al modo estándar.*

**Observación:** Consideraremos que la utilidad de la actividad es consecuencia de esa capacidad heredada del proyecto en el proceso de fragmentación del mismo. Por lo tanto, no dependerá de ninguna otra circunstancia. Como concepto invariante en el contexto de cada proyecto le podemos asignar como valor el tiempo estimado para su ejecución.

De esta forma y a medida que se van concluyendo actividades, el proyecto va acumulando utilidad.

---

<sup>45</sup> El enlace establecido entre nuestro concepto de utilidad y una expectativa económica es puramente cualitativo.

<sup>46</sup> Se propone esta unidad por referirse a algo inherente a la actividad, que puede medirse y que siempre aplicaremos en el contexto de un proyecto. Actividades pertenecientes a diferentes proyectos estarán afectadas de diferentes factores de escala y, en principio, las consideraremos no comparables.

Proponemos este concepto de utilidad aportada al proyecto como algo nuevo, en el sentido de utilidad ligada a la actividad en sí misma y no a la cantidad de recurso empleado en su ejecución. En efecto, sólo si la actividad fue ejecutada en su forma estándar, la medida de la utilidad aportada coincide con la cantidad del recurso empleado. Pero cuando en la ejecución de una actividad se ha empleado más cantidad del recurso (*hh*) que el estándar, no se está alterando la utilidad aportada al proyecto, sin embargo, sí se está retrasando dicha aportación<sup>47</sup>.

Cada procesador es un recurso renovable que aporta utilidad al proyecto. Dicha utilidad crece en la medida en que se van completando<sup>48</sup> las diferentes actividades en que se fragmentó el proyecto (consideramos que si una actividad no se completa, no hay aportación de utilidad al proyecto).

### III.3.3 Consideraciones relativas al tiempo de ejecución de las actividades

Las actividades típicas de un proyecto de ingeniería se caracterizan por una gran incertidumbre asociada a su tiempo de ejecución o “tiempo de la actividad” (en adelante TA). Esa incertidumbre se debe a que son trabajos que requieren la aportación de experiencia, conocimientos e imaginación, al manejar infinidad de variables relacionadas entre sí (factores intrínsecos a la propia actividad). Esto hace difícil la coincidencia de los TA en la repetición de actividades ya ejecutadas en el pasado, debido a que, aun siendo teóricamente idénticas, se desarrollarán en otro contexto espacial, ambiental o relacional. De ahí que el recurso a la historia anterior de la Organización, como fuente de información para

---

<sup>47</sup> Estamos suponiendo que no se están aplicando “refuerzos” al desarrollo de esa actividad (ver nuestra definición de actividad dada anteriormente).

<sup>48</sup> Esta consideración corresponde a planteamientos tradicionales de la Planificación de Proyectos, en el sentido de que sólo se inicia una actividad cuando se han concluido las precedentes. La realidad muestra que los métodos y herramientas modernos para el desarrollo de proyectos, permiten el solapamiento de actividades (Dodin y Eliman, 1997). De esta forma, la aportación de utilidad al proyecto se realiza cada vez de manera más continua.

valorar los TA, siendo lo más fiable, no resulte de total garantía. Por estas razones (principalmente) se suele recurrir al experto (ingeniero con experiencia en ese tipo de actividades) como fuente para la obtención de los TA.

La mayoría de los autores que han estudiado estos temas han considerado a los TA variables aleatorias (v.a.), al tomarlos como datos en el cálculo del tiempo necesario para el desarrollo del proyecto o “tiempo del proyecto” (en adelante TP). Esa consideración hace que el referido cálculo sea bastante complejo (Fulkerson, 1962)<sup>49</sup> al contemplar el proyecto como una red PERT (de naturaleza estocástica). Cuando se sustituyen las v.a. por su valor medio el problema se torna determinista (correspondería a procesadores que actúan como máquinas), reduciéndose notablemente la complejidad.

Otra consideración a realizar se refiere a la programación de las actividades. Los proyectos, como redes que son, se caracterizan por determinadas relaciones de precedencia entre las actividades que los componen. Estas relaciones vienen dadas por la tecnología, que resulta determinante para la definición de la secuencia de actividades. Pocas actividades quedan flotantes<sup>50</sup> y, en consecuencia, susceptibles de encajar en el tiempo para obtener un resultado óptimo en la planificación. Éste es otro factor diferencial entre la Programación de Proyectos y la Programación de Máquinas, por lo que el concepto de “scheduling” resulta poco relevante para los proyectos.

---

<sup>49</sup> Existen infinidad de referencias, siendo esta la más antigua de las encontradas.

<sup>50</sup> Nos referimos a las “actividades hamaca”. Traducción del término anglosajón “hammock activities” (Harhalakis, 1990).

### III.3.4 Una observación frecuente: El retraso en la terminación de los proyectos

Existe abundante bibliografía donde se manifiesta esta observación. En unos casos, haciendo referencia explícita al retraso de los proyectos y en otros planteando técnicas y modelos que sirvan para la obtención de un TP que se ajuste más a las observaciones reales. En el capítulo siguiente analizaremos con más detalle parte de esa bibliografía.

La mayoría de los autores ponen el énfasis en la necesidad de encontrar las funciones de distribución de probabilidad (f.d.p.) que mejor expresen los TA como v.a. En cualquier caso el resultado final será la obtención de un TP, que vendrá impregnado de las variaciones estadísticas propias de las f.d.p. elegidas. Muchos autores (Klingel, 1966; Kamburowski, 1985a; Tavares, 1994; entre otros) han puesto de manifiesto la fuerte asimetría en los resultados, en el sentido de que casi siempre los tiempos reales superan a los calculados. Esos mismos autores suelen proponer métodos alternativos para la evaluación del TP, obteniendo a veces mejoras<sup>51</sup> en los resultados, pero persistiendo la clara tendencia a tiempos calculados menores que los mostrados por la realidad. Otro grupo de autores asocian los retrasos a los frecuentes cambios en las bases de diseño del proyecto y a su trámite de aprobación (Williams y otros, 1995).

También este autor ha observado en su práctica profesional cómo los proyectos casi siempre se terminan después de la fecha estimada (al margen de si la planificación realizada es o no correcta). Esta impresión, que como se ha reflejado en el párrafo anterior ha sido observada y puesta de manifiesto por otros autores desde que se realizan planificaciones, me ha movido a buscar una explicación nueva a algo tan común. Como veremos más adelante, se intenta desarrollar una teoría a la que he llamado “Teoría del Efecto Relajación”, que trata de explicar una de las causas del retraso en la terminación de los proyectos.

---

<sup>51</sup> Los autores clásicos consideran una mejora la obtención, como estimación del TP, de un resultado mayor que la primera alternativa.

### III.3.5 Consideraciones relativas al tiempo de ejecución del proyecto

Al TP le daremos dos acepciones. La primera, conocida al realizar la planificación, se referirá al tiempo estimado para el desarrollo del proyecto ( $T_E$ ). La segunda, conocida cuando el proyecto se ha concluido, se referirá a la duración real que tuvo su desarrollo ( $T_R$ ). Como se ha mencionado anteriormente, la experiencia viene demostrando que normalmente  $T_R > T_E$ .

#### **Definición de “demora del proyecto” (DP):**

*Es la diferencia entre el tiempo de ejecución real ( $T_R$ ) y el estimado ( $T_E$ ), es decir:  $DP = T_R - T_E$ .*

Utilizando el semieje positivo de tiempos ( $t$ ) como expresión de todos los instantes (tanto estimados como reales) del desarrollo del proyecto, el origen ( $t = 0$ ) corresponde a la fecha de su inicio, el punto ( $t = T_R$ ) representa la fecha de terminación del proyecto y el punto ( $t = T_E$ ) representa la fecha en que supuestamente debió concluirse. Cuando la planificación se ha realizado con detalle, a cada actividad le corresponde un momento de inicio, que si lo expresamos por “ $t$ ” deberá cumplir:  $0 \leq t < T_E$ . La realidad irá precisando los diferentes instantes de inicio de cada actividad, cumpliéndose en este caso:  $0 \leq t < T_R$ .

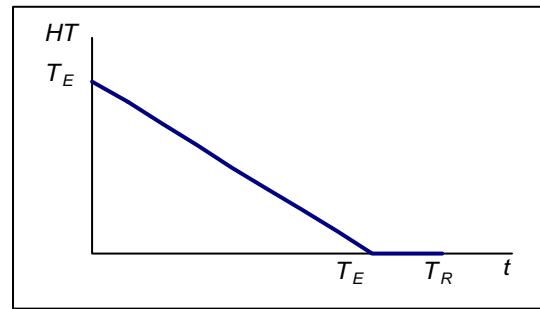
#### **Definición de “horizonte temporal” (HT):**

*Es la diferencia entre la fecha determinada por  $T_E$  y el momento ( $t$ ) en que realmente se inicia esa actividad, es decir:  $HT = T_E - t$ . Cuando estemos en tiempo de demora, (momento de inicio de la actividad comprendido entre  $T_E$  y  $T_R$ ), convendremos que  $HT = 0$ . De forma más precisa:*

$$HT = \begin{cases} T_E - t, & \text{si } 0 \leq t < T_E \\ 0, & \text{si } T_E \leq t < T_R \end{cases} \quad \text{[III.1]}$$



El  $HT$  expresa la percepción del procesador sobre el tiempo que aún falta para la terminación teórica del proyecto. Esa percepción será la expresión de la importancia relativa que un supuesto retraso en la actividad que va a iniciar, vaya a tener en el también supuesto



**Fig. III.2**

retraso del proyecto. Parece evidente que desde el punto de vista del procesador, cuanto más lejana esté la fecha de la terminación teórica del proyecto, menos probable es que un retraso en la terminación del mismo sea claramente imputable al retraso en su actividad.

### III.4 FORMAS DE EJECUTAR UNA ACTIVIDAD

Algunos autores han admitido diferentes formas o modos de ejecutar una actividad, que conducirán en cada caso a un diferente tiempo de ejecución. Cada modo supone una diferente combinación de recursos. A continuación hacemos un breve recorrido por los diferentes planteamientos, que resumimos en tres apartados.

#### III.4.1 Planteamientos clásicos

Dentro de este apartado, contemplamos las opiniones de aquellos autores (Talbot, 1982; Babu y Suresh, 1996; Patterson y otros, 1989; Speranza y Vercellis, 1993; Vercellis, 1994; Boctor, 1996; entre otros) que sustentan los diferentes modos de ejecución de las actividades en los dos conceptos siguientes:

- En las diferentes combinaciones de recursos puestos a su disposición.
- En las diferentes combinaciones de coste y calidad.

Estos autores consideran la existencia de múltiples modos de ejecutar una actividad. La realización de una planificación óptima conlleva la elección del modo más adecuado para cada actividad. En cualquier caso, se haya contemplado un modo o múltiples modos, cuando se inicia una actividad está especificado en qué forma se ejecutará. (Así lo contemplan la mayoría de los modelos propuestos en el terreno de la planificación).

### III.4.2 Planteamiento de Leachman

La discreta flexibilidad mostrada por los modelos que admiten diferentes formas de ejecutar una actividad (planteamientos clásicos), no es considerada suficiente por Leachman, que propone un modelo más flexible aplicable a muchas actividades.

El planteamiento de Leachman consiste en suponer continuamente divisibles los recursos que requiere una determinada actividad, de forma que el tiempo de ejecución de esa actividad sea una función continua de la “intensidad” con que se apliquen los recursos (Hackman y Leachman, 1989; Leachman y otros, 1990). De esta forma se está admitiendo la posibilidad de ejecutar una actividad en infinitos modos, y aún más, una vez iniciada la actividad es posible cambiar de modo, adaptándose a las necesidades del proyecto y/o a la disponibilidad de recursos.

Leachman admite la existencia de un “modo normal”<sup>52</sup> de ejecución de la actividad, para el que existe una determinada combinación de recursos a la que corresponde un determinado tiempo de ejecución (este tiempo de ejecución sería el que Babu ha denominado “tiempo normal”). La intensidad que corresponde a cada uno de los recursos es de valor unidad. Una vez iniciada la actividad, modulando la intensidad de los recursos obtendremos el tiempo más adecuado

---

<sup>52</sup> De aquí nos hemos inspirado para nuestro concepto de “forma estándar” de ejecutar una actividad, dado anteriormente.

para la terminación de la misma. Este autor propone el establecimiento de ciertos límites a la variabilidad de la intensidad (Leachman, 1983). En el capítulo siguiente analizaremos con más detalle su propuesta (ver IV.3.1).

### III.4.3 Nuestro planteamiento

En el caso que estamos contemplando también admitimos diversos modos de ejecutar una actividad. En cualquier modo la utilidad aportada al proyecto es la misma, habiendo sido evaluada y cuantificada a priori (TA). Pero al considerar que es un sólo recurso el que contribuye a su ejecución, esos diferentes modos podrán diferenciarse únicamente en algunos de los tres aspectos que menciona nuestra definición de actividad:

- Características del procesador
- Conjunto de herramientas y/o procedimientos
- Entorno en que interacciona el procesador

El primer aspecto es muy complejo. De hecho no hemos encontrado referencias que intenten cuantificar las cualidades de los procesadores. En este sentido, prácticamente toda la bibliografía consultada considera al procesador como si fuera una máquina. El tratamiento de las hipótesis de cómo contribuyen las cualidades de un determinado procesador a configurar diferentes formas de ejecutar una determinada actividad, debe ser una tarea difícil que seguramente abre posibilidades a nuevas líneas de investigación.

El segundo aspecto se refiere a enfoques puramente objetivos, que sin duda van a incidir en el modo de ejecutar la actividad. No obstante, supondremos que el “conjunto de herramientas y/o procedimientos” es el óptimo para la Organización en ese momento.

El tercer aspecto depende de la Organización. La configuración del puesto de trabajo de cada procesador, su sistema de relaciones, motivación, ambiente de trabajo (físico y psíquico), etc., son matices del entorno en que interacciona el procesador. Sin duda, dado un determinado entorno, la forma de esa interacción también depende del primer aspecto (características del procesador). Así lo contemplamos en el presente trabajo cuando nos referimos a las dos componentes del entorno en que interacciona el procesador: Organización y procesador, para las que también utilizaremos el término “*binomio Organización-procesador*”.

Nuestro planteamiento sobre los modos de ejecutar una actividad se fundamenta en ese tercer aspecto de la actividad. De las dos componentes mencionadas y con el fin de reducir complejidad, consideraremos a la Organización como la más relevante. Así, estamos suponiendo que los efectos que se deriven del entorno en el que interacciona el procesador, dependerán principalmente de la Organización. O lo que es lo mismo, el parámetro para determinar el modo de ejecutar la actividad (en el sentido en que aquí lo estamos considerando) depende de factores organizativos<sup>53</sup>.

Utilizando la terminología de Leachman, a ese parámetro lo llamaremos “*intensidad de la actividad*”. A cada intensidad representativa de un modo de ejecución de la actividad, le corresponderá un tiempo de ejecución. Suponemos que es factible establecer una relación funcional entre la intensidad y el tiempo de una actividad, independientemente de que la función intensidad-tiempo resultante sea o no continua en el intervalo de tiempo en que se ejecuta la actividad. Al referirnos a la “*intensidad de la actividad*”, lo haremos a su valor medio en ese intervalo.

---

<sup>53</sup> Es evidente que la realidad se muestra mucho más compleja. Esta simplificación no tiene la intención de considerar a la Organización como la única parte culpable de los retrasos de los proyectos.

### **III.4.3.1 Modo de ejecución estándar de una actividad**

La definición de “modo de ejecución estándar” (ver III.3.2), fue introducida anteriormente para referirnos a ella en otras definiciones. Este concepto considera dados los dos primeros aspectos (“Características del procesador”; “Conjunto de herramientas y/o procedimientos”) de la definición de actividad, a los que nos referimos anteriormente. El tercer aspecto de dicha definición (“Entorno en que interacciona el procesador”) lo hemos considerado sólo de manera implícita en la definición de “modo de ejecución estándar”, precisamente porque será la variable que determine otros modos de ejecutar una actividad diferentes al estándar.

Independientemente de la “forma” de la función intensidad-tiempo en el intervalo de ejecución de la actividad, haremos corresponder al modo de ejecución estándar un valor medio unidad.

### **III.4.3.2 Otros modos de ejecución de una actividad**

Cuando el entorno (Organización) en el que un determinado procesador desarrolla su actividad, actúe modificando el valor medio (unidad) de la intensidad de la misma, diremos que dicha actividad se ha ejecutado en un modo diferente al estándar.

Al considerar la función intensidad-tiempo en el intervalo en que se ejecuta una actividad, admitiremos que, una vez iniciada la misma, pueda modificarse continuamente su modo (variando su intensidad instantánea). Cuando la intensidad crece diremos que se acelera la actividad y, a la inversa, cuando decrece diremos que se relaja. No obstante, y como ya hemos dicho, lo relevante a efectos de valoración del tiempo de ejecución de la actividad será el valor medio de su intensidad.

### III.5 FORMALIZACIÓN DE NUESTRO PLANTEAMIENTO

En el contexto de un proyecto, a cada actividad le corresponde un instante “ $t$ ” para su inicio. Este instante es el origen del desarrollo temporal de la actividad (Fig. III.3). Con el fin de distinguir el “tiempo” del proyecto del “tiempo” de la actividad, utilizaremos la notación “ $w$ ” para este último. En particular llamaremos “ $w_e$ ” al tiempo previamente estimado para su ejecución<sup>54</sup> (su cuantificación en  $hh$  coincidirá con el valor de la utilidad aportada por la actividad en cuestión). Una vez concluida la actividad conoceremos su tiempo real de ejecución, al que denominaremos “ $w_r$ ”. En la formalización de nuestro planteamiento se estará suponiendo que tanto  $w_e$  como  $w_r$  son insignificantes frente a  $T_E$ , de ahí que para los efectos de la evolución de la actividad es como si se hubiera “congelado” la escala de tiempos del proyecto (“ $t$ ”).

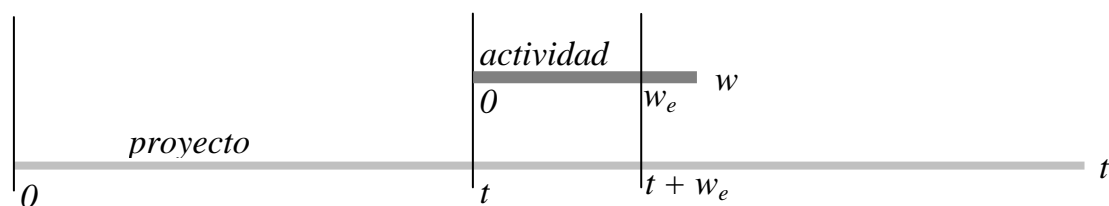


Fig. III.3

#### III.5.1 Intensidad media de una actividad y modos de ejecución

##### Definición de “intensidad media de una actividad” ( $z_t$ ):

*Dada una actividad cuyo inicio está localizado en el instante “ $t$ ” del proyecto, definimos su intensidad media como la relación entre el tiempo estimado para su ejecución ( $w_e$ ) y el tiempo que realmente se ha empleado en ejecutarla ( $w_r$ ), es decir<sup>55</sup>:*

<sup>54</sup> Hasta este momento nos estábamos refiriendo a este concepto como “TA” (tiempo estimado para la actividad).

<sup>55</sup> Nótese que, de acuerdo con esta definición, todas las actividades iniciadas en “ $t$ ” lo harán con la misma “ $z_t$ ”.

$$z_t = \frac{w_e}{w_r} \quad \text{[III.2]}$$

El concepto de intensidad media que estamos empleando es una magnitud adimensional, que representa en realidad una medida de la eficiencia del procesador (recurso empleado). Eficiencia entendida como tanto por uno de recurso efectivo<sup>56</sup>. Como ya se ha mencionado anteriormente, cada valor de intensidad media expresa un modo de ejecución de la actividad.

Cuando una actividad se ha ejecutado en el tiempo  $w_e$ , decimos que ha sido ejecutada en modo estándar (definido en III.3.2), correspondiéndole una intensidad media de valor unidad ( $z_t = 1$ ). Si por el contrario, se ha ejecutado en un tiempo diferente a  $w_e$  distinguiremos dos casos:

**a) Modo relajado:** Si una actividad se ejecuta en un tiempo  $w_r > w_e$  (cantidad de recurso empleada mayor que la estimada), la intensidad media de esa actividad será  $z_t < 1$ . En este caso decimos que el recurso se ha relajado. Definiendo la magnitud de esa relajación como el valor relativo del incremento de recurso empleado, es decir:

$$\frac{w_r - w_e}{w_r} = \frac{w_r}{w_r} - \frac{w_e}{w_r} = 1 - z_t > 0 \quad \text{[III.3]}$$

El resultado de la expresión [III.3] ( $1 - z_t$ ), puede interpretarse como “tanto por uno de recurso perdido o no efectivo”.

**b) Modo acelerado:** Si una actividad se ejecuta en un tiempo  $w_r < w_e$  (cantidad de recurso empleada menor que la estimada), la intensidad media de esa actividad será  $z_t > 1$ . En este caso decimos que el recurso se ha acelerado. De forma similar al caso “a” escribimos la expresión [III.4], que

<sup>56</sup> Entendemos por recurso efectivo aquel que se transforma íntegramente en utilidad aportada al proyecto.

sólo difiere en el signo del resultado, por lo que en lugar de referirnos al término “aceleración” podríamos hacerlo al término “relajación negativa”<sup>57</sup>. También podríamos definir la magnitud de esa aceleración como el valor relativo del decremento de recurso empleado, en cuyo caso el término “aceleración” se tornaría positivo.

$$\frac{w_r - w_e}{w_r} = \frac{w_r}{w_r} - \frac{w_e}{w_r} = 1 - z_t < 0 \quad \text{[III.4]}$$

### **Definición de “función de modos de ejecución de una actividad”:**

*Es el lugar geométrico de las combinaciones<sup>58</sup> tiempo  $\times$  intensidad, caracterizados por aportar al proyecto una utilidad constante. La expresión de dicha función viene dada por:*

$$w_e = z \times w = \text{utilidad constante (hh)} \quad \text{[III.5]}$$

En la expresión [III.5] la variable “ $z$ ” representa un valor (medio) de la intensidad de la actividad comprendido entre dos valores extremos (también medios), que denominamos  $z_M$  (valor de máxima aceleración) y  $z_m$  (valor de máxima relajación). Llamaremos “banda de variabilidad de la intensidad media” al valor  $(z_M - z_m)$ . La variable “ $w$ ” representa el tiempo de ejecución que corresponde a cada valor de  $z$ .

En la Fig. III.4 exponemos un ejemplo de esta función, donde la escala del eje de tiempos “se ha ajustado” para un tiempo de ejecución estimado  $w_e = 5$  (utilidad de valor  $5hh$ ). Hacemos notar que al referirnos a la intensidad ( $z$ ), lo hacemos a valores medios en el intervalo de ejecución de la actividad, aunque hemos prescindido del subíndice “ $t$ ”. En dicha función destacamos cuatro puntos significativos:

<sup>57</sup> Otorgamos el signo positivo al “modo relajado” por ser el que se presenta con más frecuencia en la práctica.

<sup>58</sup> Cada una de estas combinaciones es un “modo” de ejecutar la actividad.



- *Modo estándar:*  $z = 1$  y  $w = w_e$ . La utilidad aportada al proyecto, de valor 5, es la superficie del rectángulo formado por los ejes, la ordenada  $z = 1$  y la abscisa  $w = 5$ , coincidiendo con un tiempo de ejecución  $w_e = 5$ .
- *Modo relajado:*  $z = z_r = 0,8$  y  $w = w_r$ . El valor de  $w_r > w_e$ , es el que corresponde al tiempo real de ejecución de la actividad:  $w_r = 5/0,8 = 6,25hh$ .
- *Modo correspondiente a la máxima relajación:*  $z_m = 0,7$  y  $w = w_{rr}$ . El valor de  $z_m$  adoptado para la máxima relajación es arbitrario. El valor de  $w_{rr} > w_e$ , es el que corresponde al tiempo real de ejecución de la actividad en este extremo ( $z_m$ ):  $w_{rr} = 5/0,7 = 7,14hh$ .
- *Modo correspondiente a la máxima aceleración (o máxima relajación negativa):*  $z_M = 1,3$  y  $w = w_{ra}$ . El valor de  $z_M$  adoptado para la máxima aceleración es arbitrario, igual que en el caso anterior. El valor de  $w_{ra} < w_e$ , es el que corresponde al tiempo real de ejecución de la actividad en este extremo ( $z_M$ ):  $w_{ra} = 5/1,3 = 3,85hh$

**Observación:** Bajo nuestras hipótesis siempre se ha de cumplir  $w_{ra} \leq w_r \leq w_{rr}$ . Los valores de  $w_r$  estarán distribuidos en el entorno de  $w_e$  de forma asimétrica como se aprecia en la Fig. III.4 ( $w_{rr} - w_e > w_e - w_{ra}$ ) que también podría ser expresado de la forma:

$$\frac{w_{rr} - w_e}{w_e - w_{ra}} = \frac{z_M}{z_m} > 1 \quad \text{[III.6]}$$

Así, podríamos suponer que los tiempos de ejecución real de la actividad ( $w_r$ ) siguen las reglas de una distribución asimétrica (como por ejemplo la distribución tipo  $\beta$  clásica), donde  $w_{rr}$  sería el “tiempo pesimista” y  $w_{ra}$  el “tiempo optimista”<sup>59</sup>.

<sup>59</sup> Esta observación es del profesor Francisco Moreno Verdulla.

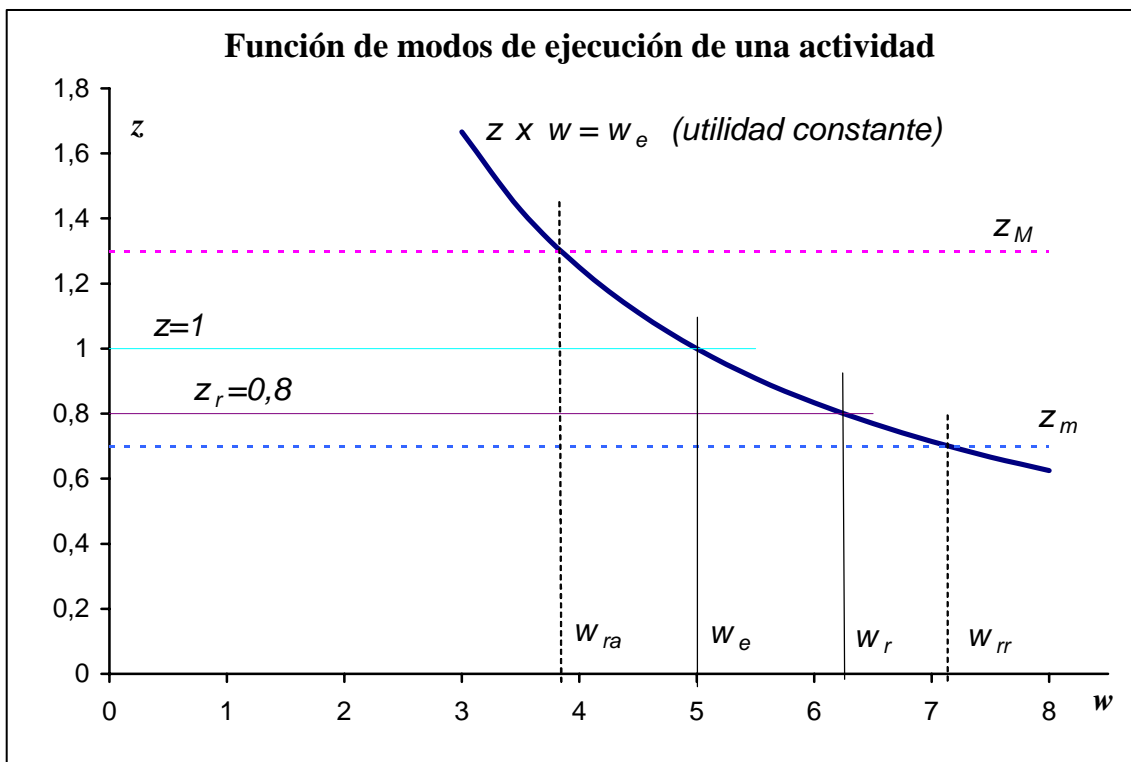


Fig. III.4

### III.5.2 El efecto relajación

**Definición de “efecto relajación” (ER):**

*Es aquella componente de la actitud<sup>60</sup> del procesador que se deriva de su interacción con el entorno y que se manifiesta con una reducción de la intensidad media con la que ejecutó su actividad.*

Consideramos al ER como una de las principales causas de los retrasos de los proyectos. Los planteamientos que iremos realizando durante el desarrollo del presente trabajo, irán enfocados a su aislamiento de otras posibles causas, con el fin de cuantificarlo desde la observación de los retrasos reales de los referidos proyectos.

<sup>60</sup> Suponemos que esa actitud no es premeditada ni consciente.

El *ER* afectará a la intensidad con que se desarrolla cualquier actividad en el seno de una determinada Organización. Por hipótesis supondremos que esa afectación no es idéntica para todas las actividades, sino dependiente de dos variables:

- Binomio Organización-procesador
- Horizonte Temporal de la Actividad

Con la primera variable (como ya hemos anticipado en el punto III.4.3) nos referimos al resultado de la interacción del procesador con su entorno, que depende de aspectos personales, profesionales y organizativos (variables: procesador, proyecto, Organización). Por simplificación supondremos que esta variable depende únicamente de la Organización, por lo tanto será contemplada como constante en el seno de cada Organización.

Con la segunda, nos referimos a la percepción que tiene el procesador sobre la fecha de terminación del proyecto en el momento de iniciar su actividad. A la forma en que se manifiesta el *ER* sobre cada una de las actividades le daremos el nombre de “*Factor de Relajación*”, en cuya definición (que viene a continuación) se ponen de manifiesto las dos variables mencionadas.

### III.5.3 Factor de relajación

#### **Definición de “factor de relajación” ( $k_t$ ):**

*Es la cuantificación del ER en el instante del inicio de una determinada actividad (instante "t"), cuyo valor es directamente proporcional a HT:*

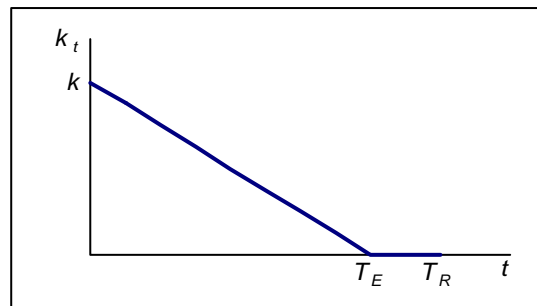
$$k_t = \frac{k}{T_E} HT \quad \text{[III.7]}$$

La constante de proporcionalidad elegida ( $k/T_E$ ), es específica de cada proyecto en el seno de una Organización dada. La constante  $k$ , que será definida posteriormente, es una magnitud adimensional al igual que  $k_t$ .

Si en la expresión [III.7], sustituimos el valor  $HT$  por la expresión dada en [III.1], obtenemos:

$$k_t = \begin{cases} \frac{k}{T_E}(T_E - t), & \text{si } 0 \leq t < T_E \\ 0, & \text{si } T_E \leq t < T_R \end{cases} \quad \text{[III.8]}$$

Cuando existe  $ER$ , diremos que las actividades del proyecto se ejecutan en “modo relajado”. A cada actividad corresponde un momento de inicio “ $t$ ”, que llevará asociado un valor “ $k_t$ ”<sup>61</sup> (Fig. III.5) de acuerdo con la expresión [III.8]. De igual forma, a cada actividad corresponderá un valor para la “magnitud de la relajación” de acuerdo con la expresión [III.3]. Si asumimos que el factor de relajación ( $k_t$ ) es otra forma de cuantificar la relajación ( $1 - z_t$ ), podemos igualar ambos conceptos, obteniendo:



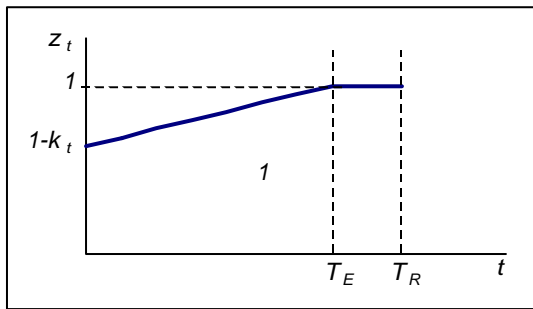
**Fig. III.5**

$$k_t = 1 - z_t, \text{ de donde: } z_t = 1 - k_t, \text{ o también: } k_t + z_t = 1 \quad \text{[III.9]}$$

La expresión [III.9] relaciona la intensidad media ( $z_t$ ) que corresponderá a la actividad que se inicia en el instante  $t$ , con el factor de relajación ( $k_t$ ). Esto concuerda con lo esperado de la definición de  $HT$  (ver III.2.5), es decir, que a las actividades iniciadas en tiempo de demora ( $k_t = 0$ ) les corresponda una intensidad

<sup>61</sup> Con esto estamos asumiendo que el factor de relajación se mantiene constante durante el desarrollo de la actividad. Es como si una vez iniciada la actividad se “congelase” la escala de tiempos del proyecto.

unidad, o lo que es lo mismo, serán ejecutadas en su forma estándar (Fig. III.6).



**Fig. III.6**

### **Definición de “constante de la Organización” ( $k$ ):**

*Es el valor del factor de relajación que afecta por igual a cualquier proyecto, de esa Organización, en el momento de su inicio (factor de relajación inicial).*

Si una determinada Organización dedicada al desarrollo de proyectos observa retrasos en sus terminaciones, y considera que la metodología aplicada para la planificación es correcta, es porque en su seno se dan determinadas circunstancias que son origen de los retrasos observados. La valoración de esas circunstancias es la constante  $k$ . Pero el valor de  $k$  sólo puede conocerse a través de  $k_t$ , que es el factor que afectará a cada una de las actividades en particular, manifestándose con retraso en su terminación. Ese retraso se trasladará al proyecto, produciéndole un efecto que dependerá del instante “ $t$ ”. El efecto global sobre la demora del proyecto dependerá de la cantidad de actividades en curso en ese momento. En consecuencia, se aprecia una posible relación entre las demoras de los proyectos y el valor de  $k$ , pero esa dependencia se manifestará desigualmente para cada proyecto, según sea la cadencia de recursos aplicados (es lo que más adelante llamaremos “perfil del proyecto”). Posteriormente, en el contexto del proyecto, será propuesto un método para la obtención de la constante  $k$ .

En efecto, si hacemos  $t = 0$  en la expresión [III.8], tendremos:  $k_0 = k$ , que es lo que hemos llamado “factor de relajación inicial”. Supondremos que  $k$

afecta por igual a todos los proyectos desarrollados en el seno de esa Organización, por eso la asumiremos como “constante de la Organización”<sup>62</sup>.

### **Definición de “presión sobre el procesador” ( $\alpha$ ):**

*Es aquella llamada permanente a la destreza del procesador, realizada por la Organización (en particular por el director del proyecto), con el fin de que acelere la actividad en curso. Se trata de una componente de interacción del binomio Organización-procesador, orientada a la compensación del ER.*

## **III.6 MODELIZACIÓN GENERAL DE LA ACTIVIDAD**

Consideramos oportuno el planteamiento de modelos que expliquen gráfica y analíticamente el concepto de actividad en el contexto del presente trabajo. Los modelos se sustentarán en el concepto de utilidad aportada por la actividad, en la función de modos de ejecución y en la evolución del valor instantáneo de la intensidad mientras la actividad está en ejecución. En el punto siguiente nos referiremos a un modelo que consideramos básico por su sencillez.

### **III.6.1 Función de intensidad instantánea inicial de la actividad “ $z_I(\alpha, w)$ ”**

La función de intensidad instantánea inicial<sup>63</sup> de la actividad “ $z_I(\alpha, w)$ ” muestra los diferentes supuestos evolutivos para la intensidad de la actividad. Se trata de una función de densidad cuya “forma” caracteriza al modelo en cuestión. Esta función expresa una visión dinámica de la actividad, desde el momento de

---

<sup>62</sup> En la realidad  $k$  dependerá de cada procesador y de cada proyecto. En el contexto del presente trabajo la asumiremos como un valor medio histórico de la Organización.

<sup>63</sup> Consideramos que, salvo en actividades de muy corta duración, la evolución de la intensidad con la que se ejecuta la actividad está marcada por una cierta “inercia” o resistencia al cambio típica de cada tipo o familia de actividades. Es como si la actividad estuviera dotada de cierta “masa” a la que se le va imprimiendo “velocidad”. Por otra parte, el “efecto aprendizaje” (Chase y Aquilano) también contribuirá a esta forma de evolucionar la intensidad de la actividad. De ahí que los modelos que proponemos se caractericen por una pendiente  $\geq 0$ .

su inicio en el instante “ $t$ ” del proyecto ( $w = 0$ ) hasta el instante ( $w_C$  en Fig. III.7) en que alcance a  $z_2(w)$  (Ver III.6.2). Se caracterizará por un parámetro (que denominaremos “ $\alpha$ ”), cuyo incremento sea capaz de reflejar determinados impulsos dirigidos a la compensación del *ER*, que es lo que anteriormente hemos llamado “presión sobre el procesador”. Cuando  $\alpha = 0$  diremos que  $z_1(\alpha, w)$  corresponde a un desarrollo natural de la actividad (sin presiones). El valor del parámetro  $\alpha$  necesario para compensar el *ER*, será una función del factor de relajación ( $k_t$ ) por lo que, siendo característico de la Organización, dependerá del instante “ $t$ ” en que se inicie la actividad.

Una vez elegida la función  $z_1(\alpha, w)$ , es decir, una vez determinado el modelo de la actividad, será de aplicación a todas las actividades de los proyectos cuyo desarrollo tenga lugar en el seno de esa Organización.

### III.6.2 Función de modos de ejecución “ $z_2(w)$ ”

La función de modos de ejecución ( $z_2(w) = w_e / w = I / w$ ; Fig. III.7) que es común para todos los modelos, expresa una visión estática de la actividad y muestra los diferentes modos de ejecutar la misma. A cada punto le corresponde un valor medio de intensidad y un tiempo de ejecución (es el equivalente a contemplar que la actividad se desarrolló con intensidad constante en toda su duración, o lo que es lo mismo,  $z_1(\alpha, w) = cte$ ). Por otra parte, esta función está determinando la frontera de los posibles puntos de trabajo, al considerar que el procesador nunca estará a la derecha<sup>64</sup> de su gráfica; lo que sería equivalente a suponer que el procesador está trabajando en una actividad ya concluida. Al haber considerado un eje de tiempos estándar ( $w_e = I$ ) no existe diferencia entre la utilidad de una actividad y otra para el modelo, por lo que diremos que se ha “normalizado” la utilidad que cada actividad aporta al proyecto.

<sup>64</sup> Si no fuera así, se destruiría el supuesto de que la utilidad que una actividad aporta al proyecto es constante. Con ello, estamos suponiendo que la intensidad instantánea de la actividad nunca será superior a aquellos valores que, considerados medios, supondrían que la actividad ya está concluida.

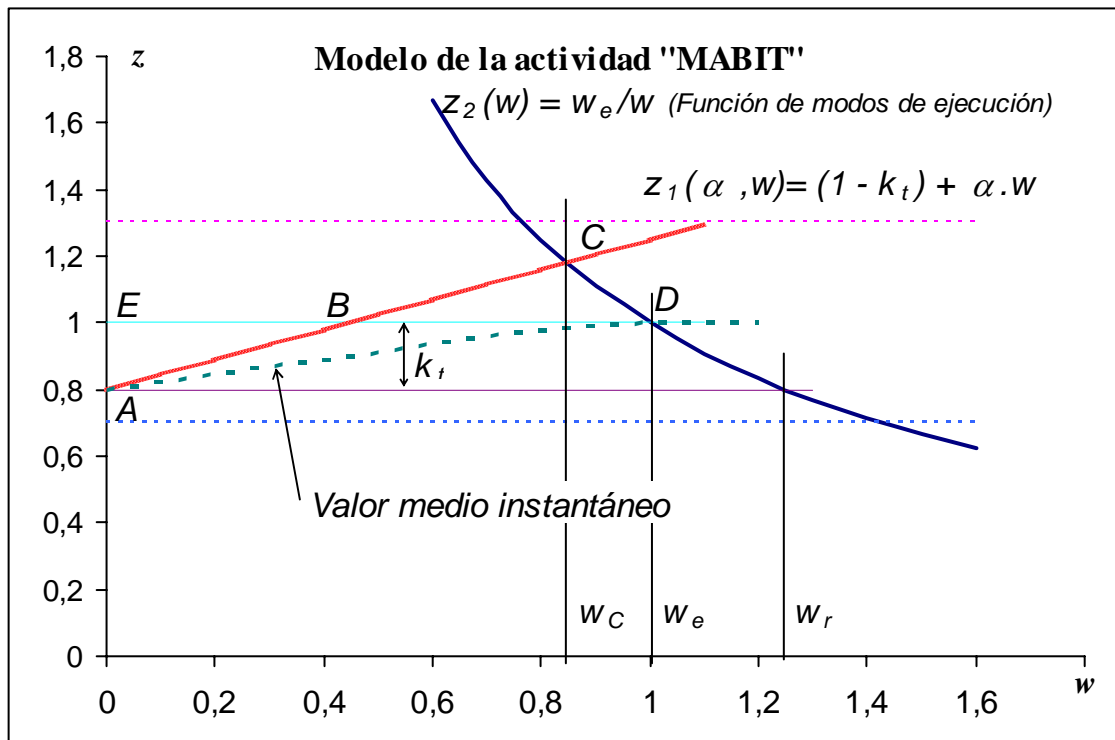


Fig. III.7

El procesador sí podrá estar a la izquierda de la función de modos de ejecución, significando situaciones en las que la actividad aún no está concluida. Los límites determinados por la banda de variabilidad se refieren a los valores medios de la intensidad, por lo que sería admisible que algún punto de la función  $z_1(w)$  estuviera fuera de dicha banda.

### III.6.3 Función de intensidad instantánea de la actividad “ $I(\alpha, w)$ ”

La función  $I(\alpha, w)$ , híbrida de las funciones  $z_1(\alpha, w)$  y  $z_2(w)$ , con derivada discontinua en el punto en que  $z_1(\alpha, w) = z_2(w)$ , la definimos como:

$$I(\alpha, w) = \text{mín}\{ z_1(\alpha, w), z_2(w) \}, \text{ para } 0 \leq w \leq w_r \quad \text{[III.10]}$$

El objetivo fundamental de la función  $I(\alpha, w)$  es mostrar la senda de la evolución teórica de la intensidad instantánea de la actividad, con el fin de



compensar el *ER* que suponemos existente en la Organización. Puesto que la función  $z_2(w)$  es común para cualquier actividad, la función relevante para determinar la forma de  $I(\alpha, w)$  es  $z_1(\alpha, w)$ . Para que el *ER* sea compensado totalmente, deberá cumplirse:

$$\int_0^{w_e} I(\alpha, w) dw = w_e \quad [\text{III.11A}]$$

**Observación<sup>65</sup>:** Esta senda formada por dos funciones, una creciente (ver nota al pie nº63) y otra decreciente, quiere reflejar una observación de la realidad: Normalmente el valor medio instantáneo de la intensidad de una actividad (Fig. III.7), aunque es creciente en todo el intervalo, tiene una etapa final en la que se reduce la velocidad de crecimiento, para adaptarse lentamente al valor unidad. De ahí que realicemos el supuesto de que la parte decreciente de la intensidad instantánea se acomode a la función de modos de ejecución, también decreciente.

En términos más generales, si no se compensa totalmente el *ER*, la expresión [III.11A] quedaría de la forma:

$$\int_0^{w_r} I(\alpha, w) dw = w_e \quad [\text{III.11B}]$$

La expresión [III.11A] pasa a ser un caso particular de la [III.11B], ambas expresiones están reflejando la utilidad que la actividad aporta al proyecto. En el capítulo V personalizaremos cada una de estas expresiones para cada uno de los modelos.

---

<sup>65</sup> Una sugerencia del Dr. Joaquín Pérez Navarro, nos invita a reflexionar sobre el efecto final de considerar a  $I(\alpha, w)$  coincidente con  $z_1(\alpha, w)$ , es decir siempre creciente. Aunque seguimos manteniendo la hipótesis de que la realidad se ajusta más a una primera etapa creciente y una segunda decreciente, en el Anexo cuantificaremos el efecto de la referida sugerencia en el modelo MABIT.

### III.6.4 Objetivos de los modelos

Se pretende que los modelos cumplan con los objetivos siguientes:

- Reflejar gráficamente la utilidad de la actividad ( $w_e$ ) y la función de modos de ejecución ( $z_2(w) = w_e / w$ ).
- Reflejar gráficamente el modo de ejecución estándar ( $z = 1$  y  $w = w_e$ )<sup>66</sup>.
- Reflejar gráficamente la función  $z_1(\alpha, w)$ , que expresa la intensidad instantánea de la actividad desde su inicio hasta la frontera determinada por  $z_2(w)$ , es decir, hasta el valor de  $w$  en que  $z_1(\alpha, w) = z_2(w)$ .
- Reflejar gráficamente la evolución de la intensidad de la actividad en el intervalo de su ejecución, cuyo objetivo sea el planteamiento de las relaciones analíticas que conduzcan a mecanismos correctores del *ER*. Nos referimos a la función de intensidad instantánea “ $I(\alpha, w)$ ”, formada por dos tramos, el primero de  $z_1(\alpha, w)$  (normalmente creciente) y el segundo de  $z_2(w)$  (decreciente).

### III.7 MODELO DE LA ACTIVIDAD BÁSICO

A continuación exponemos un modelo que hemos llamado básico por la sencillez y verosimilitud que comporta. En capítulo posterior, al desarrollar este contenido, nos referiremos a otros posibles modelos cuyo tratamiento, aún resultando más largo, no es más complejo. Denominaremos a este modelo con las siglas “MABIT” (modelo de la actividad básico intensidad-tiempo).

La anterior Fig. III.7 muestra el modelo que se propone. Se observa que hemos partido de la Fig. III.4, a la que se ha añadido una nueva función que define una posible evolución de la intensidad durante la ejecución de la actividad.

---

<sup>66</sup> Con el fin de independizar los modelos de las duraciones de las diferentes actividades, convendremos en un escalado del eje de tiempos adecuado a cada caso ( $w/w_e$ ), de forma que al modo de ejecución estándar le corresponda la unidad de tiempo.

Los dos primeros objetivos del modelo (ver III.6.4), que van implícitos en su planteamiento, quedan reflejados de la forma siguiente:

- La utilidad de la actividad ( $w_e$ ) está representada por la superficie asociada a cualquier punto de la gráfica de  $z_2(w)$  (producto de abscisa y ordenada).
- El modo de ejecución estándar está representado por el punto D de la gráfica de  $z_2(w)$ , (Fig. III.7).

Los otros dos objetivos se consideran en los dos subpuntos que siguen a continuación.

### III.7.1 Función de intensidad instantánea inicial “ $z_I(\alpha, w)$ ” en el modelo MABIT

En este modelo, la función de “intensidad instantánea inicial de la actividad” ( $z_I(\alpha, w)$ ), se caracteriza por ser lineal de pendiente  $\alpha$  y ordenada en el origen  $I - k_t$ , es decir<sup>67</sup>:

$$z_I(\alpha, w) = I - k_t + \alpha w \quad [\text{III.12}]$$

El parámetro “ $\alpha$ ” sería el portador de los posibles mecanismos correctores del *ER*.

Cuando la actividad se ejecuta en modo relajado, es decir, en ausencia de mecanismos correctores del *ER* ( $\alpha = 0$ ), la función  $z_I(\alpha, w)$  queda de la forma:  $z_I(\alpha, w) = I - k_t$ , o lo que es lo mismo, la intensidad de la actividad no progresa a lo largo de su desarrollo. Este caso nos conduciría a un tiempo de ejecución dado

---

<sup>67</sup> En este modelo (MABIT) pretendemos reflejar la situación más sencilla: Antes de aplicar ningún mecanismo de corrección ( $\alpha = 0$ ), la intensidad con la que se ejecuta la actividad es constante y por tanto coincidente con su valor medio ( $I - k_t$ ).

por  $w_r$ , que en el ejemplo (Fig. III.7) corresponde a una intensidad media  $z_t = 1 - k_t = 0,8$ .

### III.7.2 Función de intensidad instantánea de la actividad “ $I(\alpha, w)$ ” en el modelo MABIT

De acuerdo con la definición dada en III.6.3, la función de intensidad instantánea de la actividad “ $I(\alpha, w)$ ” en el presente modelo viene dada por:

$$I(\alpha, w) = \text{mín}\{ 1 - k_t + \alpha w, w_e / w \}, \text{ para } 0 \leq w \leq w_e \quad \text{[III.13]}$$

El parámetro “ $\alpha$ ”, que determina la pendiente constante del primer tramo de la función, será el resultado de resolver la ecuación dada por la expresión [III.11A] (que, como se desprende de la Fig. III.7, también podría expresarse como: Superficie triángulo AEB igual a superficie triángulo curvilíneo BCD). El parámetro  $\alpha$  tendrá un valor para cada actividad, dependiendo únicamente del valor de  $k_t$ , que a su vez depende del instante de inicio “ $t$ ” de la actividad.

En una determinada Organización con una constante  $k > 0$ , es posible establecer mecanismos correctores del *ER* fundamentados en incentivos o presiones sobre el procesador, que sean capaces de generar una senda creciente para la intensidad de su actividad. Esos mecanismos correctores, cuya cuantificación es precisamente el valor del parámetro  $\alpha$ , los simplificaremos en un solo concepto que denominaremos “presión sobre el procesador”.

Las hipótesis simplificadoras que nos conducen a este modelo básico, siguiendo su expresión gráfica dada por la Fig. III.7, son las siguientes:

- El valor inicial de la intensidad es el que correspondería a su valor medio  $(1 - k_t)$ , en ausencia de mecanismos correctores.

- La parte creciente de la senda será lineal, de pendiente  $\alpha$ . Esta pendiente lleva implícita la presión sobre el procesador y cualquier otro mecanismo natural<sup>68</sup>.
- La etapa creciente de la senda de la intensidad concluye en el punto  $C$  (Fig. III.7) en que corta a la gráfica de utilidad constante  $w_e$ , ya que, como se ha considerado anteriormente, los valores instantáneos de intensidad no pueden estar a la derecha de esta gráfica. Este punto ( $w_C$ ), que es el máximo de la referida senda, circunstancialmente podría superar el límite superior establecido para la banda de variabilidad de la intensidad.
- La etapa decreciente de la senda de la intensidad comienza en el punto  $C$  y prosigue por la gráfica de utilidad (por la misma razón mencionada en el punto anterior). Concluye en el punto  $D$  (Fig.III.7) que corresponde al tiempo de ejecución del modo estándar (para eliminar completamente el  $ER$ ).
- La superficie determinada por la senda descrita (función intensidad-tiempo de la actividad) y el eje de tiempos ( $w$ ), es representativa de la utilidad de la actividad, por lo que su valor será  $w_e$ , medido en  $hh$ .

### III.7.3 Forma de cuantificar los mecanismos correctores del $ER$

El desarrollo del modelo propuesto (MABIT) en capítulo posterior, intentará explicar con detalle la operativa de la compensación del  $ER$ . Del planteamiento realizado con las hipótesis anteriores y de la Fig. III.7, podemos deducir que existirá una relación entre el valor de la intensidad al inicio de la actividad ( $I - k_t$ ) y la pendiente ( $\alpha$ ) de la parte creciente de la función  $I(\alpha, w)$ . Más adelante encontraremos la relación que existe entre  $\alpha$  y  $k_t$ , con el fin de compensar el  $ER$ . Además, expondremos algún modelo adicional que determine otra forma de evolucionar la intensidad de la actividad.

---

<sup>68</sup> Aquí incluimos al efecto aprendizaje, ya comentado anteriormente.

Hasta aquí hemos visto la posibilidad de compensar el *ER*, pero la magnitud de las acciones a tomar ( $\alpha$ ) dependen, en cada instante  $t$  del valor  $k_t$  y éste, a su vez, de la constante  $k$  de la Organización. Para obtener el valor de esta constante proponemos un modelo referido al conjunto del proyecto.

### III.8 MODELIZACIÓN DEL PROYECTO

El modelo que presentaremos a continuación considera al proyecto en su conjunto. Tomando como referencia la cadencia o ritmo de la aplicación de los recursos al proyecto, reflejará la incidencia que el *ER* tiene sobre el “perfil del proyecto”, reflejándola como una componente del mismo. Aunque podría servir para realizar predicciones, su objetivo fundamental es obtener la constante  $k$  de la Organización partiendo de proyectos históricos. El modelo se sustentará en el concepto de utilidad aportada al proyecto por el conjunto de actividades.

#### **Definición de “función de recursos teóricos aplicados” ( $R(t)$ ):**

*Es una función de densidad que expresa cómo se han aplicado los recursos teóricos (hh reales) para ir completando las actividades programadas, (Fig. III.8).*

#### **Definición de “función de recursos efectivos aplicados” ( $r(t)$ ):**

*Es una función de densidad que expresa cómo se han aplicado los recursos efectivos (utilidad aportada al proyecto) para ir completando las actividades programadas, (Fig. III.8).*

#### **Definición de “función de relajación o de eficiencia perdida por los recursos” ( $J(t)$ ):**

*Es una función de densidad que expresa cómo ha actuado el *ER* y que se traduce en una pérdida de eficiencia mientras se han ido completando las actividades programadas, (Fig. III.8).*

Al conjunto formado por las tres funciones definidas anteriormente lo llamaremos “perfil del proyecto” (Fig. III.8). Aunque nos estamos refiriendo a tres funciones, de la primera ( $R(t)$ ) se derivan las otras dos, estando relacionadas por el  $ER$ . De ahí que al referirnos al “perfil del proyecto” lo hagamos sólo a la función  $R(t)$ .

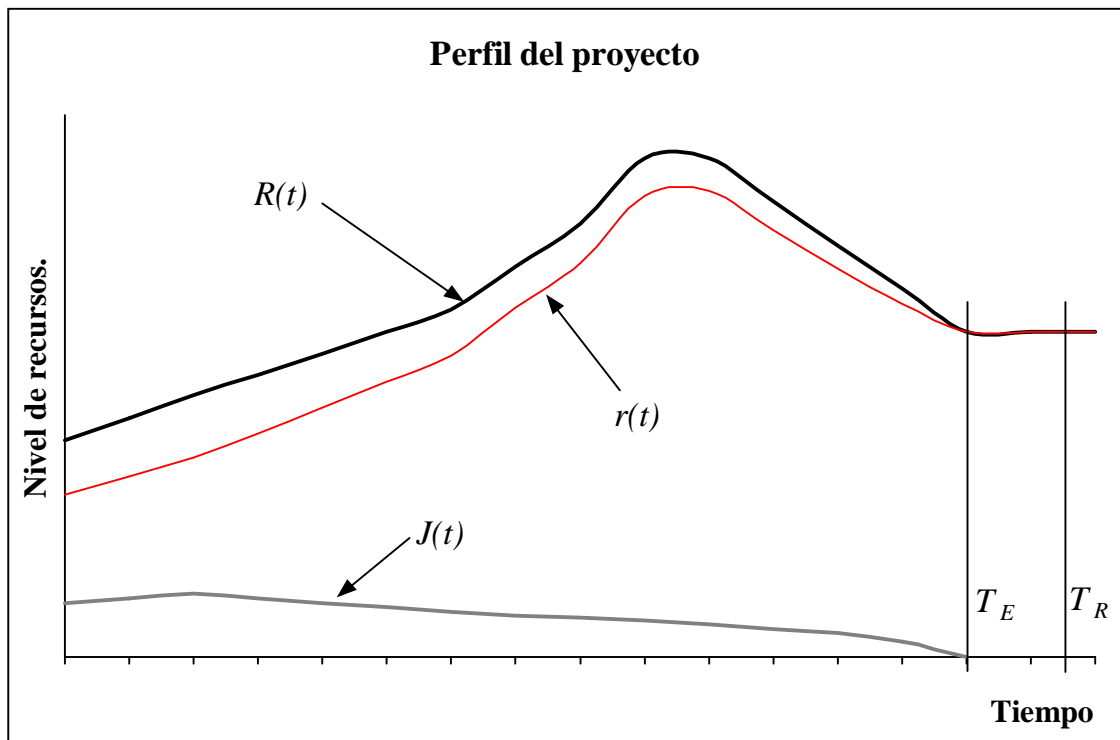


Fig. III.8

### III.8.1 Fundamentos del modelo

Cuando se realiza la planificación de un proyecto, con la secuencia de actividades conocida y los tiempos estimados de cada actividad ( $w_e$ ) en  $hh$ , se obtiene la función  $R(t)$  (Fig. III.8) que expresa la densidad con la que deben aplicarse los recursos exigidos por el proyecto. La función  $R(t)$  comienza en  $t = 0$  con ciertos recursos iniciales ( $R_0$ ), correspondientes a las primeras actividades del proyecto. A medida que las actividades se van completando e iniciándose otras nuevas,  $R(t)$  es típicamente creciente hasta el momento que

corresponde al mayor número de actividades en curso<sup>69</sup>. Desde este momento, y hasta la terminación teórica del proyecto ( $T_E$ ), irá disminuyendo el número de actividades simultáneas, concluyendo el mismo con cierto nivel de recursos correspondientes a las últimas actividades en curso.

Entenderemos que si los tiempos y la secuencia de actividades han sido determinados correctamente, una vez finalizado el proyecto, la función  $R(t)$  reflejará la cadencia (ritmo) de los recursos brutos ( $hh$ ) dedicados al mismo. Si existe  $ER$  se habrá incurrido en retraso, por lo que la función  $R(t)$  se extenderá hasta  $T_R$ . En este caso y como hipótesis simplificadora, proponemos que el tramo horizontal de  $R(t)$  comprendido entre  $T_E$  y  $T_R$  sea el valor medio de cómo evolucionaron los recursos aplicados en dicho intervalo. Cuando no se conozca dicha evolución, asumiremos como valor medio el correspondiente a  $R(T_E)$ .

Si existe  $ER$  las actividades se van completando más tarde de lo planificado, es decir, se va retrasando la utilidad aportada al proyecto. Aunque se vaya cumpliendo la función  $R(t)$  desde el punto de vista de las  $hh$  dedicadas al proyecto no será así desde el punto de vista de la utilidad aportada. Al suponer que todas las actividades están afectadas por el  $ER$  y que  $R(t)$  es conocida, la función  $r(t)$  podrá ser expresada de la forma:

$$r(t) = (1 - k_t) \times R(t) = R(t) - k_t \times R(t) \quad \text{[III.14]}$$

De la expresión [III.14] obtenemos la función  $J(t)$  o “función de relajación” de la forma:

$$J(t) = k_t \times R(t) = R(t) - r(t) \quad \text{[III.15]}$$

---

<sup>69</sup> Las típicas relaciones de precedencia existentes entre las actividades, conforman una red PERT que primero se va ensanchando para estrecharse al final (Tavares y otros, 1999). El nivel de recursos exigidos en cada instante irá conformando el perfil.



La integral definida entre 0 y  $T_E$  de  $J(t)$  expresará la magnitud de la eficiencia perdida o utilidad pendiente de aportar al proyecto en  $T_E$ .

$$\int_0^{T_E} J(t) dt = \text{utilidad pendiente de aportar en } T_E \quad [\text{III.16}]$$

Así pues, será necesario aplicar recursos extras al proyecto para completarlo, entrando en lo que hemos llamado tiempo de demora. Estableciendo la hipótesis de que el nivel de recursos durante el tiempo de demora se mantiene constante en el valor que correspondería a  $T_E$  ( $R(T_E)$ ) y teniendo en cuenta que no existe  $ER$  durante ese tiempo ( $k_t = 0$ ), la utilidad aportada al proyecto en ese intervalo vendrá dada por:

$$(T_R - T_E) \times R(T_E) = \text{utilidad aportada en tiempo de demora} \quad [\text{III.17}]$$

Esta utilidad será la que compense a la que en  $T_E$  aún no se había aportado, es decir, si establecemos que las expresiones [III.16] y [III.17] son iguales, obtendremos la demora del proyecto ( $T_R - T_E$ ) si conocemos  $k$ , o viceversa. En particular la demora vendría dada por:

$$T_R - T_E = \frac{\int_0^{T_E} J(t) dt}{R(T_E)} \quad [\text{III.18}]$$

Llamaremos al modelo “modelo lineal de recursos crecientes-decrecientes” (en adelante MLRCD).

### III.8.2 Objetivos del modelo

Se pretende que el modelo MLRCD cumpla con los objetivos que se indican a continuación:

- Reflejar gráficamente la forma con la que, de acuerdo con la planificación establecida, el proyecto debió ir recibiendo utilidad. Se trata de la función de densidad  $R(t)$  en la Fig. III.8.
- Reflejar gráficamente la forma con la que el proyecto ha ido recibiendo utilidad. Se trata de la función de densidad  $r(t)$  en la Fig. III.8.
- Reflejar gráficamente la eficiencia perdida por los recursos (función  $J(t)$  en la Fig. III.8).
- Servir de base al planteamiento de las relaciones analíticas que conduzcan a la cuantificación de la constante  $k$  de la Organización.

### III.8.3 Descripción del modelo

La forma de la función que expresa la cadencia de recursos aplicados al proyecto o “perfil del proyecto”, que es primero creciente y luego decreciente es la que corresponde a la mayoría de los proyectos de ingeniería. En nuestro modelo, esta función ( $R(t)$ ) está formada por dos tramos lineales (uno creciente y otro decreciente) determinados por un conjunto de parámetros<sup>70</sup>. Estos parámetros, que se aprecian en la Fig. III.9, son:

- $T_E$  = Duración estimada del proyecto
- $T_R$  = Duración real del proyecto
- $R_0$  = Nivel de recursos iniciales
- $m$  = Factor de recursos finales, (con relación a los iniciales).

---

<sup>70</sup>  $R(t)$  se define de esta forma por simplicidad en el cálculo. Posiblemente cada “perfil” en los proyectos reales tenga una mejor aproximación en otras funciones que únicamente añadirían complejidad al proceso de cálculo que se refleja en un anexo.

- $q$  = Factor de recursos máximos, (con relación a los iniciales).
- $h$  = Factor de tiempo que corresponde a  $q$  (con relación a  $T_E$ ).

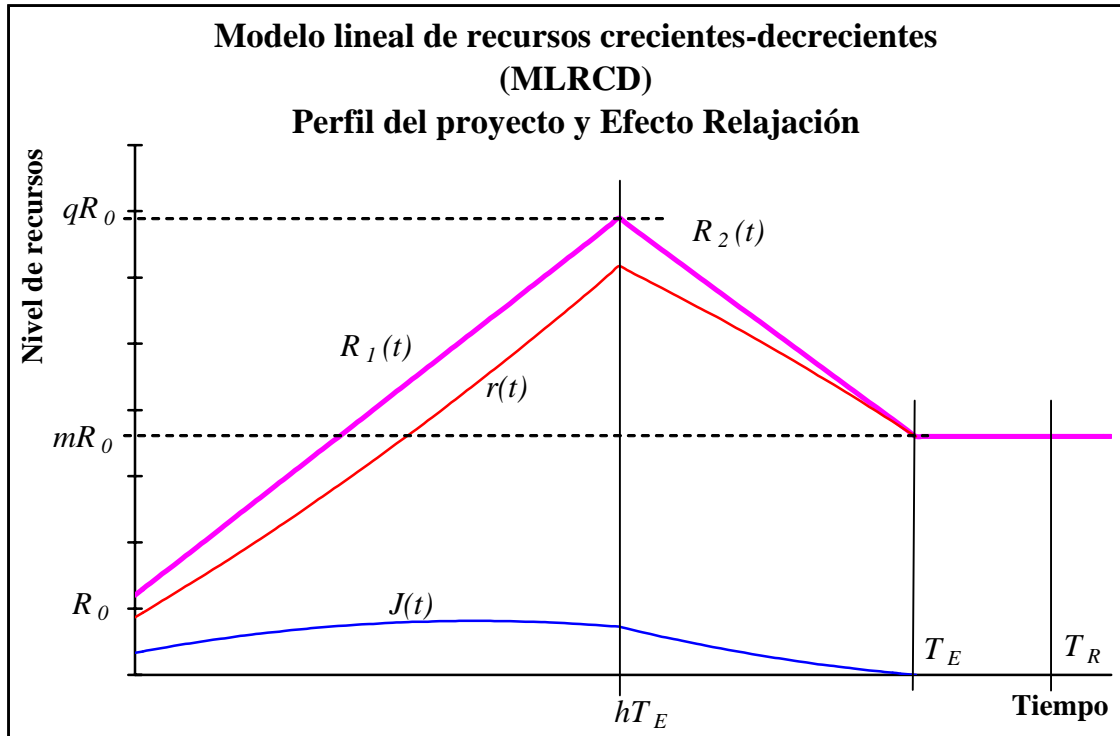


Fig. III.9

### III.8.4 Funcionamiento del modelo

La hipótesis principal de este modelo es que la eficiencia perdida por los recursos (debido a la  $ER$ ), deberá ser compensada con una demora en la terminación del proyecto, durante la cual el nivel de recursos extras aplicados se mantiene constante y de valor  $mR_0$ . Esto es equivalente a establecer la igualdad (Fig. III.9) entre la superficie determinada por  $J(t)$  y los ejes (ver expresión [III.16]) y la superficie del rectángulo de base  $T_R - T_E$  y altura  $mR_0$  (ver expresión [III.17]). El resultado al que conduce lo anterior es la posibilidad de obtener el valor  $k$  de la Organización (si se conocen los retrasos de proyectos históricos). Dicho valor depende de los parámetros anteriormente relacionados y cuyo resultado, que se deducirá en el capítulo VI, anticipamos:

$$k = \frac{6m(T_R - T_E)}{T_E [(m-1)h^2 + (3-q-2m)h + 2q + m]} \quad [\text{III.19}]$$

Vemos que, conocidos las demoras y los perfiles de algunos proyectos pasados, obtendríamos un valor de  $k$  para cada proyecto en particular. Si son ciertas nuestras hipótesis y planteamientos, los diferentes valores de  $k$  tendrán una cierta concentración y utilizaríamos su media como valor representativo para la Organización<sup>71</sup>. Este valor sería el utilizado como referencia para aplicar el mecanismo corrector del  $ER$ , teniendo en cuenta que en cada momento “ $t$ ” del desarrollo de un proyecto ( $0 \leq t \leq T_E$ ), le corresponde un valor  $k_t = k(T_E - t) / T_E$ .

Sería de interés poder conocer la demora en que incurrirá un determinado proyecto futuro, del que se conoce la secuencia en que se habrían de aplicar los recursos. Para ello, deberíamos suponer conocida la constante  $k$  y aplicar la expresión de la “demora relativa” que se deduce de [III.19]:

$$\frac{T_R - T_E}{T_E} = k \frac{[(m-1)h^2 + (3-q-2m)h + 2q + m]}{6m} \quad [\text{III.20}]$$

La realidad nos muestra perfiles de proyectos que obedecen a una función escalera, según los procesadores que intervienen en cada periodo del proyecto y que muestra una primera parte creciente y otra decreciente al final. Para poder aplicar nuestro modelo MLRCD y obtener el valor  $k$  correspondiente, debemos realizar el ajuste lineal de ese perfil que mejor se adapte al original.

Hemos preparado una aplicación (desarrollada sobre Excel), que nos permite introducir como dato un perfil cualquiera, del que se deriva un histograma de procesadores. Para ello, en el proyecto (real o ficticio), dividimos

---

<sup>71</sup> Nótese cómo el valor de  $k$  no depende de  $R_0$ , pero sí del retraso en que incurrió el proyecto y de los parámetros que conforman la “forma” del perfil.

el tiempo teórico de ejecución ( $T_E$ ) en 25 intervalos<sup>72</sup>, asignando el nivel medio de recursos aplicados en cada intervalo. Como resultado obtendremos un perfil lineal de dos pendientes (primero positiva y luego negativa), así como sus parámetros asociados. Si el retraso en que incurrió el proyecto, fuera un dato, obtendríamos como resultado la constante  $k$  de la Organización. Y a la inversa, si consideramos el perfil de un proyecto en fase de planificación, el valor conocido de  $k$  nos permitirá estimar el retraso. Es de interés observar cómo la forma del perfil afecta al retraso calculado.

---

<sup>72</sup> La razón para considerar 25 intervalos en  $T_E$  es de índole puramente práctica.



## **CAPÍTULO IV**

### **EL RETRASO EN LA TERMINACIÓN DE LOS PROYECTOS**

#### **IV.1 INTRODUCCIÓN**

En todas las Organizaciones dedicadas al desarrollo de proyectos (en particular las Ingenierías), normalmente se realiza la programación de las actividades de los mismos. El resultado de esa programación, como culminación de la “Planificación del Proyecto”, lleva implícita la secuencia óptima de las actividades y la dimensión temporal de aquél (“tiempo calculado para la ejecución del proyecto”, o como lo venimos llamando “TP”), que determinará la fecha estimada para su finalización. Sin embargo, la realidad muestra que los proyectos se concluyen casi siempre después de la fecha estimada. Unas veces la causa de esa demora estará en la adopción de una secuenciación defectuosa (no óptima), pero en la mayoría de las ocasiones se piensa que está en la asignación

de valoraciones optimistas<sup>73</sup> a los “intervalos de tiempo asociados a las actividades” o, como lo venimos llamando “TA”.

Desde la aparición de la técnica PERT se suceden abundantes estudios que ponen de manifiesto las dificultades para obtener el TP (media y varianza) aplicando esta técnica. En el primero de esos estudios se refleja cómo crecen las dificultades a medida que aumenta el número de actividades (Clark, 1961). Sin embargo, son muy escasos los estudios en la línea de aplicación de metodologías para obtener los TA; a éstos se les considera exclusivamente del ámbito del experto.

Sin entrar aquí en las diferentes metodologías aplicables a la estimación de los intervalos de tiempo asociados a las actividades que, como se sabe, darían lugar a diferentes resultados como estimación del TP, está claro que existe “algo” responsable de que las duraciones reales de las actividades sean superiores a las estimadas. La mayoría de las investigaciones realizadas en la línea de averiguar porqué los tiempos estimados para las actividades son optimistas (Fulkerson, 1962; Schonberger, 1981; Golenko y Gonik, 1997; entre otros), no han logrado dar una solución satisfactoria al problema, lo que ha propiciado la existencia de la sensación de que el retraso en la terminación de los proyectos es algo inevitable.

Cuando un cambio en las metodologías aplicadas para la obtención del TP, da lugar a estimaciones más largas, es considerado una mejora en las mismas; pero se sigue observando una clara tendencia a los retrasos. Después de analizar una amplia muestra bibliográfica, cabe pensar que existen otros factores (que no son defectos metodológicos) que afectan al cálculo del TP y que no son tenidos en cuenta.

---

<sup>73</sup> Se dice que una valoración fue optimista cuando el tiempo real de ejecución de la actividad en cuestión ha resultado superior a aquella.



Aún aceptando que el retraso en la terminación de los proyectos sea algo inevitable, lo que resulta realmente preocupante es cómo tratar la incertidumbre asociada a ese “algo inevitable”. Algunos autores (King y Wilson, 1967) se refieren a modelos de ajuste, basados en la realización de estimaciones cuando la actividad está iniciada. Otros autores (Kamburowski, 1985a) proponen utilizar funciones de distribución de probabilidad que presenten cotas superiores más altas, como expresión de las duraciones de las actividades. Estas formas de atajar el problema (revisando las estimaciones al alza) no parece que aporten soluciones efectivas; en Littlefield y Randolph (1991) se aprecia cómo actúa el efecto Parkinson<sup>74</sup> cuando se trata de afrontar el problema por la vía de adoptar estimaciones más altas. Más adelante abordaremos este tema, realizando un recorrido por la bibliografía que lo trata.

La observación de la realidad muestra que esta preocupación trasciende lo puramente teórico, reflejándose en la metodología que suele emplearse en las organizaciones que desarrollan proyectos. Lejos de aplicar los diferentes métodos que los estudiosos del tema recomiendan, el director del proyecto, como responsable de la ejecución del mismo, comprime la planificación estimada (subjetivamente y, normalmente, de forma proporcional). Es evidente que esta metodología va en dirección contraria que la mayoría de las recomendaciones teóricas, en la línea de revisar las estimaciones al alza. El director del proyecto considera que los datos de partida para realizar la estimación de la duración del proyecto, ya están suficientemente inflados (Lewis, 1995) y que debe proceder a un recorte. Este recorte lleva implícita una intención fundamental:

- Contrarrestar el exceso en la estimación que el experto (realizador de la evaluación), habrá contemplado para compensar el optimismo inherente en el proceso de evaluación y prevenir el retraso en que (supuestamente) incurriría el proyecto.

---

<sup>74</sup> Todo trabajo será expandido hasta ocupar el tiempo que se ha previsto para su desarrollo. (Parkinson, 1962).

Esta forma de proceder será neutral en el largo plazo, ya que conocidos los efectos sobre las estimaciones iniciales, el experto aplicará los coeficientes necesarios para compensar los futuros recortes. Es evidente que este proceso de “retoques” a los TA, que van a incidir en la obtención del TP, se debe a la falta de una metodología para la métrica de las actividades, que fuera lo suficientemente objetiva como para infundir confianza a los agentes que intervienen en la planificación.

## **IV.2 EL RETRASO EN LOS PROYECTOS: El enfoque clásico**

Desde el nacimiento de esta disciplina (Planificación de Proyectos), a mediados de los años 50, y en la medida en que era observado el recurrente incumplimiento del plazo de ejecución del proyecto, se han venido sucediendo hipótesis muy diversas, centradas principalmente en los algoritmos aplicados al cálculo del TP. Cuando sale a la luz la conocida técnica PERT, ya se pone de manifiesto la preocupación existente por los retrasos en la terminación de los proyectos (Malcolm y otros, 1959). Son muchos los autores que estudian este problema, aportando explicaciones e ideas en la mayoría de los casos. A continuación haremos mención a una selección de autores, cuya opinión pensamos que es de interés para este trabajo.

### **IV.2.1 Método de Fulkerson**

La primera referencia encontrada que se refiere a las estimaciones demasiado optimistas, se debe a Fulkerson (1962). Este autor propone un método de cálculo para el TP que, tratando de evitar la complejidad del manejo de variables aleatorias, obtiene un resultado más próximo al real y superior al estimado cuando los TA han sido considerados deterministas.

El cálculo del TP (longitud del camino crítico), cuando se ha considerado al proyecto como una red PERT, es decir, cuando los TA son variables aleatorias, lleva implícita una complejidad que siempre se ha tratado de evitar. La forma más sencilla de evitarlo ha sido sustituir cada variable aleatoria por su valor esperado (media), convirtiendo el problema probabilista en otro determinista, cuya solución es un valor “g” para el TP. Si llamamos “e” al tiempo esperado para la ejecución del proyecto, los resultados muestran que  $g \leq e$ , es decir el valor “g” fue optimista.

Fulkerson asume que el valor “e”, cuyo cálculo sería muy complejo, es el que correspondería a las observaciones reales. El retraso en que incurre el proyecto ( $e - g$ ) es consecuencia de los defectos derivados de la simplicidad del cálculo, que dieron un valor “g” erróneo. Por otra parte, reconoce la excesiva complejidad, implícita en la técnica PERT, para obtener un TP que se aproxime más al valor “e”. Por ello propone un método de cálculo que, sin ser excesivamente complejo, obtiene siempre un resultado para el TP de valor “f”, de forma que siempre se verifica  $g \leq f \leq e$ .

El método propuesto pone de manifiesto la preocupación existente por los retrasos ( $e - g$ ) en que “siempre” incurren los proyectos. Como ejemplo de aplicación de su método, Fulkerson propone una red PERT pequeña (cinco actividades), mostrando cómo los resultados obtenidos para “f” son un 15% mayores que los de “g”, es decir, el que obtendríamos si consideramos el problema puramente determinístico. Es evidente que el valor “e” sólo será conocido cuando se haya finalizado el proyecto. Fulkerson asegura que siempre se verifica  $g \leq f \leq e$ .

El algoritmo de Fulkerson, que considera variables aleatorias discretas, es ampliado por Clingen al caso continuo. Como ejemplo de aplicación muestra una red PERT de 30 actividades que presenta un resultado “f” del 20% más largo que con el método PERT determinista (Clingen, 1963).

Elmaghraby realiza una ampliación del método de Fulkerson desarrollando dos nuevos algoritmos de estimación que mejoran los de aquél. Los resultados obtenidos, aun siendo más próximos al valor esperado, siguen siendo optimistas. El primer algoritmo se fundamenta en la consideración de que es posible recorrer una red PERT a la inversa sin que se altere el resultado del tiempo esperado para la ejecución del proyecto. Sin embargo, los valores que corresponden a nodos intermedios normalmente son diferentes. De esta forma obtiene un resultado “s” tal que  $g \leq f \leq s \leq e$ . El segundo algoritmo es una extensión del de Fulkerson en dos direcciones diferentes, asignando probabilidad de  $\frac{1}{2}$  a cada una de ellas. El resultado de este algoritmo “w” se aproxima aún más a “e”, quedando de la forma:  $g \leq f \leq s \leq w \leq e$  (Elmaghraby, 1967).

#### IV.2.2 Observaciones de Klingel

El retraso en la finalización de los proyectos, en que habitualmente incurren las organizaciones encargadas de su ejecución (Klingel, 1966), depende fundamentalmente de dos variables:

- La varianza de los tiempos de desarrollo de las actividades (consideradas como variables aleatorias).
- Número de caminos alternativos en paralelo.

Cuando existen posibilidades de llevar a cabo un proyecto, la Organización encarga a un responsable (director del proyecto), el cálculo del TP. Para ello utilizará generalmente las técnicas PERT o las de simulación (Método de Monte Carlo), mostrando la realidad cómo la primera es preferida por los directores de proyectos. Para éstos, lo fundamental es conocer la fecha de conclusión del proyecto y la probabilidad de cumplirse. Si conocieran la probabilidad exacta podrían realizar la asignación de recursos de la forma más eficiente, asumiendo los riesgos justos.

Klingel ilustra las circunstancias bajo las que la técnica PERT, aún con grandes desviaciones, da cierta seguridad a los directores de proyectos. Incluso teniendo en cuenta que, de acuerdo con el PERT, la probabilidad obtenida para concluir el proyecto en la fecha estimada es de un valor determinado relativamente alto, cuando la realidad viene mostrando valores notablemente más bajos.

Klingel sustenta su hipótesis en un experimento consistente en analizar un proyecto real de diez instalaciones idénticas que deben ejecutarse en paralelo (al mismo tiempo), cada una con 110 actividades (consideradas como variables aleatorias, con función de distribución normal de media  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$  conocidas). El estudio se realiza bajo las siguientes consideraciones:

- (a) Las variables de interés son: El número de instalaciones y la relación entre la desviación estándar de las actividades y sus medias ( $\sigma/\mu$ ).
- (b) Se consideran seis alternativas correspondientes a seis caminos diferentes o número de instalaciones ejecutadas en paralelo (1, 2, 3, 5, 8, ó 10).
- (c) Se consideran cuatro puntos para cada alternativa, correspondientes a la variable ( $\sigma/\mu$ ): 0, 1/6, 1/3, 1/2. El nivel "0" corresponde al caso determinista, con respecto al que se obtiene la estimación del TP (228 días, en el caso objeto de estudio). Aunque parezcan grandes algunos de los valores de  $\sigma/\mu$  (1/3 y 1/2), pueden considerarse típicos de este tipo de proyectos.
- (d) Mediante simulación Monte Carlo y un programa desarrollado al efecto, se obtienen 25 observaciones para cada uno de los 24 casos planteados.
- (e) Se utilizan los valores medios de cada observación y mediante regresión múltiple<sup>75</sup> se obtienen curvas que ponen de manifiesto el retraso creciente con el número de caminos paralelos y con la variable  $\sigma/\mu$ .

---

<sup>75</sup> Ver algoritmo en Klingel, 1966, Pg. B-198.

A modo de resumen, indicaremos como Klingel resalta la preocupación existente por las demoras en que incurren los proyectos, con relación al TP calculado mediante el método PERT. Mediante el experimento realizado cuantifica los retrasos posibles utilizando la técnica Monte Carlo, de cuyos resultados destacaremos dos casos:

- (a) Para una sola instalación el retraso real llegaría hasta el 10%.
- (b) Para tres instalaciones simultáneas, el retraso real llegaría hasta el 26%.

### IV.2.3 Observaciones de King y Wilson

Un repaso por la historia de las estimaciones para los TA en algunos proyectos importantes<sup>76</sup>, conduce a dos hipótesis básicas:

- La precisión de la estimación aumenta al acercarnos a la fecha de comienzo de la actividad.
- Las estimaciones realizadas durante el progreso de la actividad, son más precisas cuanto más nos acerquemos al final, es decir, la estimación del tiempo pendiente para completarla es mejor a medida que la actividad va progresando.

Los autores (King y Wilson, 1967) consideran que las estimaciones realizadas por los expertos (normalmente ingenieros cercanos al desarrollo de la actividad), al margen de si utilizan o no procedimientos o métodos específicos, son juicios subjetivos sobre determinados hechos humanos, que conducirán al desarrollo y conclusión de la actividad. Argumentan que la subestimación inicial, realizada por el contratista que persigue la adjudicación, suele ser una estrategia de cara a aumentar las probabilidades de ser el adjudicatario del proyecto.

---

<sup>76</sup> Se refieren a grandes proyectos públicos, por los que pugnan determinados contratistas.

Las actividades son consideradas lo suficientemente largas (en el tiempo) como para que resulte de interés efectuar estimaciones del tiempo que queda para su conclusión. Los autores definen la variable “ $E_{REM}/A_{REM}$ ” (parte pendiente estimada / parte pendiente real), que en el 95% de los casos es inferior a la unidad, es decir, aún estando en progreso la actividad, las estimaciones han sido inferiores a los tiempos reales (observados posteriormente). También destacan cómo la variable  $E_{REM}/A_{REM}$  crece rápidamente, a medida que la actividad se acerca a su finalización.

King y Wilson proponen unos modelos de ajuste, fundamentados en la minimización del coste total para las estimaciones futuras y basándose en los costes derivados de las subestimaciones y las sobreestimaciones. En particular, es de destacar el “modelo de coste asimétrico” que se fundamenta en las siguientes premisas:

- Las subestimaciones ocasionan costes de retraso (relativamente altos).
- Las sobreestimaciones ocasionan costes de inactividad (relativamente bajos).

Si atendemos al resultado de la minimización en cuanto a coste, es evidente que el objetivo tenderá a una sobreestimación del proyecto, compensando la subestimación inicial, que es la que explica el retraso en que incurriría el proyecto en el supuesto de no realizar la compensación.

#### **IV.2.4 Observaciones de King y otros**

Los autores (King y otros, 1967) analizan la validez de un modelo que realice el ajuste de los TA. El modelo está basado en el comportamiento histórico del sujeto estimador o experto y considera que las evaluaciones del presente pueden ser utilizadas para corregir futuras estimaciones. Con relación a la

reciente aportación de King y Wilson, opinan que aunque no intentaban conseguir resultados de aplicación general, sí muestran un contenido básico potencialmente útil. Las conclusiones, aunque fundamentadas en grandes proyectos gubernamentales, también serían aplicables a proyectos de I+D industriales.

Las hipótesis básicas realizadas por King y Wilson (ver punto IV.2.3), relativas al momento temporal en que se realiza la estimación, conducen a pensar en la existencia de un “efecto aprendizaje” a lo largo del proceso, que se caracteriza por dar valores crecientes para los TA, a medida que la propia actividad avanza. En el primer caso (ver punto IV.2.3) se interpreta que la estimación, fundada en informaciones de referencia, es suficiente para que la actividad pueda iniciarse. En el segundo caso, la información ganada sobre la propia actividad permite estimar con más precisión el tiempo que resta para terminarla.

King y otros proponen unos modelos de ajuste, fundamentados en el comportamiento histórico del estimador, de donde se deben obtener los parámetros básicos. Al menos deberán considerarse dos aspectos fundamentales:

- El sujeto estimador.
- La naturaleza de la actividad o proyecto.

Los autores definen el concepto de “índice de estabilidad” como la relación porcentual  $I-(NC/NO)$ , donde  $NC$  es el número de cambios efectuados y  $NO$  es el número de oportunidades tenidas para cambiar. Este índice sirve para catalogar el conjunto de proyectos objeto de estudio, sobre la base de que las actividades, a lo largo del proceso de estimación, presentan oportunidades para ser “reestimadas”, resultando cambio de la estimación en unos casos y permanencia en otros.

Con relación al primer aspecto, será importante determinar si el modelo se refiere a un individuo, un equipo, un determinado tipo de organización, etc. Según el



caso estaremos ante diferentes modelos o diferentes parámetros dentro del mismo modelo. Con relación al segundo aspecto, también habría que determinar los diferentes modelos y en particular el grado de innovación e incertidumbre asociadas a la actividad o proyecto.

Los autores enfocan su análisis estableciendo dos niveles para el aspecto primero y cuatro para el aspecto segundo. Los datos son extraídos de un conjunto de cinco grandes proyectos, que son catalogados según los dos aspectos considerados. El análisis es realizado en dos niveles, como en King y Wilson. Las conclusiones, aunque un tanto confusas, ponen de manifiesto la preocupación existente por averiguar las causas que rodean a los mecanismos para obtener una estimación fiable de los TP.

#### **IV.2.5 Método de Britney**

Britney se refiere a cómo la experiencia pone de manifiesto una asimetría entre las subestimaciones y las sobreestimaciones de los tiempos de ejecución de las actividades, destacando la aportación de King. Este autor propone un método, variante del PERT, que se fundamenta en los conceptos bayesianos de decisiones y que denomina BPERT (Bayesian point estimates of activity durations in PERT).

En un ejemplo demuestra cómo los resultados obtenidos con el método BPERT para la obtención del TP se aproximan más a la realidad al ser superiores a los obtenidos con el método PERT (son menos optimistas). Según este autor, utilizando su método, se reducirían los retrasos en los proyectos y sus mayores costes asociados (Britney, 1976).

### IV.2.6 Fundamentos de Schonberger

Schonberger se refiere a los métodos tradicionales para el cálculo de los caminos críticos de los proyectos, que se fundamentan en estimaciones deterministas para los tiempos de ejecución de las actividades. Este autor alega (Schonberger, 1981) que las conclusiones obtenidas pueden ser refutadas aplicando métodos de simulación (Monte Carlo). Su análisis lo fundamenta en los puntos siguientes:

- Los directores de proyectos no han aplicado técnicas de simulación en el proceso de evaluación de sus proyectos, aun a pesar del crecimiento en los años recientes de las publicaciones sobre estas técnicas.
- En vista de los errores detectados en la aplicación de las técnicas deterministas, parece que se impone la utilización de las técnicas de simulación, que están demostrando mayor coherencia con la realidad.
- La realidad muestra que los proyectos se terminan “siempre”<sup>77</sup> tarde. El objetivo de este autor es demostrar que la determinación del TP por la vía determinista subestima la duración real. Realiza la demostración utilizando un método manual de técnicas de simulación aplicado a una red de actividades con tiempos probabilísticos.
- El problema está en que los métodos deterministas consideran independientes a todos los caminos posibles y la existencia de sólo un camino crítico, obteniendo su duración mediante una simple suma. Esta metodología no prevé que determinados alargamientos del camino crítico puedan provenir de actividades no críticas. Esto se debe a que alguna actividad no crítica pudiera pasar a serlo al no poder compensarse su demora con adelantos en otras actividades que discurren en paralelo (solo se compensará si el adelanto ocurriese en actividades situadas en el nuevo camino crítico).

---

<sup>77</sup> El entrecomillado es de Schonberger.

- Si los sistemas de simulación producen resultados más cercanos a la realidad, entonces ¿porqué está tan generalizado el uso de la técnica del CPM? La razón fundamental está en la facilidad y bajo coste de la estimación con esta técnica, frente a la dificultad para comprender el método Monte Carlo y su elevado coste de aplicación.
- Sobre los métodos PERT/CPM se ha escrito mucho, pero pocas veces fundamentado en conceptos probabilísticos, posiblemente por el desconocimiento de los propios autores o por suponer ese desconocimiento a sus lectores potenciales.

Admitamos, prosigue Schonberger que los métodos de simulación dan resultados verdaderos, entonces nos encontraremos con el dilema de cómo usar esa información. Por ejemplo, si la duración obtenida es un 20% mayor que por los métodos deterministas podemos aumentar el tiempo estimado para cada actividad en ese 20%. El problema es que actuaría la ley de Parkinson dando lugar a ejecuciones reales superiores a las obtenidas por la primera evaluación. Si los nuevos TA obtenidos los usamos en un nuevo proceso de simulación, obtendríamos un resultado aun mayor y así sucesivamente.

Schonberger concluye su análisis resumiéndolo en los cinco puntos que se exponen a continuación:

- Los proyectos se terminan siempre tarde. Una mayor variabilidad en la estimación de los TA, implicará mayor retraso en la realidad.
- No hay manera de compensar la discrepancia entre el resultado obtenido por el método CPM y el obtenido vía simulación, ya que la ley de Parkinson tiende a contrarrestar el esfuerzo realizado en la dirección de un mejor resultado.
- Aunque se siga usando el método tradicional determinista (CPM, con una evaluación por actividad), su resultado debería ser reconsiderado subjetivamente, asociándole un tiempo de demora a cada actividad.

- Con una visión más real de cuándo concluirá el proyecto, los responsables del mismo tomarán mejores decisiones.
- Los sistemas de simulación podrían llegar a ser un estándar en el análisis de los proyectos según los procesos PERT/CPM. La razón principal es que podríamos suponer que llevan implícitos determinados factores de comportamiento (ley de Parkinson) y otros cuantitativos y organizativos de difícil evaluación. Otras razones se derivarán de la enseñanza de estas técnicas en las escuelas de Management y de Ingeniería, ya que de esta forma los estudiantes comprenderán, desde el principio, algunos aspectos de la dirección de proyectos.

#### **IV.2.7 Planteamiento de Kamburowski**

A pesar de la incertidumbre asociada a la determinación de las fechas de conclusión de los proyectos (Kamburowski, 1985a), con el consiguiente riesgo asociado a los retrasos, se ha dedicado en la práctica poca atención al problema. La programación de las actividades y la obtención del tiempo necesario para el desarrollo del proyecto que son realizados por los métodos tradicionales (deterministas) dan lugar a planificaciones demasiado optimistas, lo que a la postre significa proyectos desbordados en tiempo y coste.

Por otra parte, los métodos probabilísticos gozan de poca aceptación práctica, debido a las dificultades para definir con suficiente aproximación las distribuciones de probabilidad de los TA.

El método planteado por Kamburowski es una herramienta para determinar valores medios de los tiempos de las actividades utilizando los tiempos disponibles. Del análisis de los ejemplos se desprende que este método produce mejores resultados cuando las distribuciones de probabilidad son más dispersas, es decir, con una varianza mayor.

El autor pone de relieve cómo los resultados obtenidos aplicando las técnicas del “PERT clásico”<sup>78</sup> son siempre demasiado optimistas (subestima la duración de los proyectos). El método que propone requiere sólo la información disponible (la misma que el método clásico), obteniendo un límite superior (visión pesimista) para la duración de los proyectos. Este método se fundamenta en las siguientes premisas:

- (a) Los tiempos de ejecución de las actividades son variables aleatorias independientes, de las que se conoce su media.
- (b) La forma exacta de las funciones de probabilidad no se conoce, sin embargo sus funciones de distribución acumulativas (f.d.a.), son del tipo NBUE (New Better than Used in Expectation).
- (c) Los datos de partida son los mismos que los utilizados por los métodos deterministas (los valores medios).

Aclaración:

Una f.d.a. “ $F$ ” se dice que pertenece a la clase NBUE, si su media ( $\mu$ ) es finita y se verifica:

$$\int_x^{\infty} [1 - F(t)] dt \leq \mu [1 - F(x)]$$

para  $\forall x \geq 0$ , tal que  $[1 - F(x)] > 0$

Ejemplos de distribuciones del tipo NBUE:

- Distribución beta ( $p, q$ ), con  $p, q \geq 1$
- Distribución triangular
- Distribución normal truncada
- Distribución gamma ( $p, \lambda$ ), con  $p \geq 0$
- Distribución exponencial

---

<sup>78</sup> El entrecomillado es nuestro. Entendemos que Kamburowski se refiere a las técnicas deterministas (método CPM fundamentalmente).

Kamburowski demuestra que la f.d.a. del tipo exponencial es una cota superior de la clase NBUE, por lo que si suponemos que las posibles duraciones de una actividad están exponencialmente distribuidas y conocemos su media como valor esperado, entonces el tiempo calculado TP será la cota superior y en consecuencia la estimación más pesimista.

De esta forma, el autor explica cómo el casi siempre presente retraso en los proyectos radica en utilizar métodos para su cómputo que producen resultados que son cotas inferiores de todas las posibles.

#### **IV.2.8 Opinión de Liu y Horowitz**

Estos autores (Liu y Horowitz, 1989) se refieren a proyectos de desarrollo de software, que consideran coincidentes en muchos aspectos con los proyectos de *PI*, fundamentalmente en lo relativo a que son proyectos en los que el diseño y la innovación están presentes.

Haciendo un repaso a las técnicas tradicionales de planificación, detectan cómo en ellas no se consideran determinados aspectos inherentes a las actividades de los proyectos en los que las componentes diseño e innovación son importantes.

Literalmente opinan “hemos observado que la formulación de la planificación de proyectos siguiendo técnicas tradicionales (GANT, PERT, CPM) no captura determinadas características de un proyecto de diseño, con la inevitable consecuencia de que el desarrollo del proyecto se vaya más allá de la fecha estimada”. Estos autores, con su referencia explícita a la técnica PERT, están poniendo de manifiesto ciertas dudas de que la distribución tipo  $\beta$  represente adecuadamente a los tiempos de las actividades.

### IV.2.8 Opinión de Littlefield y Randolph

Estos autores (Littlefield y Randolph, 1991), en su crítica a la planificación de proyectos mediante aplicación de la técnica PERT, hacen referencia implícita a este problema (retraso en la terminación) y explícita al efecto Parkinson, cuando afirman: “Sólo el evaluador más ingenuo realizará una estimación demasiado corta como para no poder ejecutar la actividad en ese tiempo y por otra parte, sólo si el evaluador es descuidado emitirá una evaluación demasiado larga, ya que sabrá que el procesador expandirá el trabajo hasta ocupar totalmente el tiempo calculado”.

De aquí podemos interpretar que, en el mejor de los casos, la estimación se ajustará (aparentemente<sup>79</sup>) a la realidad, es decir, el caso del evaluador descuidado. En la mayoría de los casos, cuando el evaluador sea ingenuo o responsable<sup>80</sup>, la probabilidad de que los tiempos reales sean superiores a los estimados será alta.

### IV.2.10 Método de Golenko y Gonik

Está suficientemente comprobado (Golenko y Gonik, 1997), que utilizar valores medios da lugar a estimaciones de los TP generalmente cortas, derivándose una mala asignación de los recursos.

Aun siendo abundante la literatura existente sobre la planificación de proyectos con recursos escasos, una buena parte de los algoritmos publicados aplicables a tareas de planificación, asumen que los tiempos que expresan la duración de las diferentes actividades son fijos, no considerando proyectos estocásticos con variables aleatorias como expresión de los referidos tiempos

---

<sup>79</sup> Decimos “aparentemente” porque ese ajuste a la realidad se debería al efecto Parkinson.

<sup>80</sup> Consideraremos estimador “responsable” a aquél que no es ingenuo ni descuidado.

(TA). Cuando a un problema de planificación, que por naturaleza es estocástico, se le aplican esos algoritmos se está sustituyendo cada variable aleatoria por su valor medio o esperado, obteniéndose resultados incorrectos.

Fundamentándose en estos argumentos, Golenko y Gonik proponen un algoritmo heurístico que se sustente en las siguientes premisas:

- (a) La duración de cada actividad se expresa mediante una variable aleatoria (v.a.), con una función de densidad dada. (Se considerarán tres alternativas para la función de densidad: uniforme, normal y beta).
- (b) La duración de cada actividad tiene unos límites (inferior y superior) que son conocidos.
- (c) Cada actividad tiene asociada una probabilidad de encontrarse en el camino crítico durante el curso de realización del proyecto. Esta probabilidad se calcula vía simulación.
- (d) Cada actividad contribuye a la duración del proyecto mediante una variable que expresa el producto de su duración media y su probabilidad de estar en el camino crítico.
- (e) El objetivo es minimizar la función “duración del proyecto”.

Los resultados, comparados con otros algoritmos más complejos dan tiempos para el TP en torno al 3% superiores. Además, se observa como las distribuciones tipo normal y uniforme dan tiempos más largos que las del tipo beta (del orden del 3,5%).

Es evidente que estos autores atribuyen el retraso, en que con tanta frecuencia incurren los proyectos, a la simplificación que normalmente se realiza cuando se aplican los algoritmos para el cálculo del TP. Esos algoritmos son muy sensibles al empleo de variables aleatorias, como expresión de los tiempos de las actividades para el cómputo de la duración del proyecto. Esto determina que se utilicen los tiempos medios resultantes de cada actividad, habiendo demostrado la



experiencia que los resultados obtenidos de esta forma son demasiados optimistas. Golenko y Gonik concluyen en este artículo que es necesario disponer de “modelos de calidad”, que sirvan mejor a los planificadores de proyectos, proponiendo un modelo híbrido entre los que utilizan los tiempos medios y los de simulación.

### **IV.3 ANTECEDENTES CERCANOS**

En la bibliografía analizada no se han encontrado referencias precisas sobre el enfoque que, en este trabajo, estamos dando al retraso de los proyectos. No obstante, es de interés destacar los trabajos de Leachman con relación a lo que él llama “intensidad de la actividad”, y la reciente propuesta de Tavares con respecto a lo que él denomina “morfología de la red del proyecto”.

La propuesta de Leachman no se refiere expresamente al problema del retraso en los proyectos, pero sí a un aspecto que a la postre influirá en el TP y del que podemos extraer alguna utilidad para el objeto del presente trabajo: *“Variabilidad en la intensidad de la actividad”*.

La propuesta de Tavares está en la línea del tema tratado en este trabajo, al referirse al análisis de los riesgos de retrasos en los proyectos y proponer un método novedoso que se fundamenta en la *“forma de la red de actividades del proyecto”* en cuestión.

#### **IV.3.1 Propuesta de Leachman**

La mayoría de los modelos para el tratamiento del problema de la Planificación de proyectos (Ver Leachman y otros, 1990; Leachman, 1993), que

han surgido desde la aparición de los métodos PERT/CPM asumen que cada actividad debe ejecutarse de una manera específica que implica:

- Los recursos aplicados a esa actividad son fijos.
- El tiempo asociado a la actividad está dado.

pero la realidad muestra que, en muchas actividades, se dan las circunstancias:

- Los recursos aplicados varían en intensidad.
- El tiempo asociado a la actividad es función de esa intensidad.

Desgraciadamente el modelo CPM tradicional excluye tal flexibilidad en la aplicación de los recursos generando planificaciones que utilizan los recursos de forma menos eficiente.

Cuando Leachman se refiere a “actividad” –y con relación a los recursos que su ejecución requiere–, considera que normalmente necesita el concurso de múltiples recursos, cada uno en una determinada proporción<sup>81</sup>. Así, “Intensidad de la Actividad” es la tasa de aplicación de los diferentes recursos, con rangos de variabilidad simétricos con respecto a la unidad. Leachman establece como rangos de variabilidad 0,8 a 1,2 y 0,5 a 1,5, en el ejercicio de aplicación de sus algoritmos (alternativas de intensidad creciente y creciente-decreciente) a los 110 casos descritos por J. H. Patterson (Patterson, 1984).

Las variaciones en la intensidad de la actividad, efectuadas de forma continua, significan una adaptación permanente a las necesidades de evolución temporal del proyecto, estando sujetas a la disponibilidad de recursos. Esto implicará reducir la duración del proyecto, pero evidentemente el coste se podría

---

<sup>81</sup> Esta consideración contrasta con la que hacemos en este trabajo, al contemplar un único recurso o al menos el único importante.

ver afectado. Una intensidad de valor unidad equivale a una forma estándar de ejecutar la actividad<sup>82</sup>.

Leachman define el concepto de “intensidad de la actividad” de la forma siguiente:

$z_i(t)$  es una función continua en el intervalo en que se desarrolla la actividad  $A_i$ , representativa del nivel de recursos aplicado a la misma con relación a cierto nivel, llamado de normalidad. La intensidad de la actividad  $A_i$ , en el instante “ $t$ ”, tiene por expresión:

$$z_i(t) : \begin{cases} z_m \leq z_i(t) \leq z_M, & \text{si } t \in (S_i, F_i] \\ z_i(t) = 0, & \text{si } t \notin (S_i, F_i] \end{cases} \quad \text{Donde,}$$

- $z_m$  y  $z_M$  son respectivamente los valores límite mínimo y máximo de  $z_i(t)$
- $S_i$  y  $F_i$  son respectivamente los instantes en que se inicia y acaba la actividad  $A_i$

La fracción de  $A_i$ , completada en el instante “ $t$ ” (lo que nosotros llamaríamos “avance de  $A_i$ ” en el instante “ $t$ ”), vendrá dada por:

$$Z_i(t) = \int_0^t z_i(t) dt$$

asumiendo que se ha normalizado  $z_i(t)$ , es decir, considerando que la totalidad de recursos consumidos por  $A_i$  son la unidad<sup>83</sup>:

$$\int_{S_i}^{F_i} z_i(t) dt = 1$$

<sup>82</sup> Esta consideración también es asumida en nuestro planteamiento.

<sup>83</sup> Este mismo supuesto es el que hacemos al formalizar los diferentes modelos de análisis para las actividades.

De esta forma, si cuando una actividad está en progreso (instante “ $t$ ”), queremos conocer la fracción de actividad pendiente de completar y suponemos que el nivel de recursos se mantiene constante en el intervalo  $(t_i, F_i]$ , será calculada con la expresión:

$$d_i(t) = \frac{1 - Z_i(t)}{z_i(t)}$$

Leachman se refiere a dos formas de evolución de la intensidad de la actividad:

- Intensidad siempre creciente, o en su caso constante, entre límites definidos (Upgrading-Only)
- Intensidad variable entre límites definidos (Upgrading-and-Downgrading)

### IV.3.2 Opinión de Tavares

Este autor (Tavares, 1994), se refiere a cómo las actividades de los proyectos en general muestran una naturaleza estocástica o aleatoria, mientras que en la práctica son analizadas con modelos deterministas. A esto serían achacables los retrasos y mayores costes en que habitualmente incurren los proyectos.

El desarrollo de cualquier actividad de un proyecto, implica el cumplimiento de un ancho abanico de condicionantes que afectan a su duración y coste de ejecución, que se pueden resumir en los tres grupos siguientes:

- De contenido: Caso de cambios de planteamiento en los proyectos, cuando ya han sido comenzados, por cambios de directrices generales o por ponerse de manifiesto algo oculto.

- De recursos: La falta de disponibilidad de recursos humanos o materiales en el momento oportuno. La insuficiencia de equipamiento puede ocasionar, además del retraso, costes adicionales por inactividad de los recursos humanos.
- De eficiencia: La planificación de la duración de una actividad, siempre asume determinados niveles de productividad. Sin embargo, la eficiencia conseguida depende fuertemente de condiciones internas y externas como motivación, organización, cualificación profesional y otras condiciones del entorno, sociales y económicas<sup>84</sup>.

Con este planteamiento, Tavares propone un modelo enfocado a la incidencia que en el coste de los proyectos tienen las perturbaciones en las duraciones de las actividades. El modelo propuesto asume la tradicional hipótesis de independencia entre las variables aleatorias que determinan las duraciones de las actividades, pero admite una significativa correlación entre esas duraciones y el coste de cada actividad.

### IV.3.3 Propuesta de Tavares y otros

Una clara referencia a la preocupación existente sobre este tema la encontramos en un trabajo reciente de Tavares, donde pone de manifiesto la relación existente entre la “forma del proyecto”<sup>85</sup> y la incertidumbre sobre la fecha de terminación del mismo (Tavares y otros, 1999).

El riesgo de exceder en un cierto límite el tiempo estimado para la ejecución del proyecto, ha sido estudiado desde los primeros años posteriores a la aparición de la técnica PERT<sup>86</sup>.

---

<sup>84</sup> Nuestro planteamiento pone énfasis en este tercer grupo de condicionantes.

<sup>85</sup> Traducción del término anglosajón “Shape of Project network”.

<sup>86</sup> Uno de los primeros trabajos con este planteamiento puede consultarse en Clark, 1961.

El desarrollo de la Dirección de Proyectos es directamente dependiente de los avances conseguidos en las técnicas de modelización de los proyectos. Esas técnicas se fundamentan en un mejor conocimiento de las actividades, sus relaciones de precedencia y de la red que describen.

Actualmente ningún software comercial sobre la Dirección de Proyectos incluye el análisis de la red de actividades y, hasta la fecha, poca o nula atención se ha dedicado a ciertos aspectos de esa red, tres de los cuales indicamos a continuación:

- Análisis y clasificación morfológica de los proyectos (análisis de las “formas” de los proyectos).
- La producción automática de gráficos, como imágenes de las formas de los proyectos<sup>87</sup>.
- La relación existente entre la morfología de los proyectos y la incertidumbre asociada a la duración total de los mismos.

El objetivo de la propuesta de Tavares es desarrollar un sistema de indicadores que sean suficientes para determinar la forma del proyecto (ver Figs. IV.1/2/3) y realizar un análisis estadístico de la duración total del mismo en función de esos indicadores. Sin entrar en el planteamiento conceptual de la red del proyecto y sus definiciones básicas, pasamos a exponer los detalles fundamentales para la comprensión de los “indicadores” propuestos por estos autores.

---

<sup>87</sup> Existe una tesis doctoral sobre este tema: Martí, R. (1993), del Departamento de Estadística e Investigación Operativa de la Universidad de Valencia.

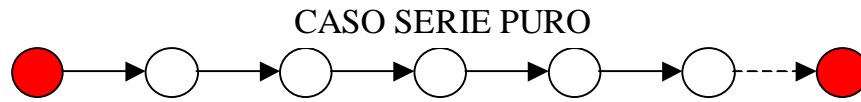


Fig. IV.1

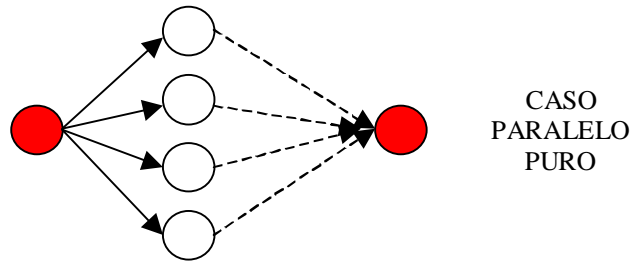


Fig. IV.2

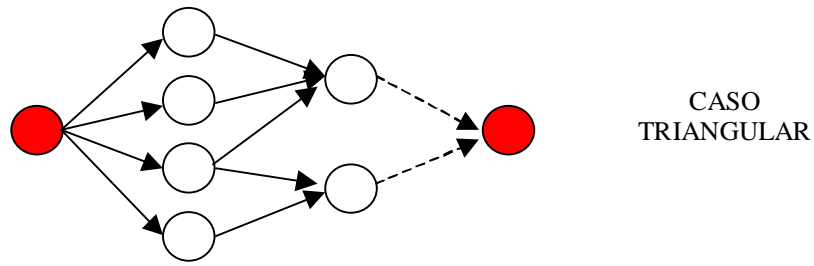


Fig. IV.3

### IV.3.3.1 Nivel jerárquico de la actividad

El análisis morfológico de un proyecto se sustenta en un concepto fundamental: El nivel jerárquico que ocupa cada actividad, pudiendo ser progresivo y regresivo. Esto nos permite considerar a aquél como una sucesión de etapas, correspondiendo cada etapa con un nivel. De este concepto se derivan las tres definiciones siguientes:

- a) Nivel progresivo de la actividad “*i*”:

$$a_i = \max_{j \in J(i)} a_j + 1$$

Donde  $J(i)$  es el conjunto de las actividades que de forma directa preceden a “*i*”. El valor máximo de  $a_i$  es denotado por “*M*”. Si  $J(i)$  es vacío, entonces  $a_i = 1$

representa el primer nivel del proyecto. El inicio de la red está representado por el nodo  $i = 0$  (nodo falso)<sup>88</sup>, al que corresponde el nivel cero.

b) Nivel regresivo de la actividad “ $i$ ”:

$$b_i = \min_{k \in K(i)} b_k - 1$$

Donde  $K(i)$  es el conjunto de las actividades que tienen a “ $i$ ” como directa precedente. Si  $K(i)$  es vacío, entonces  $b_i = M$ . Al nodo falso que representa el final del proyecto no se le asocia nivel alguno, siendo ficticias las relaciones de precedencia de este nodo (líneas a puntos en las figuras).

c) Nivel de flotación de la actividad “ $i$ ”:

$$\Delta_i = b_i - a_i$$

La flotación asociada a cada actividad “ $i$ ”, mide el grado de libertad para la colocación de “ $i$ ” en la etapa que mejor se considere. Como se aprecia en la Fig. IV.4, para el caso de  $i = 1, 2, 4, 5$  observamos que  $b_i = 2, a_i = 1$ , luego  $\Delta_i = 1$ . Para el caso de  $i = 6$  observamos que  $b_i = 2, a_i = 2$ , luego  $\Delta_i = 0$ .

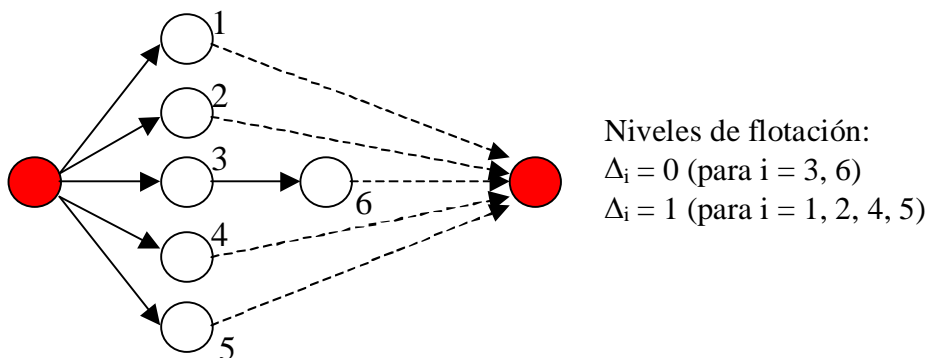


Fig. IV.4

<sup>88</sup> Traducción del término anglosajón “dummy node”.



### IV.3.3.2 Morfología de un proyecto

El concepto que se propone “morfología de un proyecto”, se define en función de las tres perspectivas siguientes:

- (a) La forma gráfica de la red, utilizando la representación de actividades en nodos (AoN), de todo el conjunto de actividades del proyecto ( $\Omega$ ).
- (b) El número de relaciones directas de precedencia no redundantes (D). Generalmente la complejidad de la red aumenta con D.
- (c) La longitud de las relaciones directas de precedencia no redundantes (L). La longitud  $L_{ji}$  de cada relación de precedencia ( $j$  a  $i$ ) se define como la diferencia entre el “nivel regresivo” de las dos actividades relacionadas.

Cada una de las anteriores perspectivas puede ser definida según ciertas características topológicas, que serán usadas para la definición de los indicadores morfológicos que se describen a continuación:

Indicador  $I_1$  (tamaño de la red), corresponde a la perspectiva “a” y lo definimos como el número de actividades del proyecto:

$$I_1 = N$$

Indicador  $I_2$  (longitud relativa), corresponde a la perspectiva “a” y para ello definimos primero la dimensión del camino más largo, medido en términos de los niveles jerárquicos  $M = \max a_i \quad (i \in \Omega)$ :

$$I_2 = (M - 1) / (N - 1), \quad 0 \leq I_2 \leq 1$$

Observación<sup>89</sup>: Este indicador podría ser denominado también “serie paralelo”, ya que cuando su valor es cero ( $M = 1$ ), representa el caso “paralelo puro” (ver

---

<sup>89</sup> Esta observación es nuestra.

Fig. IV.2) y cuando su valor es uno ( $M = N$ ), representa el caso “serie puro” (ver Fig. IV.1). Si  $M = N = 1$ , consideramos a  $I_2$  como 0 ó 1 indistintamente.

Indicador  $I_3$  (anchura relativa), corresponde a la perspectiva “a” y viene determinado por el número de actividades de cada nivel progresivo  $W(a)$ , con  $a = 1, \dots, M$ . Es evidente que  $W(1) + W(2) + \dots + W(M) = N$ . Este indicador sólo es significativo cuando  $N > M$ , quedando definido para cada nivel jerárquico de la forma:

$$I_3(a) = [W(a) - 1] / (N - M)$$

Puede deducirse fácilmente que:  $I_3(1) + I_3(2) + \dots + I_3(M) = 1$ .

Indicador  $I_4$  (complejidad de las relaciones de precedencia), corresponde a la perspectiva “b”. Previamente se define el número máximo de relaciones de precedencia de longitud unidad “ $D$ ”. Este parámetro  $D$ , se obtienen mediante la conexión de cada actividad “ $i$ ” del nivel “ $a$ ” ( $a = 1, 2, \dots, M - 1$ ), con todas las actividades del nivel  $a + 1$ . De esta forma,  $D$  viene dado por:  $D = W(1) + W(1)W(2) + W(2)W(3) + \dots + W(M-1)W(M)$ . Este indicador se refiere a las relaciones de precedencia de una determinada longitud “ $l$ ”, siendo su número  $n(l)$ . Es evidente que  $n(1) = D$  y  $n(l) \leq D$ , (ver Fig. IV.5). Queda definido de la forma:

$$I_4(l) = (D - N) / [n(l) - N], \quad 0 \leq I_4(l) \leq 1$$

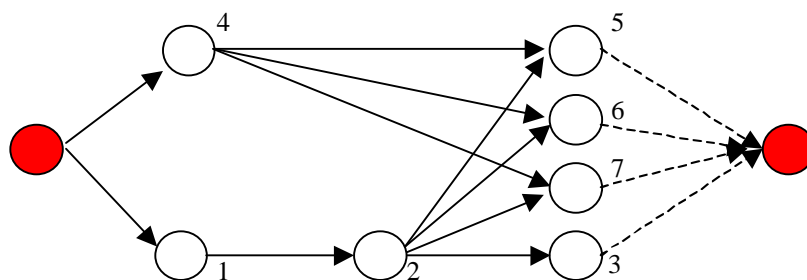
Indicador  $I_5$  (cociente, entre el número de relaciones de precedencia de una longitud dada y la longitud consecutiva anterior), corresponde a la perspectiva “c”. Normalmente el número de relaciones de precedencia de una longitud  $L$ ,  $n(L)$ , decrece con el valor de  $L$ , es decir:  $n(l + 1) \leq n(L)$ . Los valores posibles de  $L$  serán  $L = 1, 2, \dots, V$ , siendo  $V = M - 1$ . Este indicador queda definido de la forma:

$$I_5(L) = n(L + 1) / n(L), \quad 0 \leq I_5(L) \leq 1$$

Indicador  $I_6$  (relación entre la máxima longitud de las relaciones de precedencia y el número de niveles jerárquicos), corresponde a la perspectiva “c”. Este indicador queda definido de la forma:

$$I_6 = (V - 1) / (M - 1), \quad 0 \leq I_6 \leq 1$$

Ver un ejemplo de aplicación de los anteriores indicadores, en una sencilla red PERT que se represente en la Fig. IV.5.



Longitud de las relaciones de precedencia:  
 (4,5); (4,6); (4,7) = 2,  $n(2) = 3$   
 (1,2); (2,3); (2,5); (2,6); (2,7) = 1,  $n(1) = D = 5$

Indicador  $I_1 = 7$   
 Indicador  $I_2 = (3-1)/(7-1) = 1/3$   
 Indicador  $I_4(2) = (5-7)/(3-7) = 1/2$   
 Indicador  $I_5(1) = n(2)/n(1) = 3/5$   
 Indicador  $I_6 = (2-1)/(3-1) = 1/2$

Fig. IV.5

### IV.3.3.3 Resultados gráficos

Para poder analizar morfológicamente un proyecto, es preciso obtener la expresión gráfica de su red. Para ello se ha desarrollado un software específico, que convierte una tabla de actividades y relaciones de precedencia en un grafo tipo PERT, donde claramente se ven los diferentes niveles o etapas del proyecto. Ver aplicación para dos ejemplos en Tavares y otros (1999, pag. 516 y 517).

#### IV.3.3.4 Interpretación de los resultados

El análisis está realizado para dos supuestos que corresponden a actividades con diferentes formas de las funciones de distribución de sus tiempos asociados (caso de distribución normal y caso de distribución log-normal). Para cada conjunto de valores de los indicadores definidos anteriormente ( $I_1, \dots, I_6$ ), se generan un conjunto de “S” redes y para cada red un conjunto de “Z” tiempos. Se asume un valor de 1000 para el TP y se escalan los tiempos de las diferentes actividades de acuerdo con este valor. Los parámetros estimados para cada tiempo serán: su media ( $\mu$ ), su desviación típica ( $\sigma$ ), y los valores de los percentiles 95 y 5 ( $Q_{0,95}, Q_{0,05}$ ).

Los resultados de la simulación, recogidos en tablas para los diferentes valores de los indicadores, se muestran en Tavares y otros (1999, pag. 521 a la 537). Los rangos de variabilidad de los indicadores han sido elegidos en consonancia con los observados en la mayoría de los proyectos reales, en particular para  $I_4, I_5$  e  $I_6$ .  $I_3$  corresponde a la forma resultante<sup>90</sup> (ver Fig. IV.6) de tomar una anchura para el primer y último nivel de la mitad de la anchura correspondiente al nivel intermedio. Desde este nivel se irá reduciendo linealmente hasta los extremos, es decir:

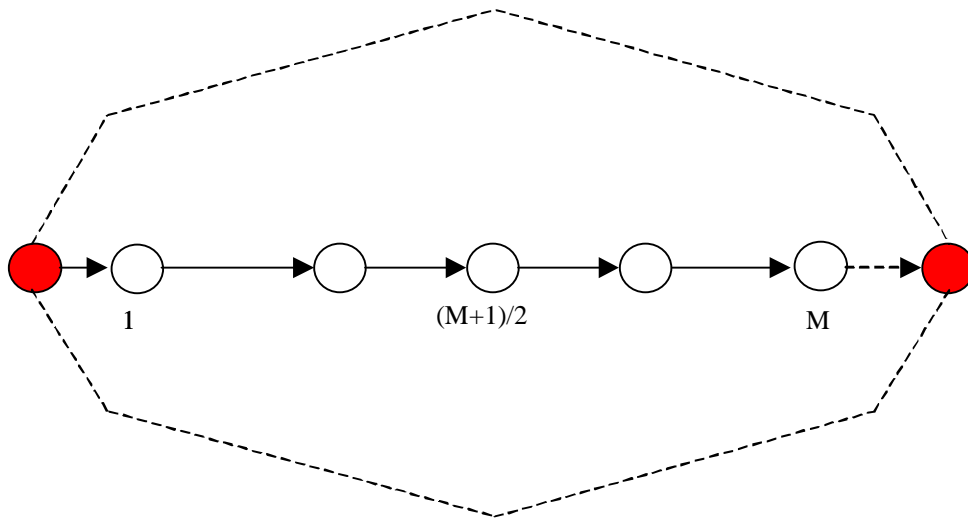
$$I_3(1) = I_3(M) = \frac{I_3\left(\frac{M+1}{2}\right)}{2}$$

Se han realizado los siguientes tipos de análisis:

- Los parámetros del tiempo del proyecto se han estudiado en función de  $I_1$  ( $I_1 = 10 \dots 100$ ), haciendo constantes a los restantes indicadores ( $I_2 = 0,20$ ;

<sup>90</sup> Interpretamos que no se ha considerado relevante este indicador, ya que este “aspecto” de la forma de la red del proyecto no aparecerá en los modelos del análisis. Sin embargo, como veremos más adelante, nosotros sí hemos observado que la “forma” de la red (perfil del proyecto) pudiera tener alguna influencia en los retrasos.

$I_4 = 0,10; I_5 = 0,20; I_6 = 0,20$ ). Los resultados muestran cómo  $\mu$ ,  $\sigma$ , y  $Q_{0,95}$ , decrecen con el valor de  $I_1$  (número de actividades), mientras  $Q_{0,05}$  crece con  $I_1$ . Por otra parte, en el caso de distribuciones del tipo log-normal, las distancias entre  $Q_{0,95}$  y  $\mu$  son mayores que las correspondientes al caso de distribuciones del tipo normal.



**Fig. IV.6**

- Los parámetros del tiempo del proyecto se han estudiado en función de  $I_2$  ( $I_2 = 0,1... 1$ ), haciendo constantes a los restantes indicadores ( $I_1 = 50; I_4 = 0,10; I_5 = 0,20; I_6 = 0,20$ ). Los resultados muestran un decrecimiento exponencial de  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $Q_{0,95}$ , y  $Q_{0,05}$  a medida que se incrementa  $I_2$  (desde el caso “casi paralelo” con  $I_2 = 0,1$  hasta el caso “serie” con  $I_2 = 1$ ). La distancia entre el valor estimado para  $\mu$  y la duración determinista ( $t = I$ ), está en el entorno del 25% cuando  $I_2 = 0,2$ , cayendo hasta el 10% cuando  $I_2 = 0,4$ . Se observa, además, cómo a medida que la red “se estira”  $\mu$  se va acercando al valor determinista (caso serie puro).
- Los parámetros del tiempo del proyecto se han estudiado en función de  $I_4$  ( $I_4 = 0... 0,5$ ), haciendo constantes a los restantes indicadores ( $I_1 = 50; I_2 = 0,20; I_5 = 0,20; I_6 = 0,20$ ). Los resultados muestran un incremento de  $\mu$ ,  $Q_{0,95}$ , y  $Q_{0,05}$  a medida que se incrementa  $I_4$ , manteniéndose  $\sigma$

prácticamente constante (cuando la distribución es del tipo log-normal, crece ligeramente).

- Los parámetros del tiempo del proyecto estudiados para los indicadores  $I_5$  e  $I_6$ , ( $I_5 = I_6 = 0 \dots 0,4$ ), haciendo constantes a los restantes indicadores ( $I_1 = 50$ ;  $I_2 = 0,20$ ;  $I_4 = 0,10$ ). Los resultados muestran que los parámetros de la distribución del tiempo del proyecto ( $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $Q_{0,95}$ , y  $Q_{0,05}$ ) no son sensibles a estos indicadores.

Con los resultados obtenidos se han construido dos modelos (lineal y cuadrático), que permiten obtener la estimación de los parámetros en función de los indicadores  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_4$  (morfología de la red del proyecto). Estos modelos obedecen a las expresiones siguientes:

- Modelo lineal:  $t_k = K_0 + K_1 * I_1 + K_2 * I_2 + K_3 * I_4$
- Modelo cuadrático:  $t_k = K_0 + K_1 * I_1 + K_2 * I_2 + K_3 * I_4 + K_4 * I_1^2 + K_5 * I_2^2 + K_6 * I_4^2 + K_7 * I_1 * I_2 + K_8 * I_1 * I_4 + K_9 * I_2 * I_4$

Para cada una de las funciones de distribución (normal y log-normal) y para cada parámetro de la distribución ( $t_k$ ), se ha obtenido una familia de valores para las constantes  $K_i$  (Tavares y otros, 1999; pag. 533).

#### **IV.4 EL RETRASO EN LOS PROYECTOS: Una observación extraída de la realidad**

Consideremos razonables los tiempos asignados a cada actividad, como resultado del juego entre los expertos evaluadores y los responsables de los proyectos. Entonces admitiremos como buenos los resultados de la planificación que conducen a un determinado TP. Si observamos cómo a medida que avanza el proyecto el cumplimiento de los hitos reales se está retrasando, debemos pensar

que existen otros factores que no han sido tenidos en cuenta al realizar la planificación.

Al principio, cuando aún queda mucho tiempo para la terminación del proyecto, no son preocupantes los desfases registrados ya que habrá tiempo para su compensación. Cuando no se ponen los medios necesarios para evitar los desfases, los retrasos irán en aumento a medida que avanza el proyecto. Si llegados a un punto el director del proyecto toma alguna medida correctora, es evidente que afectará a las actividades programadas para las siguientes fases del proyecto y no a las ya ejecutadas. Esto significa que se verán “presionados” los procesadores que acometen esas últimas actividades, como consecuencia del “relajamiento” de los procesadores de las actividades ya vencidas. Si las medidas se tomaron a tiempo se evitará o reducirá la demora del proyecto, pero a costa de la “sobrepresión” a la que han sido sometidos ciertos procesadores.

Si esa “presión” hubiera sido gestionada adecuadamente se habrían suprimido los desfases y se habría evitado el “sobreesfuerzo” de los procesadores encargados de las últimas actividades. En algunos casos (directores de proyectos expertos) hemos podido observar un intento de aplicar la “presión” desde las primeras actividades del proyecto, pero de una forma creciente o en el mejor de los casos de forma constante. Uno de los objetivos principales del presente trabajo es demostrar que cuando se aplica esa presión con la finalidad de reducir la demora del proyecto, debe hacerse de forma decreciente. Es evidente que esto contrasta con la práctica habitual en el seno de las organizaciones que desarrollan proyectos.

#### **IV.5 EL RETRASO EN LOS PROYECTOS: Nuestra propuesta**

La observación que brevemente se ha descrito en el punto anterior no es más que la consecuencia de la “relajación” de los procesadores implicados en el

proyecto, cuando se enfrentan al desarrollo de su actividad. Esa relajación se manifiesta con diferente intensidad dependiendo del lugar que, la actividad en cuestión, ocupe en la planificación.

La Teoría del Efecto Relajación, que proponemos a lo largo del presente trabajo, trata de explicar ciertos aspectos de la actitud del procesador cuando se enfrenta a la ejecución de una actividad en el contexto de un proyecto, en el sentido de que normalmente se genera un retraso en su terminación. Pero ese “aspecto” no se manifiesta con la misma intensidad a lo largo de todo el periodo de ejecución del mismo, sino que, según nuestra hipótesis, esa intensidad es decreciente. Así pues, la presión<sup>91</sup> que se ejerza sobre el procesador sería la justa para compensar ese aspecto de su actitud, cuando se aplique adecuadamente, es decir, de forma decreciente. En consecuencia, será necesario evaluar el referido aspecto de la actitud del procesador, con el fin de aplicar la presión justa. Pero, ¿cómo convencer a los directores de proyectos para que ejerzan una presión decreciente?

Cabría pensar que una forma de compensar el efecto relajación sería el establecimiento de hitos o metas parciales, intentando conseguir que el horizonte temporal<sup>92</sup> de cada actividad sea más corto. El establecimiento de estas metas parciales requeriría un estrecho control y concienciación del equipo del proyecto que, según nuestra opinión, difícilmente obtendría los resultados buscados. Bastará considerar al proyecto como un ente indivisible desde el punto de vista de los objetivos. El director del proyecto tiene la vista puesta en la fecha de conclusión del mismo, de forma que el cumplimiento de hitos parciales le da una información útil para su control, pero no constituyen metas en sí mismos. Las metas parciales son objetivos deseables, pero no fundamentales.

---

<sup>91</sup> Ver definición de “presión sobre el procesador” en el punto III.5.3.

<sup>92</sup> Ver definición de “horizonte temporal” en el punto III.3.5. Por otra parte, hemos observado en la práctica cómo a veces se establecen hitos parciales (normalmente para la finalización de actividades de alguna forma relevantes para el proyecto), en este caso se observa más “puntualidad” en la terminación de esa actividad. Su traslación a la terminación del proyecto dependerá de si está o no en el camino crítico.



## IV.6 CONCLUSIONES

Han sido muchos los autores que, si no de forma explícita sí implícitamente, se han referido al problema de la dimensión temporal del proyecto. La selección de artículos comentados la hemos realizado entre aquellos que explícitamente han propuesto alternativas para contrarrestar el efecto asimétrico de esa incertidumbre asociada a la fecha de terminación de los proyectos. La bibliografía expuesta, donde se manifiesta la preocupación que siempre ha existido sobre este tema, se refiere a proyectos en general y en algún caso a proyectos de I+D o de construcción, sin descender a las particularidades de los proyectos de Plantas Industriales enmarcados en el objeto del presente trabajo, que están a medio camino entre aquéllos. Como se habrá observado, son escasos los trabajos en los que los retrasos se hacen imputables a aspectos inherentes al entorno o contexto en que se desarrollan los proyectos (Organización) o sus agentes (director del proyecto, procesadores y otros).

A modo de resumen reflejamos a continuación una clasificación de los diferentes enfoques observados:

- (a) Para algunos autores, la causa principal del “optimismo” resultante del cálculo del TP, es el tratamiento determinista dado a los datos que se refieren a los TA. (Fulkerson, 1962; Schonberger, 1981; Golenko y Gonik, 1997; Tavares, 1994).
- (b) Otros se refieren a que no existen conocimientos suficientes para saber cómo determinados factores, inherentes a los sujetos estimadores<sup>93</sup> de los TA, pueden afectar a la incertidumbre asociada al resultado obtenido para el TP (King y Wilson, 1967; King y otros, 1967; Liu y Horowitz, 1989).
- (c) Determinados autores buscan la existencia de cierta correlación entre la incertidumbre asociada a la obtención del TP y determinados aspectos de la

---

<sup>93</sup> Nos estamos refiriendo a la fuerte carga subjetiva que rodea a las estimaciones de los tiempos de ejecución de las actividades.

red del proyecto o los “inputs” utilizados para los cálculos del TP (Klingel, 1966; Kamburowski, 1985a; Tavares y otros, 1999).

- (d) Por último, está el caso de Littlefield y Randolph (1991), que opinan que cualquier acción que se tome dirigida a la compensación de los esperados retrasos en las fechas de terminación de los proyectos, resultaría ineficaz al actuar el efecto Parkinson.

Así pues, ante las observaciones extraídas de la realidad, una parte de los estudiosos del tema han intentado explicar el retraso de los proyectos por la vía imputar la causa a cálculos defectuosos del TA, utilizados como inputs para la obtención del TP. Según nuestra opinión, esto explicaría una de las diferentes componentes de la causa de los retrasos, pero quizás no la más importante desde el punto de vista cuantitativo.

Otra parte de esos estudios ha supuesto la existencia de factores de difícil medición por ser inherentes al sujeto estimador, a la naturaleza de las actividades o a la forma de organizar esas actividades. En esta línea creemos que están los planteamientos en que fundamentamos nuestra Teoría del Efecto Relajación, afectando más a otra parte del problema escasamente citada: El procesador.

Si aún se sigue planteando el interrogante sobre porqué se retrasan los proyectos es porque las soluciones aportadas hasta la fecha no son satisfactorias. Con seguridad existen Organizaciones en las que aquéllos no tienen demoras o son mínimas, ¿no será porque aplican algunas técnicas propias no explicitadas que aportan algo útil a la solución del problema?

## LA TORTUGA Y LA LIEBRE

*Una vieja tortuga dijo a una ágil liebre que apostaba a correr con ella. La liebre se extrañó, pero aceptó.*

*Ambas emprendieron al mismo tiempo su carrera. La liebre corrió en un momento tanto trecho que, aprovechando su paso por un prado de fresca hierba, tuvo tiempo de detenerse a comer. Después de comer se echó a dormir. ¡Venía tan despacio la tortuga que le sobraría tiempo!*

*A pesar de todo, la tortuga seguía su camino, sin detenerse nunca. La liebre, cada vez más confiada en su fácil triunfo, se encontró con unas compañeras y se entretuvo con ellas. Cuando de repente, se acordó de su apuesta, y en dos brincos se puso en la meta que había acordado. Cuando llegó se sorprendió de que la tortuga ya estuviera allí: no había dado rodeos ni había perdido un minuto.*

*Esopo.*

## CAPÍTULO V

### EL EFECTO RELAJACIÓN: MODELOS EXPLICATIVOS

#### V.1 INTRODUCCIÓN

En la Grecia del siglo VI a.C., donde la leyenda sitúa al fabulista Esopo, ya preocupaban algunos aspectos del comportamiento “relajado”, como se pone de manifiesto en la fábula “La tortuga y la liebre”. La tortuga es el lento, pero inexorable paso del tiempo. La liebre es el equipo de procesadores de un proyecto, que confiado en sus propias posibilidades ve la meta aun lejana, permitiéndose un cierto relajamiento. Pero cuando el horizonte temporal se ha reducido y advierte su retraso, ni con un esfuerzo adicional consigue cumplir sus objetivos.

Después de la exposición y análisis realizados en el capítulo anterior, relativo a las diferentes interpretaciones de las posibles causas de los retrasos en que tan habitualmente incurren los proyectos, realizamos nuestro particular

planteamiento del problema. Trataremos de dar una explicación a lo que suponemos una de las componentes de los retrasos de los proyectos.

No tenemos constancia de que anteriormente se haya analizado, expuesto o modelado, lo que consideramos una componente más del problema que venimos estudiando desde el capítulo III. Esa componente reflejaría cierta “actitud” inherente al procesador y su entorno, y en general a la Organización en cuyo seno se desarrollan los proyectos. A la actitud con que el procesador se enfrenta a la actividad le asociaremos el concepto de “intensidad”, siguiendo a Leachman, pero con matices diferenciales.

Aunque ciertos autores se han referido a determinados aspectos de algunas técnicas para la Planificación de Proyectos que afectarían al modo de obtener los TA y los TP, o simplemente sus medias y varianzas, hemos encontrado pocas referencias concretas al aspecto que aquí queremos tratar. Por ejemplo, Schonberger dice “podríamos suponer que los sistemas de simulación llevan implícitos determinados factores de comportamiento, cuantitativos y organizativos de difícil evaluación” (Schonberger, 1981).

Hughes no se refiere de forma explícita al Efecto Relajación (*ER*), pero sí se acerca algo más a nuestro planteamiento cuando se refiere a la influencia del entorno en el progreso de un proyecto. Además menciona cómo los mecanismos de recompensa inciden en el comportamiento de los procesadores (Hughes, 1986).

También Tavares se acerca a nuestro planteamiento cuando dice “La eficiencia depende de condiciones internas como organización, motivación, cualificación profesional y otras externas como el entorno y sociales y económicas” (Tavares, 1997).

El *ER*, en menor o mayor medida, se puede observar en todos los ámbitos de la planificación. Aquí trataremos del caso específico de la Planificación de Proyectos de Plantas Industriales. Si atendemos a cada una de las fases del proyecto de una *PI*, (Ingeniería Básica, Ingeniería de Detalle y Construcción), observamos cómo la definición de las actividades resulta más clara y objetiva en cada fase. El objeto de este análisis se centra en la fase intermedia (Ingeniería de detalle), teniendo en cuenta que es la más extensa y que en ella las actividades presentan claridad y objetividad medias.

## **V.2 DESCRIPCIÓN, TRATAMIENTO Y FUNDAMENTOS DEL EFECTO RELAJACIÓN**

Aunque parece difícil la empresa de dar forma a una observación que con toda seguridad parecerá evidente, y que además pertenece al ámbito del comportamiento del individuo en el seno de una Organización, creemos que es de interés su estudio por lo que pudiera aportar al tratamiento de los recursos asignados a los proyectos y a la economía de los mismos. A continuación daremos nuestra “visión” del *ER* y su posible tratamiento.

### **V.2.1 Descripción del Efecto Relajación**

El procesador, al iniciar su actividad, realiza una asociación mental con los datos conocidos y su entorno, cuyo resultado es la adopción de una determinada actitud frente al desarrollo de esa actividad. La clave de esa asociación consideramos que es básicamente la “distancia temporal” existente entre el inicio de la actividad y la fecha de finalización del proyecto (lo que hemos llamado horizonte temporal de la actividad, ver definición en el punto III.3.5). El resultado de esa asociación le hace adoptar una posición más o menos relajada frente a la actividad en cuestión, que de alguna forma afectará al tiempo real de

ejecución de la misma. De ahí la denominación (efecto relajación) que hemos adoptado para referirnos a esta manifestación. La consecuencia de esa relajación será una demora en la conclusión de la actividad presente que, si está en el camino crítico, se trasladará íntegramente a la fecha de conclusión del Proyecto<sup>94</sup>.

Creemos que esa postura del procesador no es premeditada (ver definición del *ER* anticipada en el punto III.5.2). Simplemente acomete su actividad con la sensación de que, al estar tan lejana la fecha de finalización del proyecto, no es necesario apresurarse en su cometido, ya que los posibles efectos se habrían diluido. Por lo tanto, se trata de un aspecto psicológico del procesador y, como tal, lo suficientemente complejo como para que existan otros factores adicionales de más difícil medición que el que aquí se contempla (distancia temporal).

Por tratarse de una actitud personal, aunque dependiendo del entorno, es razonable pensar que cada procesador que interviene en un determinado proyecto se enfrenta a sus actividades con una actitud determinada. La consecuencia será un *ER* dependiente del procesador. Aún siendo ésta la posición que defendemos, asumiremos que el efecto “entorno” es predominante y, en consecuencia, supondremos un sólo *ER* típico de cada Organización<sup>95</sup> (a la que otras veces nos referiremos como “entorno” en el contexto del *ER*, o también, binomio Organización-procesador). El *ER*, si existe, estará siempre presente, por lo que lo importante es evaluarlo para considerarlo en los cálculos. El proceso de valoración debe ser continuo y fundamentarse en la historia pasada de la Organización (proyectos ejecutados y sus retrasos).

La actuación más relajada de los procesadores que intervienen en las primeras etapas del proyecto, que derivarán en retrasos acumulados, será la

---

<sup>94</sup> “Es evidente que el retraso de una actividad que está en el camino crítico se traslada íntegramente al proyecto”, MacCrimmon (1964).

<sup>95</sup> Aunque la “actitud” de los procesadores será diferente en el corto plazo, en la realidad se observa cómo en el largo plazo converge.

principal causa de la presión que recaerá sobre los procesadores que desarrollan sus actividades en las últimas fases.

El tema que aquí se está planteando guarda alguna relación con la conocida “Ley de Parkinson” (Parkinson, 1962). Según esta ley, cuando a una actividad se le ha asignado un tiempo de ejecución, el procesador adaptará su ritmo de trabajo para “llenar” el tiempo asignado. A este fenómeno hacen mención algunos autores (Schonberger, 1981; entre otros), preocupados por la incidencia que tendría el incrementar el tiempo asignado a las actividades, al tratar de resolver el problema de las estimaciones demasiado optimistas. En realidad, si no fuera porque existe “algo más”, no sería preocupante la Ley de Parkinson. Es cierto que el procesador tratará de llenar el tiempo asignado a las diferentes actividades, pero, además, también es cierto que se enfrentará, según los casos, con diferente actitud al desarrollo de la actividad. Según sea esa actitud, optimista o pesimista, podrá ocurrir que le falte tiempo (optimista) o que tenga suficiente con el tiempo asignado (pesimista). Nuestra hipótesis es que la gradación optimista-pesimista discurre en el mismo sentido en que disminuye el *HT* de la actividad. El extremo izquierdo de esa gradación corresponde al inicio del proyecto (relajación máxima), mientras que el otro extremo corresponde al momento en que teóricamente debiera concluir el proyecto (tiempo estimado), que hacemos corresponder con una relajación nula.

Con este planteamiento intentaremos construir modelos que expliquen estas observaciones extraídas de la realidad. Este intento de modelización se realizará en dos fases, la primera tratará de explicar el concepto de intensidad de la actividad, su relación con el *ER* y la presión sobre el procesador, para lo que proponemos una familia de modelos. Cada modelo se refiere a una visión particular de la evolución de la referida intensidad de la actividad. Con el fin de observar los matices diferenciales en cada caso, construiremos dos modelos (MABIT y MAPIT) que expresen formas razonables para la evolución de la intensidad. La segunda fase tratará del proyecto en su conjunto, planteando un

modelo que explique el retraso en los proyectos con relación al *ER*. Se analizará en detalle el modelo general “modelo lineal de recursos crecientes-decrecientes” (MLRCD) y se verá un caso particular del mismo (recursos constantes).

Una variante a este planteamiento sería considerar una actualización continua del tiempo estimado para completar el proyecto, lo que implicaría introducir variabilidad en el extremo derecho del intervalo “horizonte temporal” de la actividad. Así, la gradación, a la que anteriormente se ha hecho referencia, tendría el extremo derecho localizado en el momento de conclusión real del proyecto. La complejidad de cálculo asociada a esta variante, en particular al abordar el modelo MLRCD, hacen recomendable no contemplarla en el presente, con el fin de no alargar excesivamente este trabajo.

## V.2.2 Tratamiento del Efecto Relajación

Basándonos en la exposición del punto anterior, consideramos que sería útil tratar de desarrollar una teoría que clarifique algunas de las causas de porqué los proyectos se concluyen (casi siempre) después de la fecha inicialmente estimada. La conclusión que debe obtenerse de la comprensión de la que estamos llamando “Teoría del Efecto Relajación”, es la evaluación del *ER* como constante del entorno (binomio Organización-procesador), tomando como referencia el retraso en que normalmente vienen incurriendo los proyectos. El resultado de esa evaluación debe servir como dato para definir una determinada “actuación a tiempo”, aplicando adecuadamente lo que venimos denominando “presión sobre el procesador” (ver definición en el punto III.5.3).

El *ER* posiblemente pueda compensarse, pero primero se deberá detectar y evaluar. La posible compensación entendemos que sería factible por cualquiera de las dos vías:



- Vía coercitiva: Consistiría en el establecimiento de mecanismos de seguimiento y control sobre el avance de las actividades que desarrollan los diferentes procesadores. Es lo que venimos llamando “presión sobre el procesador”.
- Vía participativa: Consistiría en el establecimiento de mecanismos de integración y participación del procesador en el proyecto, lo que se traduciría en un entorno favorable a una reducción natural del *ER*.

Los dos mecanismos mencionados se aplican, en mayor o menor grado, en las organizaciones que desarrollan proyectos. Lo que ocurre, a nuestro entender, es que no se aplican de forma coherente. La teoría del *ER* que presentaremos a continuación, intentará explicar y cuantificar el fenómeno del *ER*, permitiendo su compensación mediante la aplicación de los referidos mecanismo de forma más eficiente.

### V.2.3 Fundamentos del Efecto Relajación

El enfoque, desarrollo y modelización del *ER* se sustentará en las siguientes hipótesis fundamentales o axiomas:

- El tiempo asignado a una actividad, independientemente del procedimiento utilizado para su determinación, será considerado como “técnicamente perfecto” (no se pondrá en tela de juicio su validez). Será el correspondiente al modo de ejecución estándar (ver definición en el punto III.3.2).
- Los procesadores, cuando acometen el desarrollo de una actividad, conocen el tiempo asignado a la misma (TA).
- Los procesadores, cuando acometen el desarrollo de una actividad, conocen la fecha en que el proyecto debe estar concluido (el TP es conocido).
- La relación entre los dos tiempos conocidos (TA/TP) es suficientemente pequeña.

- Los procesadores, mientras ejecutan una actividad, lo hacen con una intensidad variable, no obstante, a efectos del cómputo del tiempo del proyecto consideraremos el valor medio resultante.
- Cuando un procesador ejecuta su actividad en menor tiempo que el asignado, la intensidad media ha sido superior a la estándar. En caso contrario habrá sido inferior (es cuando nos referimos a la existencia de efecto relajación).

### V.3 MODELOS EXPLICATIVOS DE LA ACTIVIDAD

Con el fin de sustentar el concepto de efecto relajación, analizaremos la actitud del procesador frente al desarrollo de la actividad mediante una familia de modelos que expliquen cómo progresa la actividad, reflejándose en la “función de intensidad instantánea de la actividad”  $I(\alpha, w)$ , definida en III.6.3. Recordemos que esta función está formada por otras dos funciones (“ $z_1(\alpha, w)$ ” y “ $z_2(w)$ ”), donde  $z_2(w)$  o “función de modos de ejecución” expresa una visión estática de la actividad, como lugar geométrico de los diferentes modos de ejecutar la misma. La función  $z_1(\alpha, w)$  expresa la evolución de la intensidad instantánea de la actividad durante su desarrollo hasta el instante en que corta a la función  $z_2(w)$ . La familia de modelos que proponemos se caracteriza por fundamentarse en determinadas funciones  $z_1(\alpha, w)$  en las que siempre se verificará:

$$\frac{\partial z_1(\alpha, w)}{\partial w} \geq 0 \quad [\text{V.1}]$$

La función  $z_1(\alpha, w)$  es la que determinará los diferentes modelos que explican la actitud de los procesadores para un entorno dado, al recoger en su “forma” diferentes supuestos evolutivos de la intensidad instantánea con que se ejecutan las actividades. A modo de ejemplo general se reflejan en las Figs. V.1

y V.2<sup>96</sup> funciones  $z_I(\alpha, w)$  que no verifican la expresión [V.1], con el fin de ilustrar un caso menos restrictivo donde se pone de manifiesto que lo relevante es el valor medio de la intensidad en el intervalo de ejecución de la actividad, es decir:

$$\frac{\int_0^{w_r} z_I(\alpha, w) dw}{w_r} = z_t = 1 - k_t \quad [\text{V.2}]$$

La Fig. V.1 se refiere a la gráfica de una función  $z_I(\alpha, w)$  en la que  $k_t = 0$ , o lo que es lo mismo  $z_t = 1$ , correspondiendo al modo de ejecución estándar.

Para que se verifique la expresión [V.2], que es la intensidad media de una actividad, es preciso que se cumpla:

$$\int_0^{w_r} z_I(\alpha, w) dw = w_e \quad [\text{V.3}]$$

La expresión anterior encierra la clave del funcionamiento de esta familia de modelos. Está indicando que sea cual sea el tiempo empleado en el desarrollo de la actividad ( $w_r$ ), la utilidad aportada al proyecto será la obtenida en el proceso de estimación ( $w_e$ ). En la Fig. V.2 observamos cómo la existencia de *ER* hace que el valor medio de la intensidad sea inferior a la unidad (concretamente 0,9), verificándose la expresión [V.3]. Si quisiéramos actuar para compensar totalmente el *ER* o lo que es lo mismo, hacer que  $w_r = w_e$ , deberíamos incidir sobre la función  $z_I(\alpha, w)$  actuando sobre el parámetro  $\alpha$  hasta que la expresión [V.2] tenga por valor la unidad. En este caso, si sustituimos  $w_r$  por  $w_e$  en cualquiera de las expresiones [V.2] o [V.3], obtendremos:

$$\int_0^{w_e} z_I(\alpha, w) dw = w_e \quad [\text{V.4}]$$

<sup>96</sup> Las zonas sombreadas de las figuras V.1 y V.2, expresan los momentos en que la intensidad instantánea de la actividad es diferente a su valor medio.

De la expresión anterior ([V.4]) obtendríamos el valor del parámetro  $\alpha$  que sería una cuantificación de las acciones correctoras a realizar para conseguir una compensación total del *ER*.

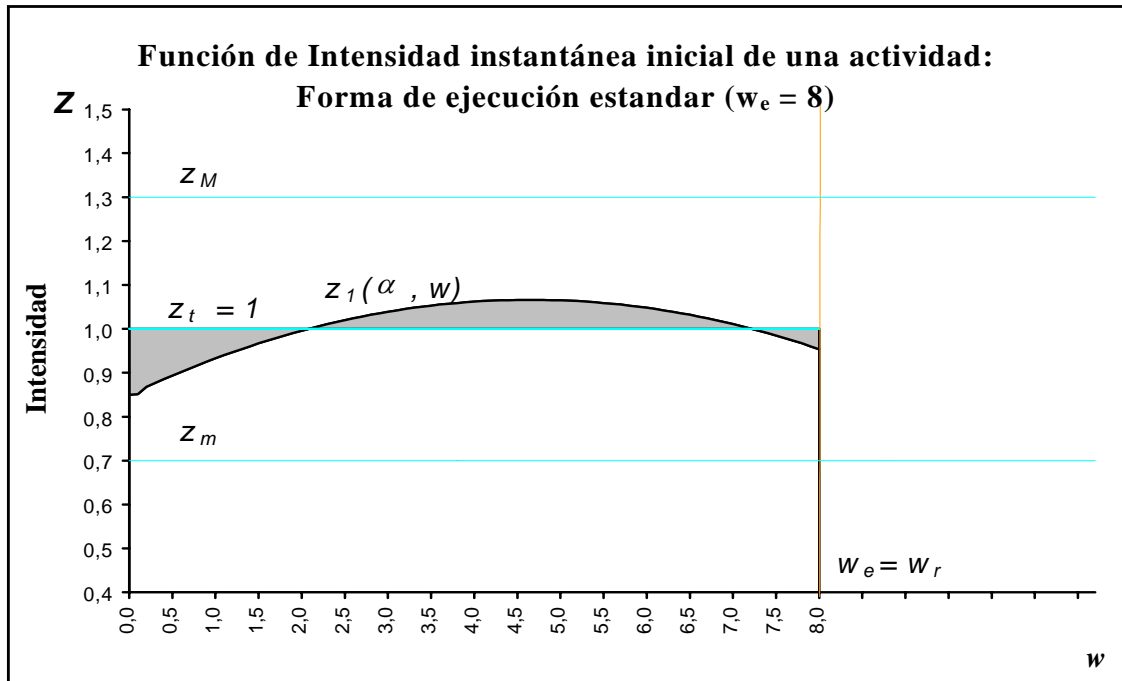


Fig. V.1

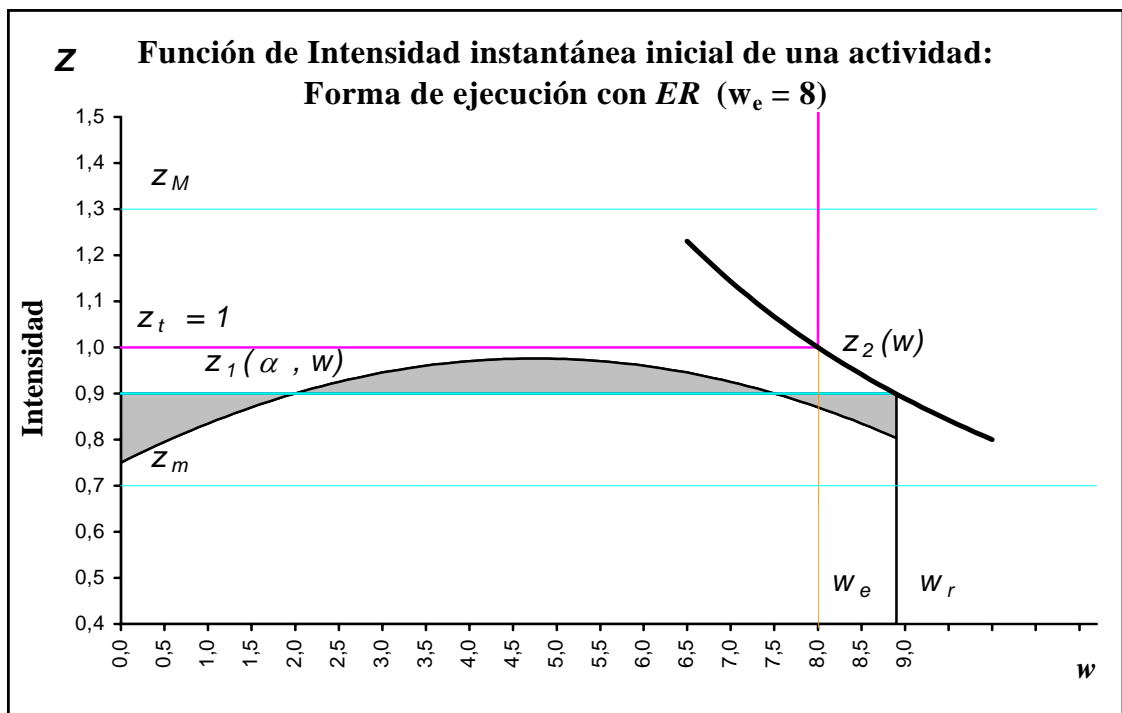


Fig. V.2

Sería imposible medir la intensidad con que se ejecuta una actividad real en cada instante de su desarrollo. La práctica induce a pensar que, si fuera posible, se trataría de una función (en sentido matemático) muy compleja. Además, infinidad de formas de evolución podrían dar lugar al mismo valor medio. Las Figs. V.1 y V.2 muestran una posible forma de evolución de una actividad, cuya utilidad está valorada en 8uds. en ausencia de *ER* y con cierto *ER* (de valor 0,1) respectivamente. (Nótese que cuando las funciones  $z_I(\alpha, w)$  y  $z_2(w)$  no se cortan, en el intervalo de ejecución de la actividad se verifica:  $z_I(\alpha, w) = I(\alpha, w)$ ).

En el ejemplo introductorio expuesto (Figs. V.1 y V.2) aparecen los límites superior ( $z_M$ , que correspondería a la máxima aceleración) e inferior ( $z_m$ , que correspondería a la máxima relajación) para la intensidad instantánea de la actividad. Como ya se indicó en el punto III.5.1, esos límites son exógenos al modelo. Será la observación de la realidad la que determine los valores más adecuados a los mismos (Leachman y otros, 1990). Nos hemos inspirado en Leachman para considerarlos en nuestros modelos, aunque en algún caso admitamos que circunstancialmente los valores instantáneos puedan estar fuera de esos límites. Como lo relevante para nosotros es el valor medio de la intensidad en el intervalo de ejecución de la actividad, diremos que esos límites se aplican al valor medio ( $z_t$ ).

Podríamos hacer conjeturas sobre modelos de comportamiento del procesador, cada uno de los cuales daría lugar a una función  $z_I(\alpha, w)$  diferente. Con el fin de no alargar excesivamente este capítulo, se presentarán sólo dos modelos. El primero, que denominaremos “Modelo de Actividad Básico Intensidad-Tiempo” (MABIT), está caracterizado por una función  $z_I(\alpha, w)$  lineal (ver Fig. V.3). El segundo, que denominaremos “Modelo de Actividad Potencial Intensidad-Tiempo” (MAPIT), está caracterizado por una función  $z_I(\alpha, w)$  potencial (ver Fig. V.4).

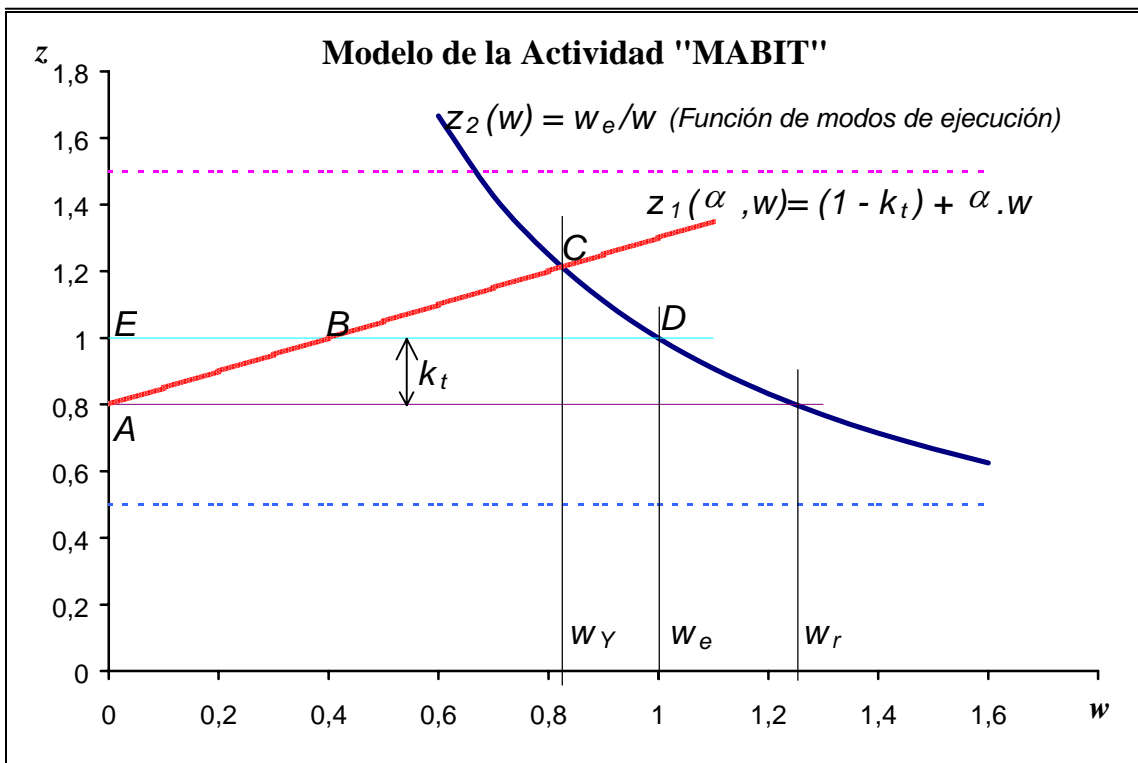


Fig. V.3

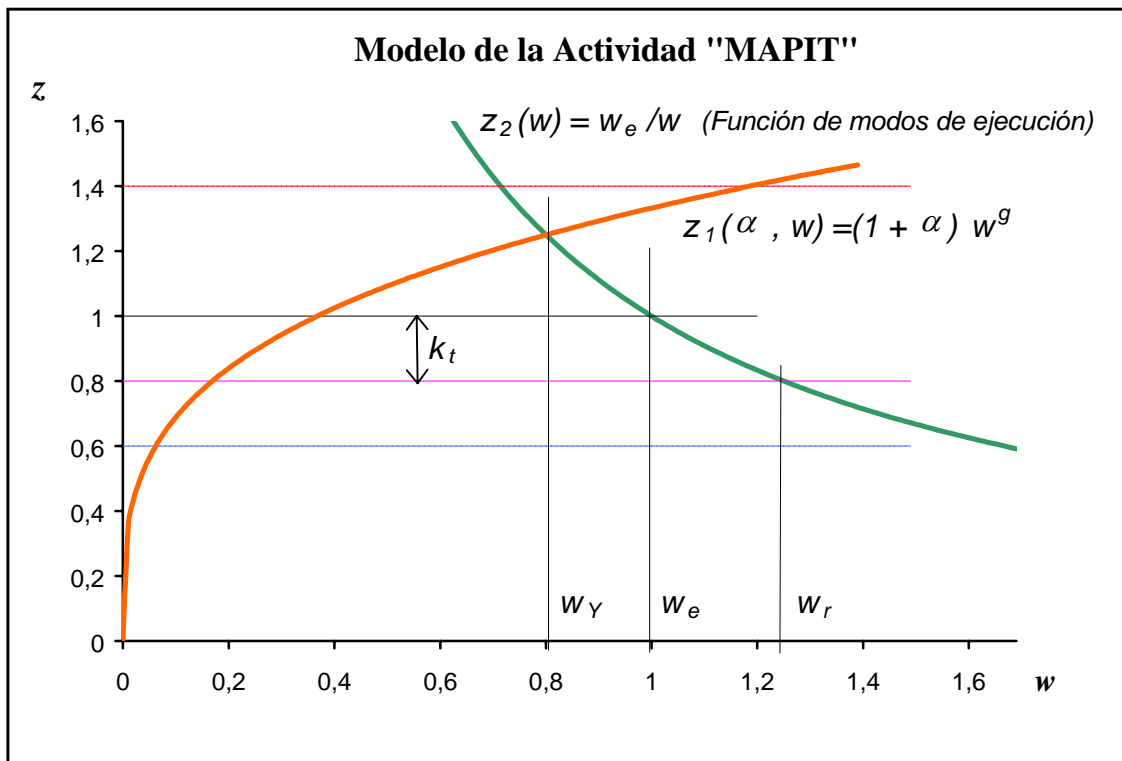


Fig. V.4

Para la elaboración de los modelos nos inspiramos en Leachman, pero estableciendo los elementos diferenciales que sean precisos. Como ya se ha indicado en el capítulo III, nuestro concepto de “intensidad de la actividad” se fundamenta en criterios diferentes, pero creemos muy aprovechables algunos de los elementos básicos de Leachman.

### V.3.1 Planteamiento general para los modelos explicativos

Consideraremos un proyecto caracterizado por una red del tipo PERT, formada por  $N$  actividades ( $A_1, A_2, \dots, A_N$ ), situadas en los nodos de dicha red. El proyecto, como ya se ha dicho con anterioridad, trata del desarrollo de la ingeniería de detalle de una Planta Industrial. Los recursos necesarios para ese desarrollo son horas-hombre ( $hh$ ) aportadas por un conjunto de procesadores que conforman el equipo del proyecto y pertenecen a diferentes especialidades, dentro de la Organización (Ingeniería).

Cada actividad  $A_i$  consume recursos de sólo un determinado procesador que mediremos en  $hh$ . Lo relevante para el análisis que nos ocupa es el instante “ $t$ ” en que se inicia esa actividad ( $0 \leq t < T_E$ ), por lo que prescindiremos del subíndice “ $i$ ” cuando nos refiramos a cualquier concepto relacionado con la actividad en cuestión. El tiempo transcurrido desde el inicio hasta su finalización dará la cantidad de recurso consumido; es lo que hemos definido como “tiempo real de la actividad” ( $w_r$ ), frente al “tiempo estimado (estándar) para la ejecución de la actividad” ( $w_e$ ), que sirve también como medida de la utilidad aportada al proyecto por la misma. La realidad viene mostrando que  $(w_r) > (w_e)$ .

Consideraremos que la medida de la utilidad aportada por la actividad ( $w_e$ ) está bien fundamentada, independientemente del procedimiento utilizado para su obtención. Por otra parte, supondremos que no han existido imprevistos que justifiquen por sí mismos el retraso en que se ha incurrido de valor  $w_r - w_e$ . En

este caso sólo cabe achacar el retraso a algo inherente al procesador: su actitud frente al desarrollo de la actividad, que se habrá traducido en un “ritmo” o “intensidad de la actividad”, cuyo valor medio ( $z_t$ ) será inferior al considerado normal de valor unidad (ver definición de intensidad media de una actividad en el punto III.5.1).

#### V.4 MODELO DE ACTIVIDAD BÁSICO INTENSIDAD-TIEMPO (MABIT)

Este modelo ya se introdujo en el capítulo III en sus aspectos fundamentales, con el fin de anticipar la comprensión del objeto de este trabajo. Aquí lo analizaremos con más detalle, sirviendo de plataforma para la presentación del segundo modelo.

El carácter fundamental de este modelo radica en la forma de la función  $z_I(\alpha, w)$ . Para perfilar esta función se han realizado los siguientes supuestos:

- Se trata de una función lineal.
- La intensidad con que se desarrolla la actividad es constante en ausencia de mecanismos compensadores del ER ( $\alpha = 0$ ), siendo su valor:  $I - k_t$ .
- En consecuencia y de acuerdo con la premisa anterior, el tiempo real de ejecución de la actividad será:  $w_r = w_e / (I - k_t)$ .
- La única forma de reducir  $w_r$  acercándolo a  $w_e$ , es aumentar la pendiente de esta función. Este sería el mecanismo compensador del ER.

Se trata de una función lineal de pendiente  $\alpha$  y ordenada en el origen  $I - k_t$ , (ver Fig. V.3):

$$z_I(\alpha, w) = I - k_t + \alpha w \quad [\text{V.5}]$$

Cuando  $\alpha = 0$ , es decir, en ausencia de mecanismos correctores del ER esta función corta a  $z_2(w) = w_e / w$  (función de modos de ejecución) en un punto que



determina el tiempo de ejecución real de la actividad ( $w_r$ ) cuando le es aplicable un factor de relajación  $k_r$  (en la Fig. V-3 se ha supuesto  $k_r = 0,2$ ).

La función de intensidad instantánea de la actividad “ $I(\alpha, w)$ ”, que se determina para este modelo de acuerdo con la definición dada en III.6.3, es la que se refleja a continuación:

$$I(\alpha, w) = \text{mín}\{ 1 - k_r + \alpha w, w_e / w \}, \text{ para } 0 \leq w \leq w_r \quad [\text{V.6}]$$

Esta función será la que utilizaremos para establecer las relaciones analíticas que nos conducirán a la obtención del parámetro  $\alpha$  adecuado a una determinada compensación del *ER*. Más adelante estableceremos esas relaciones, pero encaminadas a una compensación total del *ER*, es decir, haciendo coincidir el tiempo  $w_r$  con el  $w_e$ , en este caso la expresión [V.6] se transforma en la siguiente:

$$I(\alpha, w) = \text{mín}\{ 1 - k_r + \alpha w, w_e / w \}, \text{ para } 0 \leq w \leq w_e \quad [\text{V.7}]$$

En este modelo, teniendo en cuenta la expresión [V.7] y que las funciones  $z_1(\alpha, w)$  y  $z_2(w)$  se cortan, la expresión [V.4] quedaría de la forma:

$$\int_0^{w_e} I(\alpha, w) dw = w_e \quad [\text{V.8}]$$

#### V.4.1 Funcionamiento del Modelo “MABIT”

Como ya se ha venido avanzando, este modelo tratará de expresar la respuesta del procesador cuando se enfrenta a una actividad, en un entorno en el que se compensa el *ER*. Con las hipótesis que se plantean a continuación, se

obtiene una función intensidad-tiempo en el intervalo de ejecución de la actividad, que obedece a la expresión [V.7].

Suponemos que el procesador comienza su actividad afectada por el ER que corresponda a ese momento (instante “ $t$ ” del proyecto), o lo que es lo mismo, la intensidad de partida será de valor  $I - k_t$  (no manifiesta inercia al inicio de su actividad). Al suponer la existencia de un control en tiempo real sobre la marcha y avance del proyecto, desde el primer momento recibe los impulsos justos correspondientes a la “presión” que, en esas circunstancias, se requiere. La presión recibida se traducirá en una senda de intensidad creciente, de forma lineal de pendiente  $\alpha$ , hasta alcanzar la intensidad máxima en el instante  $w_Y$  (Fig. V.5).

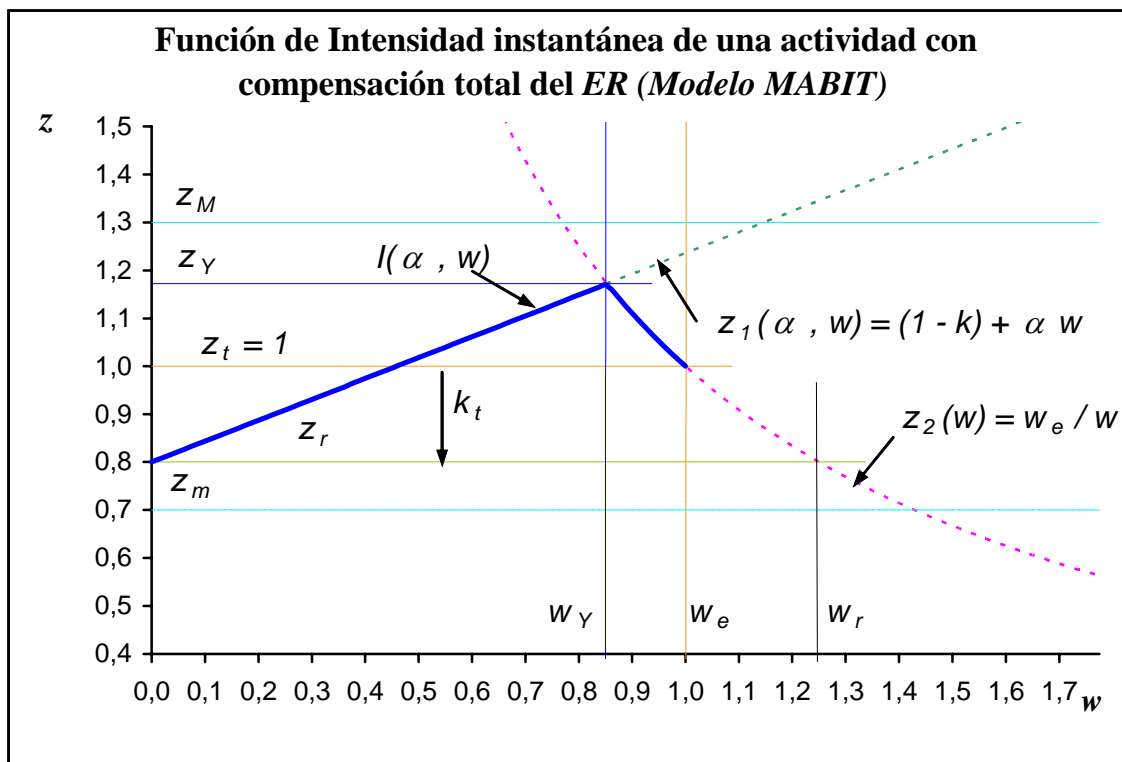


Fig. V.5

Consideraremos que  $w_Y$  es el instante de finalización de la actividad si se hubiera ejecutado con intensidad constante de valor  $z_Y$ , es decir:  $z_Y = (I / w_Y) \times w_e$ . Desde ese momento y hasta la finalización de la actividad seguirá una senda

decreciente (de acuerdo con la función  $z_2(w)$ ) que concluye con intensidad de valor 1 en el momento de la conclusión real de la actividad, que corresponde al inicialmente estimado.

La clave para que este planteamiento conduzca por las sendas mencionadas está en elegir adecuadamente la pendiente  $\alpha$  de la recta que determina la senda inicial. El parámetro  $\alpha$  será obtenido desde la expresión [V.8], en la que sustituimos la función  $I(\alpha, w)$  por su expresión para este modelo dada por [V.7] y que reflejamos a continuación:

$$\int_0^{w_e} I(\alpha, w) dw = \int_0^{w_e} (\min\{1 - k_t + \alpha w, \frac{w_e}{w}\}) dw = w_e \quad [\text{V.9}]$$

Desarrollando la expresión anterior teniendo en cuenta que el punto de no derivabilidad<sup>97</sup> de la función  $I(\alpha, w)$  es  $(w_Y, z_Y)$ , (ver Fig. V.5) obtenemos la que sigue:

$$\int_0^{w_Y} (1 - k_t + \alpha w) dw + \int_{w_Y}^{w_e} (\frac{w_e}{w}) dw = w_e \quad [\text{V.10}]$$

De la expresión [V.10] obtenemos la ecuación siguiente, en la que detectamos las incógnitas  $\alpha$  y  $w_Y$ . (Para detalles de cálculo ver Anexo).

$$w_e (1 + \ln \frac{w_Y}{w_e}) = (1 - k_t) w_Y + \frac{\alpha}{2} w_Y^2 \quad [\text{V.11}]$$

Obtenemos una ecuación adicional al considerar la recta auxiliar  $z(w)$  (coincidente con la función de intensidad instantánea inicial  $z_I(\alpha, w)$ ) que

<sup>97</sup> Nos referimos al punto en el que la función de intensidad instantánea de la actividad pasa, de la función de intensidad instantánea inicial, a la función de modos de ejecución.

pasa por los puntos  $(0, 1-k_t)$  y  $(w_Y, z_Y)$ , teniendo en cuenta que  $w_Y \times z_Y = w_e$ , o sea,  $z_Y = w_e / w_Y$ .

$$(w-0)\left[z(w) - \frac{w_e}{w_Y}\right] = (w-w_Y)[z(w) - (1-k_t)] \quad [\text{V.12}]$$

Realizando operaciones en la expresión anterior, que conduzcan a la obtención de  $z(w)$ :

$$z(w) = (1-k_t) + \left(\frac{w_e}{w_Y} - 1 + k_t\right) \frac{w}{w_Y} \quad [\text{V.13}]$$

Si comparamos la expresión obtenida con la [V.5], resulta:

$$\alpha = \left(\frac{w_e}{w_Y} - 1 + k_t\right) \frac{1}{w_Y} = \frac{w_e - (1-k_t)w_Y}{w_Y^2} \quad [\text{V.14}]$$

La expresión [V.14] es la pendiente de la recta o índice de la presión sobre el procesador, que llevaremos a la expresión [V.11] con el fin de obtener una función cuya única variable sea  $w_Y$ . El resultado de estas operaciones (ver Anexo), es el siguiente:

$$\frac{1-k_t}{2} \frac{w_Y}{w_e} - \ln \frac{w_Y}{w_e} = \frac{1}{2} \quad [\text{V.15}]$$

Si elegimos como variable la relación entre  $w_Y$  y  $w_e$ , es decir  $w_Y / w_e = x$ , la expresión [V.15] también puede ser puesta de la forma:

$$\frac{1-k_t}{2} x - \ln x = \frac{1}{2}, \quad \text{o también:} \quad (1-k_t)x - \ln x^2 = 1 \quad [\text{V.16}]$$

La variable  $x$  muestra el tanto por uno de avance de la actividad cuando la intensidad de la misma adquiere el valor máximo. El valor obtenido de  $x$  (que depende exclusivamente de  $k_t$ ) y, en consecuencia, el correspondiente para  $w_y$ , servirá para el cálculo de la pendiente  $\alpha$ , al sustituirlo en la expresión [V.14]. De lo anterior se desprende que  $\alpha$  dependerá exclusivamente de  $k_t$ . La expresión [V.17] se deduce de la [V.14], expresando el parámetro  $\alpha$  en función de  $x$  y de  $k_t$ .

$$\alpha = \frac{\frac{1}{x} - (1 - k_t)}{w_e x} \quad [V.17]$$

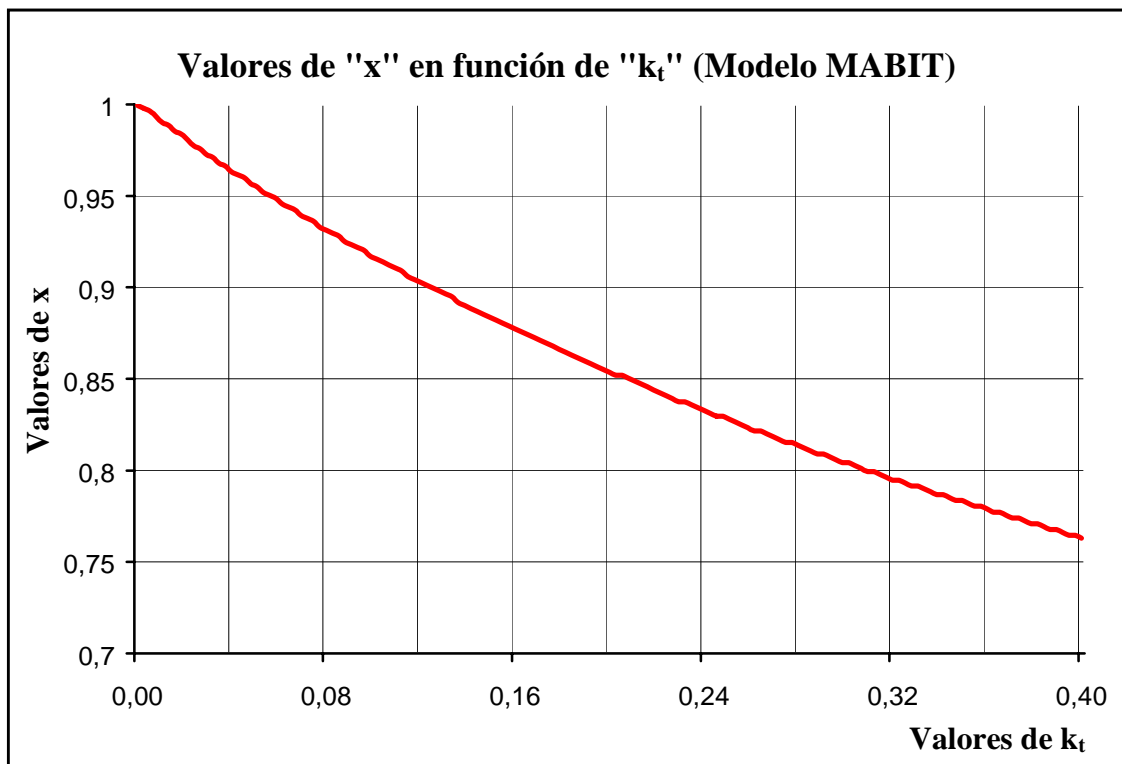
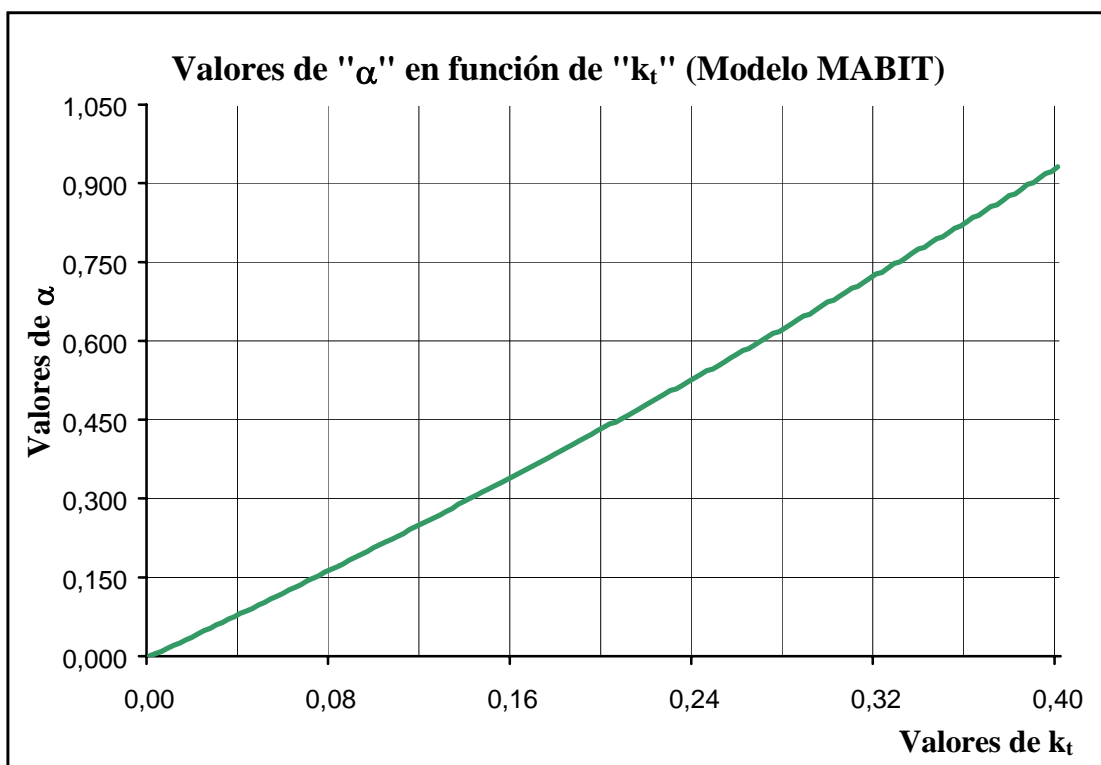


Fig. V.6

La Fig. V.6 representa la gráfica de la función implícita  $x = F(k_t)$  que se deriva de la expresión [V.16]. Ha sido obtenida mediante un método implementado en una hoja de cálculo. De la misma forma se ha obtenido la gráfica representada en la Fig. V.7, que refleja la expresión [V.17], para un valor  $w_e = 1$ .

Es evidente que sólo debemos considerar, de los dos posibles valores de  $x$ , aquél que se traduzca en un valor  $\alpha > 0$ , es decir siempre se ha de verificar  $1/x > (1 - k_t)$ . O lo que es lo mismo, la inversa del avance<sup>98</sup> de la actividad correspondiente al momento en que se ejecuta con intensidad máxima, será siempre mayor (en tantos por uno) que el valor de la intensidad en el momento del inicio de aquella.



**Fig. V.7**

### **V.5 MODELO DE ACTIVIDAD POTENCIAL INTENSIDAD-TIEMPO (MAPIT)**

Como ya anticipamos en el capítulo III, expondremos algún modelo adicional cuya característica sea otra forma diferente de evolucionar la intensidad de la actividad. En este caso hemos elegido una característica potencial creciente como forma de la función  $z_I(\alpha, w)$ , ver Fig V.4. Para perfilar esta función se han realizado los siguientes supuestos:

<sup>98</sup> Cuando nos referimos a este avance lo hacemos estrictamente en términos temporales.

- Se trata de una función potencial cuyo exponente ( $g > 0$ ) depende del factor de relajación  $k_t$ , o lo que es lo mismo, del instante en que se inicie cada actividad.
- La intensidad con que se desarrolla la actividad en ausencia de mecanismos compensadores del *ER* ( $\alpha = 0$ ), tiene crecimiento potencial con un valor medio de  $(1 - k_t)$ . Adquiriendo su valor máximo (la unidad) en correspondencia con el tiempo de ejecución estándar.
- En consecuencia y de acuerdo con la premisa anterior, el tiempo real de ejecución de la actividad será:  $w_r = w_e / (1 - k_t)$ .
- La única forma de reducir  $w_r$  acercándolo a  $w_e$ , es aumentar la velocidad de crecimiento de esta función. Este sería el mecanismo compensador del *ER*.

Se trata de una función potencial creciente desde el origen, de coeficiente  $1 + \alpha$  y exponente  $g$ , es decir (ver Fig. V.4):

$$z_1(\alpha, w) = (1 + \alpha) w^g \quad [\text{V.18}]$$

Cuando  $\alpha = 0$ , es decir, en ausencia de mecanismos correctores del *ER* esta función corta a  $z_2(w) = w_e / w$  (función de modos de ejecución) en el punto que corresponde al tiempo estándar, desde el que la intensidad decrece hasta un punto en que su valor medio es el correspondiente a un factor de relajación  $k_t$  (ver Fig. V-8, donde se ha supuesto  $k_t = 0,2$ ).

La función de intensidad instantánea de la actividad “ $I(\alpha, w)$ ”, que se determina para este modelo de acuerdo con la definición dada en III.6.3, es la que se refleja a continuación:

$$I(\alpha, w) = \text{mín}\{ (1 + \alpha) w^g, w_e / w \}, \text{ para } 0 \leq w \leq w_r \quad [\text{V.19}]$$

Esta función será la que utilizaremos para establecer las relaciones analíticas que nos conducirán a la obtención del parámetro  $\alpha$  adecuado a una determinada compensación del ER. Más adelante estableceremos esas relaciones, pero encaminadas a una compensación total del ER, es decir, haciendo coincidir el tiempo  $w_r$  con el  $w_e$ , en este caso la expresión [V.19] se transforma en la siguiente:

$$I(\alpha, w) = \min\{ (1 + \alpha) w^g, w_e / w \}, \text{ para } 0 \leq w \leq w_e \quad [V.20]$$

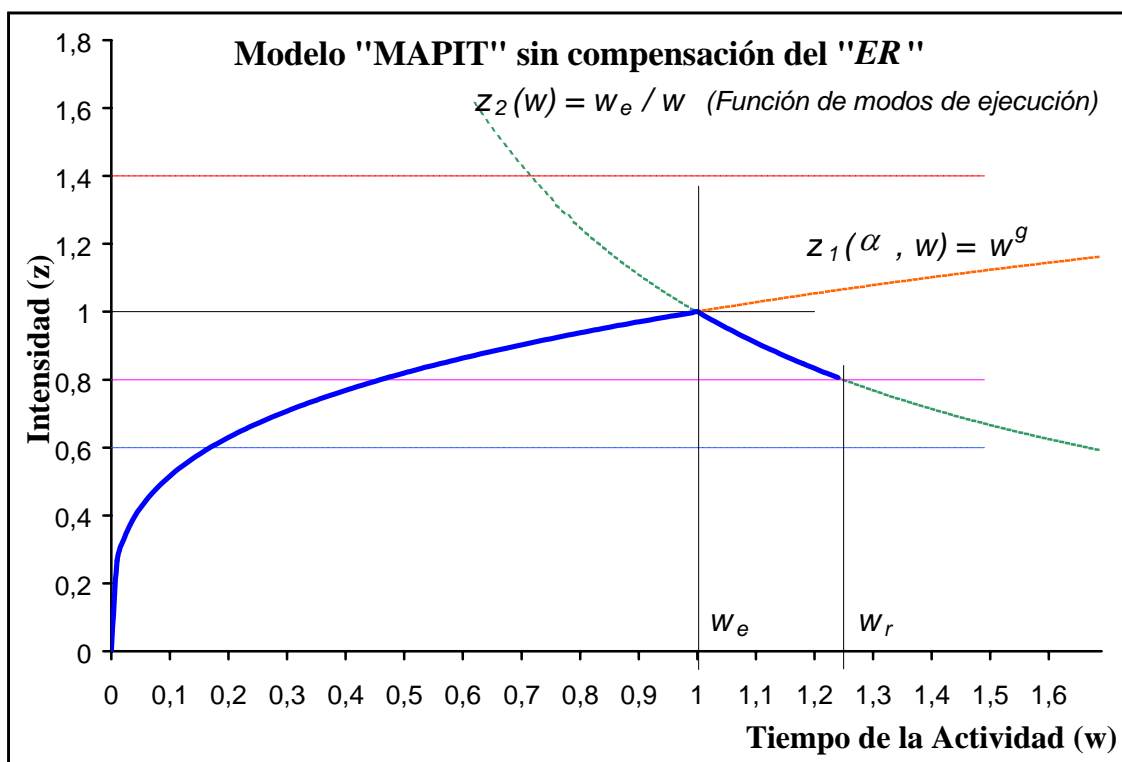


Fig. V.8

En este modelo, teniendo en cuenta la expresión [V.20] y que las funciones  $z_1(\alpha, w)$  y  $z_2(w)$  se cortan, la expresión [V.4] quedaría de la forma:

$$\int_0^{w_e} I(\alpha, w) dw = w_e \quad [V.21]$$



### V.5.1 Funcionamiento del Modelo “MAPIT”

Como en el modelo anterior (MABIT), este modelo tratará de expresar la respuesta del procesador cuando se enfrenta a una actividad, en un entorno en el que se compensa el *ER*. Con las hipótesis que se planteamos a continuación, se obtiene una función intensidad-tiempo en el intervalo de ejecución de la actividad, que obedece a la expresión [V.20].

Suponemos que el procesador muestra una cierta inercia al inicio de su actividad, comenzando con una intensidad nula que crece rápidamente al principio y ese crecimiento se va reduciendo a medida que avanza la actividad (primera derivada decreciente). No obstante, esa forma de crecimiento (exponente  $g$ ) de la intensidad instantánea está afectada por el *ER* que corresponda a ese momento (instante “ $t$ ” del proyecto), de tal forma que su valor medio será  $I - k_t$ .

Si como en el primer modelo suponemos la existencia de un control en tiempo real sobre la marcha y avance del proyecto, desde el inicio de la actividad el procesador recibirá los impulsos justos correspondientes a la “presión”, que en esas circunstancias, se requiere. La presión recibida se traducirá en una senda de intensidad creciente a mayor velocidad, dada por el factor  $(I + \alpha)$ , hasta alcanzar la intensidad máxima en el instante  $w_Y$  (Fig. V.9).

Consideraremos que  $w_Y$  es el instante de finalización de la actividad si se hubiera ejecutado con intensidad constante de valor  $z_Y$ , es decir:  $z_Y = (I / w_Y) \times w_e$ . Desde ese momento y hasta la finalización de la actividad seguirá una senda decreciente (de acuerdo con la función  $z_2(w)$ ) que concluye con intensidad de valor 1 en el momento de la conclusión real de la actividad, que corresponde al inicialmente estimado.

La clave para que este planteamiento conduzca por las sendas mencionadas está en elegir adecuadamente el valor de  $\alpha$ , cuyo efecto será aumentar la pendiente instantánea de la senda inicial. El parámetro  $\alpha$  será obtenido desde la expresión [V.21], una vez determinado el valor que corresponde a  $g$ .

De acuerdo con los planteamientos del modelo y siguiendo a la Fig. V.8, para la obtención del parámetro  $g$  partiremos de la expresión:

$$\int_0^{w_e} w^g dw + \int_{w_e}^{w_r} \frac{w_e}{w} dw = w_e \quad [V.22A]$$

Haciendo  $w_e = 1$  para simplificar los cálculos:

$$\int_0^1 w^g dw + \int_1^{w_r} \frac{1}{w} dw = 1 \quad [V.22B]$$

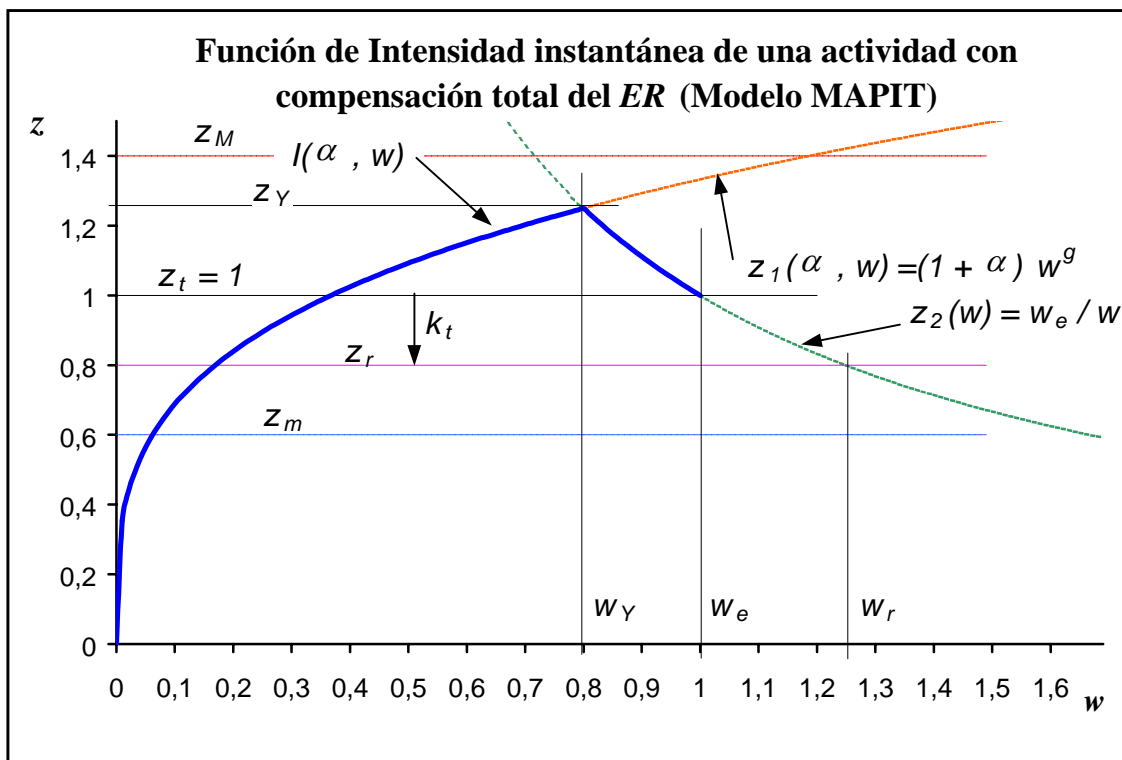


Fig. V.9

De donde (ver anexo de cálculos) obtenemos el valor del parámetro  $g$ , en función del factor de relajación correspondiente al instante “ $t$ ” ( $k_t$ ) en que se inicia la actividad en cuestión. El parámetro  $g$  viene dado por la expresión [V.23] y su relación gráfica con  $k_t$  se aprecia en la Fig. V.10.

$$g = \frac{\ln \frac{1}{1-k_t}}{1 - \ln \frac{1}{1-k_t}} = \frac{-\ln(1-k_t)}{1 + \ln(1-k_t)} \quad [V.23]$$

Volviendo a la obtención del parámetro  $\alpha$ , si en la expresión [V.21] sustituimos la función  $I(\alpha, w)$  por la correspondiente a este modelo dada por [V.20] y que reflejamos a continuación:

$$\int_0^{w_e} I(\alpha, w) dw = \int_0^{w_e} (\min\{(1 + \alpha) \omega^g, \frac{w_e}{w}\}) dw \quad [V.24]$$

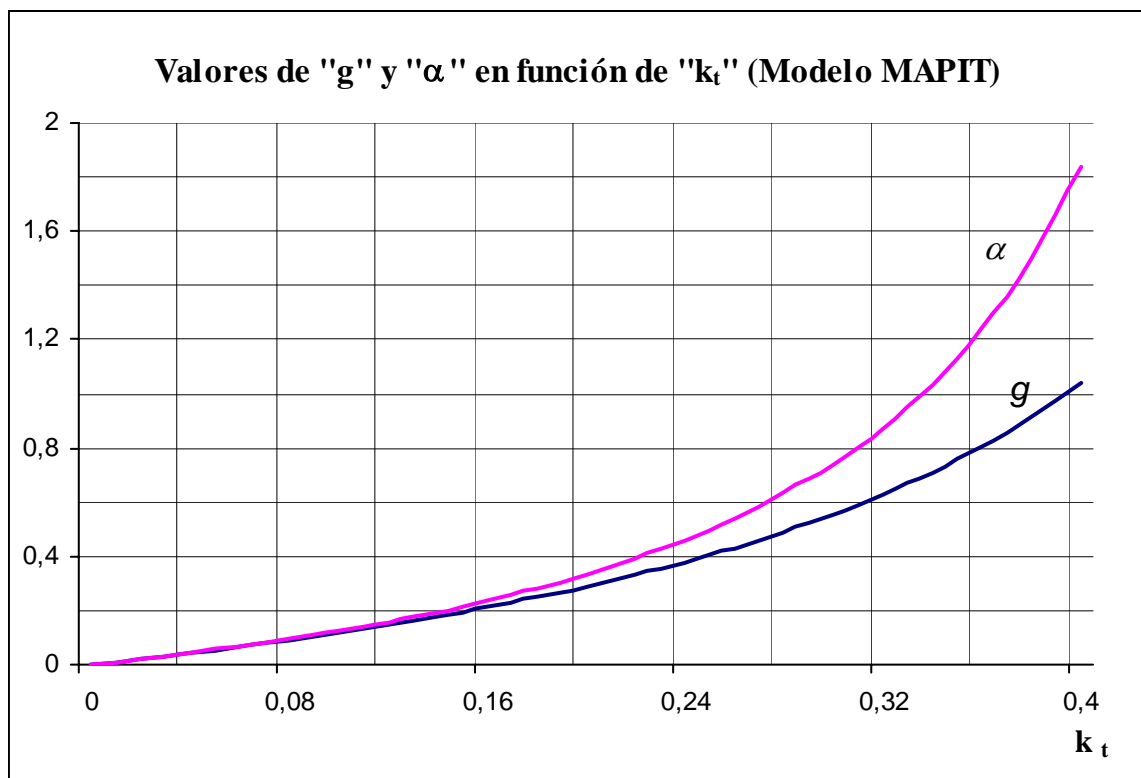


Fig. V.10

Desarrollando la expresión anterior teniendo en cuenta que el punto de no derivabilidad<sup>99</sup> de la función  $I(\alpha, w)$  es  $(w_Y, z_Y)$ , (ver Fig. V.9) obtenemos la que sigue:

$$\int_0^{w_Y} (I + \alpha) w^g dw + \int_{w_Y}^{w_e} \left( \frac{w_e}{w} \right) dw = w_e \quad [\text{V.25}]$$

Teniendo en cuenta que  $w_e = I$  y que  $w_Y = I - k_t$ , de la expresión [V.25] obtenemos la expresión de  $\alpha$  en función de  $g$  y de  $k_t$ . (Para detalles de cálculo ver Anexo de cálculos).

$$\alpha = \frac{1}{(1 - k_t)^{g+1}} - 1 \quad [\text{V.26}]$$

Si en la expresión anterior sustituimos el valor de  $g$  dado por la [V.23], llegamos a la expresión del parámetro  $\alpha$  en función sólo de  $k_t$ .

$$\alpha = (1 - k_t)^{\frac{-1}{\ell n(1 - k_t) + 1}} - 1 \quad [\text{V.27}]$$

La expresión anterior corresponde a lo que sería la “presión sobre el procesador” en cada instante “ $t$ ” del proyecto si se ha adoptado como modelo evolutivo de la intensidad de la actividad el modelo “MAPIT”. La evolución gráfica de este parámetro se observa en la Fig. V.10.

---

<sup>99</sup> Nos referimos al punto en el que la función de intensidad instantánea de la actividad pasa, de la función de intensidad instantánea inicial, a la función de modos de ejecución.

## V.6 COMPENSACIÓN DEL EFECTO RELAJACIÓN

Como hemos visto en el capítulo IV, muchos autores han pensado que el problema de los retrasos en la terminación de los proyectos se debe a estimaciones demasiado optimistas para los tiempos de ejecución de las actividades. Si esas estimaciones hubieran sido modificadas al alza, se iniciaría el proyecto con un horizonte temporal mayor, es decir, con un tiempo estimado  $T_E^o > T_E$  posiblemente coincidente con el  $T_R$  logrado. Pero, ¿cuál sería la fecha real de terminación en este caso?, posiblemente  $T_R^o > T_R$ . Esto se justificaría por la suma del efecto “Parkinson” y del efecto “Relajación”. La Fig. V.11 muestra la escala de tiempos de un proyecto en la que se han situado estos hitos.

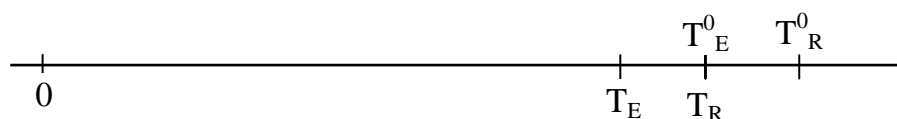


Fig. V.11

Si, como parece ocurrir, revisiones al alza de las estimaciones conducen a un proceso inflacionista del TP, parece que la estabilidad se obtendría aplicando el efecto contrario, de tal manera que justamente compense la suma de los efectos “Parkinson y Relajación”. Esta compensación habría de hacerse en el momento de la estimación de los tiempos de ejecución de las actividades, de forma que se jugase con un tiempo estimado para la ejecución del proyecto  $T_E^* < T_E$ . Si el tiempo realmente invertido en la ejecución del proyecto fuese  $T_R^*$ , teniendo en cuenta el *ER*, debería cumplirse:  $T_R^* = T_E$ . Este mecanismo, al que nos referiremos como “hipótesis ingenua” y que analizaremos en el punto siguiente con un ejemplo, podría funcionar en el corto plazo, pero a la larga, los procesadores y en particular los que intervienen al principio del proyecto, actuarán compensando los recortes efectuados a sus tiempos.

Otra alternativa sería mantener los tiempos estimados para las actividades y aplicar la presión oportuna en cada momento. Esta presión, que normalmente es

esperada por los procesadores, debe ser gestionada por el director del proyecto de forma equilibrada, es decir, será aplicada en su justa medida en cada momento del desarrollo del proyecto. Para hacer esto posible, será necesario conocer el valor del factor de relajación en el momento en que se inicia la actividad ( $k_t$ ) y, en consonancia con el modelo de actividad elegido obtener el valor de  $\alpha$ . A este mecanismo nos referiremos más adelante como “hipótesis realista”.

### V.6.1 Hipótesis ingenua

Para ver como opera esta forma de compensar el  $ER$ , exponemos a continuación un ejemplo numérico. Suponemos una actividad cuyo tiempo asociado ha sido estimado en 8 días ( $w_e = 8$ ), está localizada al inicio de un proyecto y se encarga al procesador “P”. Describiremos el proceso en cuatro pasos:

- P inicia la actividad en el momento  $t = 0$ , por lo que le asocia un HT equivalente al TP ( $T_E$ ). Según nuestra hipótesis le corresponde el máximo  $ER$ :  $k$ .
- P concluye la actividad en el momento  $t = 10$  ( $w_r = 10$ ), habiendo incurrido en un retraso de 2 días. La eficiencia del recurso P ha sido del 80%. Es decir ha desarrollado su actividad con una intensidad  $z = 0,8$  y en consecuencia el  $ER = 0,2$ , o también  $ER = 20\%$ .
- Supongamos que hubiera sido conocido el  $ER$  de antemano, al tenerlo en cuenta en el proceso de estimación de los tiempos de las actividades, partiríamos de un valor  $w_e^* = 8 - 0,2 \times 8 = 6,4$  días. Con este dato y con el mismo enfoque del punto 1, P inicia la ejecución de la actividad.
- Si P concluyera la actividad en el momento  $t = 8$  ( $w_r^* = 8$ ), habría incurrido en un retraso de 1,6 días. Observemos cómo  $w_r^* = w_e$  y también cómo de la actuación de P se desprende el mismo valor para  $ER$ . La única diferencia con relación a dicho punto es que ha sido compensado el  $ER$ , obteniendo

un tiempo de ejecución real ( $w_r^*$ ) que coincide con la estimación inicial ( $w_e$ ).

- Si esa misma actividad hubiera estado localizada hacia la mitad del TP ( $t = 0,5T_E$ ), le habría correspondido un *ER*:  $k_t = k \times (T_E - 0,5T_E) / T_E = 0,1$  ó 10% por lo que el valor asignado  $w_e^*$  debería ser:  $w_e^* = 8 - 0,1 \times 8 = 7,2$  días.

En la práctica puede observarse una actuación parecida a la descrita, aplicada sin un fundamento sólido, tan sólo se intenta “engañar” a los procesadores con metas temporales más cercanas. Suele aplicarse junto con alguna dosis del mecanismo que analizaremos en el punto siguiente. La forma de aplicar esta compensación consiste en comprimir los tiempos de las actividades de forma uniforme a lo largo del desarrollo del proyecto. Si admitimos la existencia de *ER* como aquí se describe, las actividades resultarán más perjudicadas a medida que se aproximan al final.

### V.6.2 Hipótesis realista

También esta forma de actuar, consistente en ejercer una determinada presión sobre los procesadores, puede observarse en la práctica cotidiana de la ingeniería de proyectos. Suele estar, como hemos mencionado antes, unida a la forma anterior, pero ésta aún se aplica peor (la presión sobre el procesador se aplica sólo a los que intervienen en las últimas fases de los proyectos).

Este mecanismo, correctamente aplicado, consistiría en ejercer la presión sobre el procesador con la intensidad requerida en cada momento (valor del parámetro  $\alpha$ , de acuerdo con el modelo que sea aplicable). El problema estriba en cómo traducir el valor de  $\alpha$  en acciones concretas sobre los procesadores. Lo que sí parece evidente es que a mayor *ER* mayor presión habría que aplicar y cuanto más cercana está la fecha de finalización del proyecto, menor presión sería necesaria.

Las acciones concretas a las que nos referimos estarían integradas en un conjunto y serían diversos tipos de incentivos a largo, medio y corto plazo. Una vez instaurado este mecanismo y producido sus efectos las acciones a largo y medio plazo, el *ER* histórico se habría reducido a un valor residual y el valor de  $\alpha$  reflejaría sólo las acciones a corto plazo. Al director del proyecto correspondería la responsabilidad del diseño y aplicación de ese conjunto de acciones que venimos denominando genéricamente como “presión sobre el procesador”.

## V.7 CONCLUSIONES RELATIVAS A LOS MODELOS PRESENTADOS

Para poder cuantificar el parámetro  $\alpha$  (presión sobre el procesador) es necesario conocer el valor de  $k_t$  que corresponde a cada actividad. Según el modelo que apliquemos obtenemos un valor diferente, lo que parece coherente con la interpretación que pueda hacerse del comportamiento del procesador: Para cada tipo de comportamiento un tipo de función  $z_I(\alpha, w)$  (que es lo que caracteriza a cada modelo) y como es lógico un valor diferente del parámetro  $\alpha$ . Pero quizás lo relevante no sea el valor de ese parámetro sino cómo evoluciona en función del factor de relajación  $k_t$ . En efecto, si observamos la evolución del parámetro  $\alpha$  en cada uno de los modelos analizados, podemos obtener las conclusiones siguientes:

- Modelo MABIT: En la Fig. V.7 se aprecia un crecimiento de  $\alpha$  prácticamente lineal con  $k_t$ . Pero lo realmente importante es que si para un  $k_t = 0,10$  aplicamos un  $\alpha = 0,20$ , cuando  $k_t = 0,30$  aplicaremos un  $\alpha = 0,62^{100}$ .
- Modelo MAPIT: En la Fig. V.10 se aprecia un crecimiento de  $\alpha$  prácticamente exponencial con  $k_t$ . En este caso, lo importante es que si para

<sup>100</sup> Este ejemplo numérico lo estamos ejecutando directamente en la gráfica de la Fig. V.7.



un  $k_t = 0,10$  aplicamos un  $\alpha = 0,14$ , cuando  $k_t = 0,30$  aplicaremos un  $\alpha = 0,70$ <sup>101</sup>.

Ahora el interrogante es poder conocer el valor del factor de relajación ( $k_t$ ) en cada momento del proyecto. En el capítulo III punto III.5.3 fue definido como una magnitud dependiente del instante “ $t$ ” del proyecto y una constante  $k$  que hemos llamado “constante de la Organización”. En el capítulo siguiente estableceremos el camino para la obtención de esta constante  $k$ .

---

<sup>101</sup> Este ejemplo numérico lo estamos ejecutando directamente en la gráfica de la Fig. V.10.



## **CAPÍTULO VI**

### **EL EFECTO RELAJACIÓN: SU INCIDENCIA EN LA DEMORA DEL PROYECTO**

#### **VI.1 INTRODUCCIÓN**

En el capítulo anterior, dedicado fundamentalmente al análisis de la actividad en su relación con el *ER*, hemos admitido que todas las actividades que conforman el proyecto están sujetas al referido efecto. Cualquier procesador está encargado de un conjunto de actividades que, salvo causa de fuerza mayor, tendrá que ejecutar necesariamente. Estas actividades habrán sido previamente evaluadas y programadas por lo que la secuencia de las mismas está definida y son conocidos sus tiempos de ejecución.

Cada procesador dependiendo de la Especialidad a que pertenezca, desarrolla sus actividades en uno o más intervalos de tiempo a lo largo del desarrollo del proyecto. Consideraremos que si se trata de más de un intervalo, los huecos serían dedicados a otro proyecto solapado con el que nos ocupa. Es decir, los recursos no están ociosos. De esta forma, existirán procesadores que

concentran su trabajo en una determinada fase del proyecto y otros realizan alternancias en diferentes momentos del proyecto (Fig. VI.1). En cualquier caso, un mismo procesador iniciará cada actividad en diferentes momentos, a los que corresponden diferentes  $HT$ . Así, y de acuerdo con nuestra hipótesis, tendremos un  $ER$  de valor  $k_t$  (factor de relajación correspondiente a todas las actividades que se inicien en el instante “ $t$ ”) que será diferente para cada actividad de un mismo procesador.



Fig. VI.1

La Fig. VI.1 muestra un ejemplo en el que intervienen 6 procesadores, cada uno con su secuencia particular de actividades. El “perfil del proyecto” estará determinado por el número de procesadores que en cada instante estén activos. Será la secuencia de actividades y sus relaciones de precedencia las que determinen la “forma” de ese perfil, que normalmente será una función escalera en el tiempo de desarrollo del proyecto. En las primeras fases del proyecto suelen intervenir pocos procesadores. Mientras se avanza se irán completando ciertas actividades, que permitirán la incorporación a las suyas de nuevos procesadores. Sin embargo, en las últimas fases del proyecto con gran parte de las actividades ya ejecutadas, de nuevo serán pocos los procesadores que queden por intervenir para terminar el proyecto.

En el presente capítulo intentaremos analizar la posible relación entre el  $ER$ , la forma del perfil del proyecto y la demora en que incurre el mismo, para lo que

propondremos el modelo “MLRCD” (Modelo Lineal de Recursos Crecientes Decrecientes). También analizaremos un caso particular: Cuando las dos pendientes son nulas, al que nos referiremos como Modelo Básico o “MB”.

## VI.2 PERFIL DEL PROYECTO

De acuerdo con lo expresado en la introducción, vamos a plantear un modelo del que se puedan extraer conclusiones relativas al *ER* de la Organización. Comprobaremos cómo la “forma” del perfil guarda alguna relación con la demora del proyecto y el *ER*. En Tavares y otros (1999), encontramos una referencia a este tema, al mostrar modelos que relacionan la morfología de los proyectos con la incertidumbre sobre la fecha de terminación de los mismos. Concretamente el indicador  $I_3$  (anchura relativa) es el que se correspondería con nuestro “perfil del proyecto” (ver IV.3.3.2).

De acuerdo con este planteamiento, el nivel de recursos aplicados al proyecto en el instante “ $t$ ”, vendría dado por el número de procesadores activos en ese instante “ $P_t$ ”. Estableceremos la siguiente nomenclatura (alguna nueva y otra como recordatorio) para los conceptos que serán utilizados en la formulación que seguirá.

- $t$  = Tiempo del proyecto. Como unidad utilizaremos el día o la hora, según convenga
- $\omega$  = Número de horas estándar de la jornada laboral
- $P_t$  = Número de procesadores activos en el instante “ $t$ ”
- $T_E$  = Duración (días) estimada del proyecto
- $T_R$  = Duración (días) real del proyecto

- $z_t =$  Intensidad media de las actividades que se inician en el instante “ $t$ ”  
 $(z_t = 1 - k_t)^{102}$

La pérdida de eficiencia debida al *ER* trae como consecuencia una demora del proyecto, concluyendo en el momento  $T_R$ . Este tiempo de demora, es decir, la diferencia  $T_R - T_E$ , se desarrollará con un nivel de recursos equivalente al que existía en  $T_E^{103}$ .

### VI.2.1 Perfil tipo escalera

Esta es la forma real que tendrán todos los perfiles de proyectos, ya que los procesadores están activos (aplicando recursos al proyecto) o inactivos. A medida que aumenta el número de actividades y el de procesadores que intervienen en un proyecto, el perfil escalera se asemeja más a una función continua, pero no por ello dejará de ser una función del tipo escalera. En la Fig. VI.2, se refleja un ejemplo de este tipo de perfiles.

Siendo  $R(t)$  el nivel de recursos teóricos aplicados en el instante “ $t$ ” y sabiendo que viene dado por  $R(t) = \omega \times P_t$ , los recursos absorbidos por el proyecto (en horas  $\times$  hombre nominales), obedecerán a la expresión:

$$\sum_0^{T_E} R(t) = \sum_0^{T_E} \omega P_t = \omega \sum_0^{T_E} P_t \quad \text{[VI.1]}$$

Siendo  $r(t)$  el nivel de recursos efectivos aplicados en el instante “ $t$ ” y sabiendo que vendrá dado<sup>104</sup> por  $r(t) = (1 - k_t) \times \omega \times P_t$ . Los recursos que

<sup>102</sup> Recordemos la hipótesis de que cualquier actividad tiene “predestinada” una intensidad media inferior a la unidad en presencia de *ER*, que sólo depende del instante “ $t$ ” de su inicio.

<sup>103</sup> Se trata de una hipótesis simplificadora. Posiblemente otra hipótesis más realista sería suponer un nivel decreciente al ritmo que se venía manifestando antes de  $T_E$ .

<sup>104</sup> Las definiciones y expresiones básicas fueron establecidas en el capítulo III.

realmente contribuyen al avance del proyecto (en horas × hombre efectivas), obedecerán a la expresión:

$$\sum_0^{T_E} r(t) = \sum_0^{T_E} \omega P_t (1 - k_t) = \omega \sum_0^{T_E} P_t - \omega \sum_0^{T_E} P_t k_t \quad [VI.2]$$

Es evidente que la expresión [VI.1] es mayor que la [VI.2], en una cantidad que es precisamente la eficiencia perdida por los recursos aplicados al proyecto hasta el instante  $T_E$ . Es decir:

$$\sum_0^{T_E} J(t) = \omega \sum_0^{T_E} P_t - \left( \omega \sum_0^{T_E} P_t - \omega \sum_0^{T_E} P_t k_t \right) = \omega \sum_0^{T_E} P_t k_t \quad [VI.3]$$

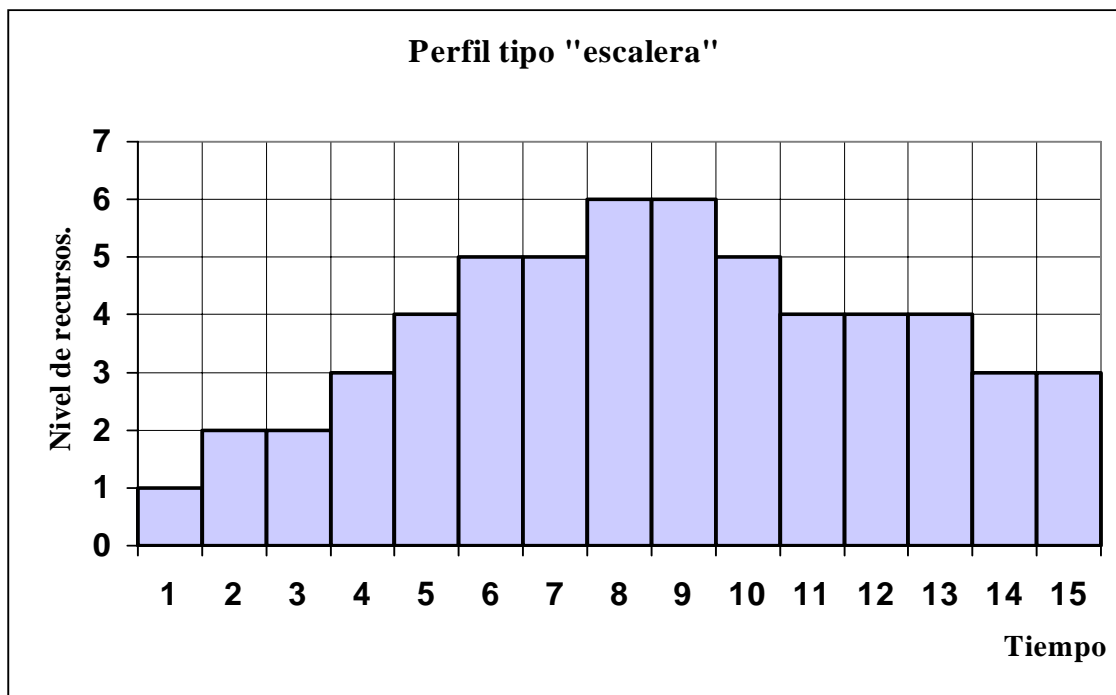


Fig. VI.2

Nuestra hipótesis fundamental, como ya hemos avanzado anteriormente, es que el montante de recursos perdidos dados por la expresión [VI.3], si no se han aplicado técnicas correctoras del ER, deben ser compensados con una demora en

el proyecto, durante la cual el nivel de recursos se mantiene (por hipótesis) en el existente en el instante  $T_E$ , es decir  $P_{T_E}$ . Esto viene reflejado en la expresión [VI.4].

$$\omega \sum_0^{T_E} P_t k_t = \omega (T_R - T_E) P_{T_E} \quad [\text{VI.4}]$$

La expresión [VI.4] nos permite obtener el retraso en que supuestamente ha incurrido el proyecto y que viene dado por:

$$T_R - T_E = \frac{\sum_0^{T_E} P_t k_t}{P_{T_E}} \quad [\text{VI.5A}]$$

Un caso particular de la expresión anterior, es cuando consideramos que se aplica un nivel de recursos constante a lo largo del desarrollo del proyecto ( $P_t = \text{constante}$ ). Este caso quedará reflejado en el modelo “MB” que desarrollaremos más adelante, quedando la expresión de la demora de la forma:

$$T_R - T_E = \frac{P_t \sum_0^{T_E} k_t}{P_{T_E}} = \sum_0^{T_E} k_t \quad [\text{VI.5B}]$$

### VI.2.2 Perfil tipo general (función continua)

Esta es la forma más conveniente para implementar procesos de cálculo con los perfiles de proyectos, ya que a medida que aumenta el número de actividades y el de procesadores que intervienen en un proyecto, el perfil escalera se asemeja más a una función continua, por lo que el supuesto que hacemos facilitaría los



cálculos. Los errores en que se incurriría serían decrecientes con el tamaño del proyecto. En la Fig. VI.3, se muestra un ejemplo de este tipo de perfiles.

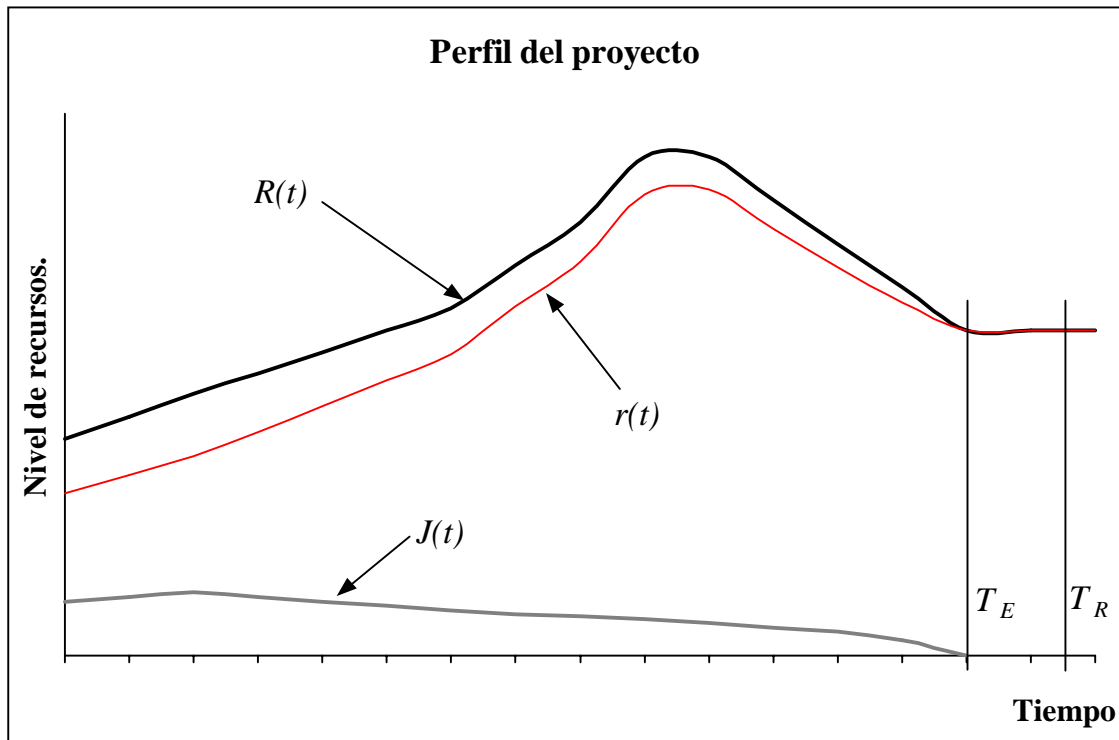


Fig. VI.3

Sea  $R(t)$  la función continua que determina el nivel de recursos aplicados en cada instante “ $t$ ”. Los recursos absorbidos por el proyecto (que para que estén expresados en horas  $\times$  hombre nominales, habrá que afectarlos de la constante adecuada), obedecerán a la expresión:

$$\int_0^{T_E} R(t) dt \quad [VI.6]$$

Sea  $r(t)$  la función continua que determina el nivel de recursos efectivos aplicados en cada instante “ $t$ ” y que, como sabemos, vendrá dada por  $r(t) = R(t) \times (1 - k_i)$ ; los recursos que realmente contribuyen al avance del proyecto obedecerán a la expresión:

$$\int_0^{T_E} r(t) dt = \int_0^{T_E} (1 - k_t) \times R(t) dt = \int_0^{T_E} R(t) dt - \int_0^{T_E} k_t \times R(t) dt \quad [VI.7]$$

Es evidente que la expresión [VI.6] es mayor que la [VI.7], en una cantidad que es precisamente la eficiencia perdida por los recursos aplicados al proyecto hasta el instante  $T_E$ . Es decir:

$$\int_0^{T_E} J(t) dt = \int_0^{T_E} R(t) dt - \left( \int_0^{T_E} R(t) dt - \int_0^{T_E} k_t \times R(t) dt \right) = \int_0^{T_E} k_t \times R(t) dt \quad [VI.8]$$

Nuestra hipótesis fundamental, igual que en el caso anterior, es que el montante de recursos perdidos dados por la expresión [VI.8], si no se han aplicado técnicas correctoras del *ER*, deben ser compensados con una demora en el proyecto, durante la cual el nivel de recursos es el existente en el instante  $T_E$ , es decir  $R(T_E) = r(T_E)$ . Esto viene reflejado en la expresión [VI.9].

$$\int_0^{T_E} k_t \times R(t) dt = (T_R - T_E) R(T_E) \quad [VI.9]$$

La expresión [VI.9] nos permite obtener el retraso en que supuestamente ha incurrido el proyecto y que viene dado por:

$$T_R - T_E = \frac{\int_0^{T_E} k_t \times R(t) dt}{R(T_E)} \quad [VI.10]$$

Sabemos que el valor de  $k_t$  (factor de relajación en el instante “ $t$ ” –ver definición en III.5.3–) es directamente proporcional al *HT* ( $T_E - t$ ) y de valor inferior a la unidad, luego podremos expresarlo de la forma:

$$k_t = \frac{k(T_E - t)}{T_E} = k - \frac{k t}{T_E} \quad [\text{VI.11}]$$

Donde  $k$  es el factor de relajación inicial o constante de la Organización. Sustituyendo la expresión [VI.11] en la [VI.10] resulta:

$$T_R - T_E = \frac{k}{R(T_E)} \int_0^{T_E} R(t) dt - \frac{k}{T_E R(T_E)} \int_0^{T_E} t R(t) dt \quad [\text{VI.12}]$$

De esta expresión deducimos de inmediato que el retraso será directamente proporcional al valor de  $k$  e inversamente proporcional al nivel de recursos al final del proyecto  $R(T_E)$ .

### VI.2.2.1 Expresiones más significativas de los avances

Aunque no es relevante para los objetivos del presente trabajo, recordaremos las expresiones de los avances del proyecto que serían aplicables de acuerdo con las definiciones anteriores. El avance del proyecto en un determinado momento suele expresarse como un “porcentaje” de la forma:

$$\begin{aligned} \text{a) Avance teórico en el instante "t": } & \frac{100 \int_0^t R(t) dt}{\int_0^{T_E} R(t) dt} (\%) \\ \text{b) Avance estimado en el instante "t": } & \frac{100 \int_0^t r(t) dt}{\int_0^{T_E} R(t) dt} (\%) \end{aligned}$$

c) Avance real en el instante “ $t$ ”: 
$$\frac{100 \int_0^t r(t)dt}{mR_0(T_R - T_E) + \int_0^{T_E} r(t)dt} (\%)$$

En el denominador de la expresión **c**, la cantidad  $m \times R_0$  representa el nivel de recursos correspondiente a  $T_E$ , que se mantiene constante hasta  $T_R$ . (ver Fig. VI.3). Nótese también que cuando nos referimos a una avance “real” estamos suponiendo cercana la fecha de terminación real y, en consecuencia, conocido  $T_R$  por extrapolación.

La figura VI.8 muestra las curvas de avance de un proyecto ejemplo. La ordenada se refiere a valores de recursos acumulados en términos absolutos.

### VI.2.3 Perfil tipo “MB” (de recursos constantes o básico)

Denominamos perfil tipo “MB” o Modelo Básico al que es aplicable al caso más sencillo de analizar: Recursos constantes a lo largo del proyecto<sup>105</sup>, que se refleja en la Fig. VI.4. El perfil efectivo evolucionará a lo largo del tiempo estimado para el desarrollo del proyecto  $(0, T_E)$ , de acuerdo con la función  $r(t)$ , que, como se desprende de la figura, es una recta con ordenada en el origen  $R_0 - J_0$  y pendiente  $J_0 / T_E$ . Por lo tanto la función asociada al ER (función de relajación), es decir,  $R(t) - r(t) = J(t)$ , es una función decreciente en el intervalo  $(0, T_E)$ .

Aunque en este caso es sencillo determinar geoméricamente la expresión del retraso en el proyecto, aplicaremos la solución dada por el modelo general. La función continua determinante del perfil del proyecto  $R(t)$ , viene dada por  $R(t) = R_0$ , por lo que  $R(T_E) = R_0$ , valores que sustituidos en la expresión [VI.12],

<sup>105</sup> En la práctica, este tipo de perfil suele dar lugar a recursos ociosos, principalmente al principio y al final del Proyecto.

deben determinar el retraso en que incurre este tipo de proyectos en función del parámetro  $k$ :

$$T_R - T_E = \frac{k}{R_0} \int_0^{T_E} R_0 dt - \frac{k}{T_E R_0} \int_0^{T_E} t R_0 dt \quad [VI.13]$$

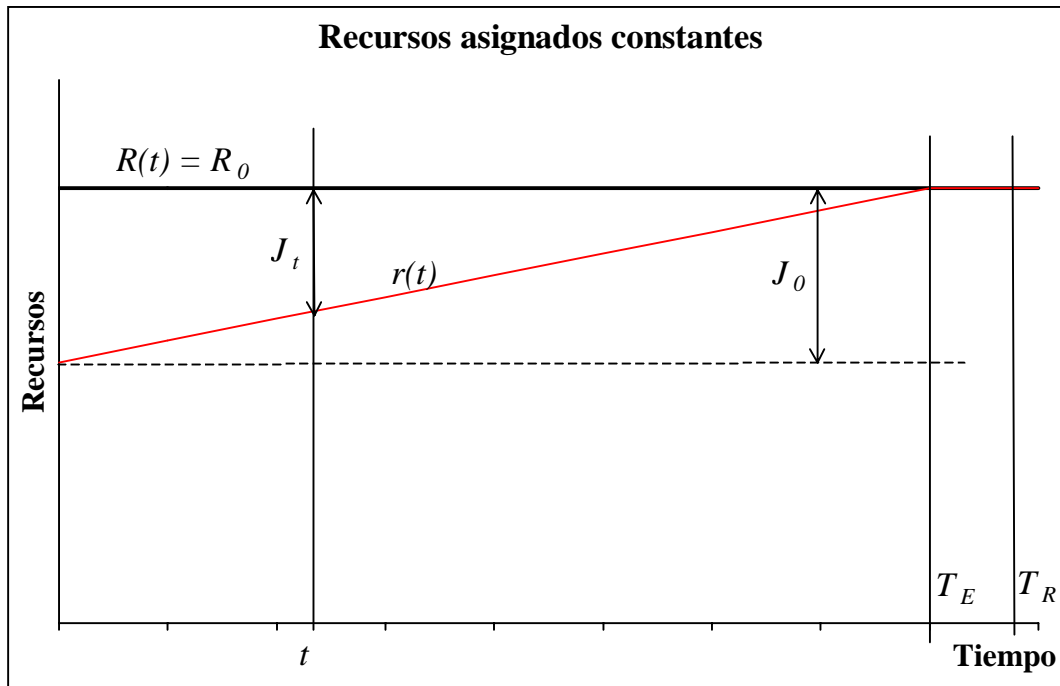


Fig. VI.4

El desarrollo de la expresión anterior (para más detalles ver Anexo de cálculos), conduce al siguiente resultado:

$$T_R - T_E = \frac{k}{2} T_E \quad [VI.14]$$

Partiendo de la hipótesis de que siempre existen retrasos ( $T_R - T_E > 0$ ), la expresión [VI.14] nos indica que siempre se cumplirá:  $0 < k < 1$ . Cuando en la Organización exista experiencia histórica de proyectos que obedezcan al perfil analizado, sería factible obtener el valor “ $k$ ” como constante (valor medio) de esa

Organización para este tipo de proyectos<sup>106</sup>, que vendría dado por la expresión que se inserta a continuación.

$$k = 2 \frac{T_R - T_E}{T_E} \quad [\text{VI.15}]$$

En la práctica, el valor de  $k$  sería una media de valores obtenidos para los proyectos de este tipo que la Organización ha ido desarrollando y de los que se conoce el retraso en que se incurrió.

El Modelo Básico, aquí analizado, será un caso particular del Modelo Lineal de Recursos Crecientes-Decrecientes (MLRCD) que se plantea a continuación.

#### **VI.2.4 Perfil tipo “MLRCD” (de recursos crecientes-decrecientes o de los dos pendientes)**

El modelo que se presenta a continuación, aun siendo un caso particular de todos los perfiles posibles, tiene la generalidad suficiente como para que su estudio sea de interés. Ya hemos comentado cómo la experiencia muestra que los perfiles de la mayoría de proyectos de ingeniería de plantas industriales, presentan una primera etapa en la que los recursos instantáneos crecen y un segunda etapa en la que decrecen. Es evidente que ambas etapas no van a evolucionar linealmente, pero es posible realizar una aproximación lineal al modelo y, de esta forma, poder aplicar al perfil del proyecto real las relaciones encontradas entre los parámetros. El modelo tratado en el apartado anterior (MB), es una caso particular de éste, como se podrá comprobar posteriormente.

---

<sup>106</sup> Cuando todos los proyectos realizados por la Ingeniería encajen en un mismo tipo de perfil, nos referiremos a la constante  $k$  como “ $k$  de la Organización”.

### VI.2.4.1 Puntos singulares del modelo MLRCD

Tomando como fundamento el modelo general, determinaremos tres puntos singulares que van a definir la “personalidad” del perfil en cuestión. Deben ser puntos fácilmente localizables o, en su caso, aproximables en cualquier perfil de un proyecto real. Son los siguientes:

- Recursos iniciales ( $R_0 = R(0)$ ): Es el nivel de recursos aplicado al inicio del proyecto, es decir, cuando  $t = 0$ . Servirá de referencia para la definición de los otros puntos.
- Recursos máximos ( $R_h = R(h \times T_E)$ ): Es el nivel de recursos más alto del perfil, localizado en el intervalo  $(0, T_E)$ . El punto máximo viene definido por el parámetro “ $h$ ” siendo  $t = h \times T_E$ , con  $0 < h < 1$ <sup>107</sup>. La relación entre los recursos máximos y los iniciales determinará el parámetro “ $q$ ”, de la forma  $q = R_h / R_0 \geq 1$ .
- Recursos finales ( $R_m = R(T_E)$ ): Es el nivel de recursos que corresponde a la etapa final del proyecto. Por hipótesis, lo supondremos constante mientras el proyecto esté en la fase final, habiendo incurrido en demora. La relación entre los recursos finales y los iniciales determinará el parámetro “ $m$ ”, de la forma  $m = R_m / R_0$ .

Hemos relacionado los parámetros “ $h$ ”, “ $m$ ” y “ $q$ ” con los tres puntos singulares del perfil. Con relación al parámetro “ $h$ ”, y como ya se ha dicho anteriormente, por definición se cumplirá  $0 < h < 1$ . Con relación a los parámetros “ $m$ ” y “ $q$ ”, por hipótesis se cumplirá  $q \geq m$ .

<sup>107</sup> En los proyectos reales, la función  $R(t)$  suele tener más de un máximo local.

### VI.2.4.2 Función $R(t)$ del modelo MLRCD

La función  $R(t)$  o perfil del proyecto (Fig. VI.5) vendrá expresada por dos segmentos lineales que llamaremos  $R_1(t)$  y  $R_2(t)$  (para detalles ver Anexo de cálculo), de la forma que indica la expresión [VI.16].

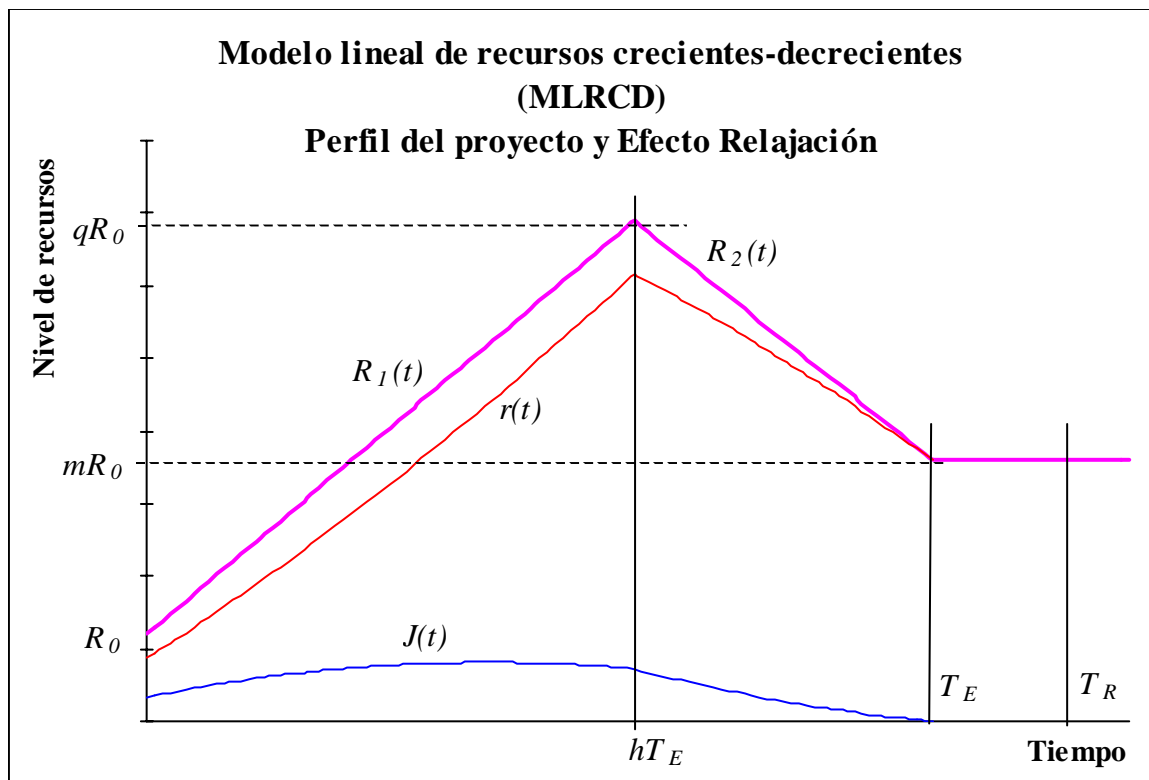


Fig. VI.5

$$R(t) = \left\{ \begin{array}{l} R_1(t) = R_0 + R_0 \frac{q-1}{hT_E} t \quad (0 < t \leq hT_E) \\ R_2(t) = R_0 \frac{q-mh}{1-h} - R_0 \frac{q-m}{T_E(1-h)} t \quad (hT_E < t \leq T_E) \end{array} \right\} \quad [VI.16]$$

El primer tramo del perfil es una recta  $R_1(t)$  de ordenada en el origen ( $R_1(0)$ ) y pendiente positiva ( $\angle$ ) dadas, respectivamente, por las expresiones:

$$R_1(0) = R_0 ; \quad \angle = R_0 \frac{q-1}{hT_E} \quad [VI.17]$$



El segundo tramo del perfil es una recta  $R_2(t)$  cuya ordenada en el origen y pendiente negativa vienen dadas, respectivamente, por las expresiones:

$$R_2(0) = R_0 \frac{q-mh}{1-h}; \quad \angle = -R_0 \frac{q-m}{T_E(1-h)} \quad [\text{VI.18}]$$

Los recursos totales que se habrían de aplicar al Proyecto y que se corresponderían con la utilidad total del mismo, vendrán dados por la expresión:

$$R_T = \int_0^{T_E} R(t) dt = \int_0^{hT_E} R_1(t) dt + \int_{hT_E}^{T_E} R_2(t) dt \quad [\text{VI.19}]$$

Calculando cada una de las integrales definidas, correspondientes a los dos tramos de la función  $R(t)$ , obtenemos, respectivamente:

$$\int_0^{hT_E} R_1(t) dt = R_0 hT_E \left( \frac{q+1}{2} \right); \quad \int_{hT_E}^{T_E} R_2(t) dt = R_0 T_E \left( \frac{(q+m)(1-h)}{2} \right) \quad [\text{VI.20}]$$

Y de la suma de ambas obtenemos la integral definida de la función  $R(t)$ , que representa los recursos totales que va a necesitar el proyecto para su ejecución y que vienen dados por la expresión:

$$R_T = \int_0^{T_E} R(t) dt = R_0 T_E \left( \frac{(1-m)h + q + m}{2} \right) \quad [\text{VI.21}]$$

Ante la hipótesis de que los recursos totales son constantes<sup>108</sup> (si no son aprovechados íntegramente por el proyecto, se incurrirá en una demora en la que habrá que aportar los recursos perdidos), de [VI.21] se desprende la existencia de una relación implícita entre los parámetros  $(h,m,q)$ , dada por la expresión:

<sup>108</sup> La utilidad total del proyecto es inherente al mismo e independiente del instante en que se concluya. De ahí que consideremos constante a  $R_T$ .

$$(1 - m)h + q + m = \frac{2R_T}{R_0 T_E} = C \quad [VI.22]$$

A la constante “C” la llamamos “Constante Característica”<sup>109</sup>. Representa el doble de la relación entre los recursos totales requeridos por el proyecto y los recursos totales correspondientes a un perfil plano de nivel  $R_0$ . En el MB, al ser  $m=1$  y  $q=1$ , con “h” cualquiera,  $C=2$ . Esta constante será utilizada para establecer esa relación implícita entre los parámetros, cuando tratemos de ajustar a un perfil real el modelo MLRCD.

### VI.2.4.3 Cálculo del retraso en el modelo MLRCD

Aplicando [VI.12] a este modelo, obtendremos la expresión del retraso del proyecto en función de  $k$  y de los parámetros “h”, “m”, “q”. Para ello daremos los pasos imprescindibles para su seguimiento, no obstante, los detalles podrán ser consultados en el Anexo de cálculos. El primer sumando de la expresión [VI.12] queda de la forma:

$$\frac{k}{R(T_E)} \int_0^{T_E} R(t) dt = \frac{k}{R(T_E)} \left( \int_0^{hT_E} R_1(t) dt + \int_{hT_E}^{T_E} R_2(t) dt \right) \quad [VI.23]$$

Teniendo en cuenta que  $R(T_E) = m \times R_0$  y que el valor de la integral definida equivalente a  $R_T$  ya ha sido calculada (ver expresión [VI.21]), obtenemos (ver Anexo de cálculos):

$$\frac{k}{R(T_E)} \int_0^{T_E} R(t) dt = \frac{k T_E}{m} \left( \frac{(1 - m)h + q + m}{2} \right) \quad [VI.24]$$

---

<sup>109</sup> Obsérvese cómo la constante característica podría ser considerada otra medida de la utilidad total del proyecto, ya que su relación con  $R_T$  es constante.

El segundo sumando de la expresión [VI.12] quedará de la forma:

$$\frac{k}{T_E R(T_E)} \int_0^{T_E} t R(t) dt = \frac{k}{T_E R(T_E)} \left( \int_0^{hT_E} t R_1(t) dt + \int_{hT_E}^{T_E} t R_2(t) dt \right) \quad [\text{VI.25}]$$

Y realizando las operaciones y simplificaciones, como se aprecian en el Anexo de cálculos:

$$\frac{k}{T_E R(T_E)} \int_0^{T_E} t R(t) dt = \frac{k T_E}{m} \left( \frac{(1-m)h^2 + (q-m)h + q + 2m}{6} \right) \quad [\text{VI.26}]$$

Si sumamos adecuadamente las expresiones [VI.24] y [VI.26], obtenemos el retraso que estábamos buscando y que viene dado por la expresión:

$$T_R - T_E = \frac{k T_E}{m} \left( \frac{(m-1)h^2 + (3-q-2m)h + 2q + m}{6} \right) \quad [\text{VI.27}]$$

La expresión anterior refleja lo que venimos llamando “demora del proyecto”, a la que más adelante nos referiremos como función  $D(h,m,q)$ .

#### VI.2.4.4 Eficiencia perdida en el modelo MLRCD

Volviendo a la figura VI.3, vemos como la función  $J(t)$  nos muestra el valor instantáneo de la eficiencia perdida por los recursos debido al  $ER$ . El valor acumulado hasta el instante  $T_E$  (eficiencia total perdida) viene dado por la expresión [VI.8]. La expresión [VI.9] establece la relación entre aquella y un determinado nivel de recursos durante el tiempo de demora del proyecto (hipótesis fundamental para la obtención del tiempo de demora), siendo  $m \times R_0$  el referido nivel de recursos y  $(T_R - T_E)$  la demora del proyecto. Si llevamos la expresión [VI.27] a la [VI.9] y la relacionamos con la [VI.8] se obtiene:

$$\int_0^{T_E} J(t) dt = kR_0T_E \left( \frac{(m-1)h^2 + (3-q-2m)h + 2q + m}{6} \right) \quad [VI.28]$$

Si tenemos en cuenta la expresión [VI.22], la anterior podría ponerse de la forma:

$$\int_0^{T_E} J(t) dt = \frac{2kR_T}{C} \left( \frac{(m-1)h^2 + (3-q-2m)h + 2q + m}{6} \right) \quad [VI.29]$$

De donde se desprende que la pérdida de eficiencia es directamente proporcional a  $k$  y a los recursos totales necesarios e inversamente proporcional a la constante característica.

#### VI.2.4.5 Los avances en el modelo MLRCD

Utilizando las definiciones para los diferentes conceptos de Avance del Proyecto, dadas en el punto VI.2.2.1, se obtienen las respectivas expresiones para este modelo:

a) Avance teórico en el instante “ $t$ ” ( $0 < t \leq T_E$ ): 
$$\frac{100 \int_0^t R(t) dt}{\frac{R_0 T_E}{2} [(1-m)h + q + m]} (\%)$$

b) Avance estimado en el instante “ $t$ ” ( $0 < t \leq T_E$ ): 
$$\frac{100 \int_0^t r(t) dt}{\frac{R_0 T_E}{2} [(1-m)h + q + m]} (\%)$$

Las dos expresiones anteriores tendrán dos formas diferentes, según se considere la evaluación en los subintervalos ( $0 < t \leq hT_E$ ) o ( $hT_E < t \leq T_E$ ).

$$\text{c) Avance real en el instante "t" } (0 < t \leq T_E): \frac{100 \int_0^t r(t)dt}{mR_0(T_R - T_E) + \int_0^{T_E} r(t)dt} (\%)$$

Que también tendrá dos formas diferentes, según se considere la evaluación en los subintervalos  $(0 < t \leq hT_E)$  o  $(hT_E < t \leq T_E)$ . Pero también puede ser evaluado el avance en un instante que se encuentre en la zona de demora del proyecto:

$$\text{d) Avance real en el instante "t" } (T_E < t \leq T_R): \frac{100 \left( \int_0^{T_E} r(t)dt + mR_0(t - T_E) \right)}{mR_0(T_R - T_E) + \int_0^{T_E} r(t)dt} (\%)$$

Las figuras VI.8 y VI.10 muestran las curvas de avance de dos proyectos ejemplos. La ordenada se refiere a valores de recursos acumulados en términos absolutos. En el Anexo de cálculos se darán detalles adicionales para estos conceptos de avances.

### VI.3 LA CONSTANTE "k" DE LA ORGANIZACIÓN

En los apartados anteriores hemos detectado algunas de las relaciones existentes entre los parámetros del proyecto para el modelo MLRCD, basándose en las hipótesis y premisas previamente planteadas. Uno de los parámetros que aparecen en todas las expresiones anteriormente deducidas es "k" o constante de la Organización. Si de la expresión [VI.27] despejamos k:

$$k = \frac{6m(T_R - T_E)}{T_E [(m-1)h^2 + (3-q-2m)h + 2q + m]} \quad \text{[VI.30]}$$

En la expresión anterior detectamos que una vez conocida la fecha real de conclusión del proyecto y los parámetros que determinan el “perfil” del mismo, puede obtenerse el valor de  $k$  asociado a ese proyecto. En alguna ocasión anterior nos hemos referido a la complejidad asociada a este parámetro, estableciendo como criterio que, aunque existan diferentes valores para cada proyecto, determinaríamos un valor único para la Organización.

Una vez establecida la relación existente entre la constante  $k$  y los parámetros del modelo MLRCD para cada proyecto (ver expresión [VI.30]), cabe preguntarse cómo plantear esa relación en la práctica y extraer información de los proyectos reales. Nuestra propuesta consiste en observar los proyectos reales bajo las siguientes suposiciones:

- a) Es conocida la cadencia real de recursos aplicados al desarrollo del proyecto (perfil real del proyecto).
- b) Es conocido el retraso en que incurrió el proyecto, con relación a la estimación inicial (demora del proyecto).
- c) Se dispone de información de un conjunto de proyectos, ya ejecutados, que pueden ser considerados representativos de la actividad de esa Organización. Esa información contendrá, al menos, la requerida en los dos puntos anteriores.

Una vez obtenido el valor de  $k$  para cada proyecto, su media ponderada con los recursos totales ( $R_T$ ) consumidos en cada caso, será adoptada como valor de  $k$  de la Organización, que es lo que venimos llamando “factor de relajación inicial”.

#### VI.4 LA FUNCIÓN $D(h,m,q)$ “DEMORA DEL PROYECTO”

Sobre la expresión [VI.27], que depende de los parámetros  $(h,m,q)$ , podemos realizar un análisis de la incidencia que variaciones de los referidos parámetros, tendrán sobre el retraso en la terminación del proyecto. La referida expresión quedaría de la forma:

$$D(h,m,q) = \frac{kT_E}{6} \left( \frac{(m-1)h^2 + (3-q-2m)h + 2q + m}{m} \right) \quad [\text{VI.31}]$$

Las derivadas parciales de la función  $D(h,m,q)$  con respecto a cada una de las variables servirán de base para el referido análisis.

$$\frac{\partial D}{\partial h} = \frac{kT_E}{6m} (2h(m-1) + (3-q-2m)) \quad [\text{VI.32}]$$

Las variaciones realizadas sobre “ $h$ ” tienen una incidencia sobre la demora creciente con el valor de ese parámetro, de acuerdo con una recta de pendiente  $2(m-1)$ , siempre positiva y con ordenada en el origen de valor  $(3-q-2m)$ .

$$\frac{\partial D}{\partial m} = \frac{kT_E}{6} \left( \frac{h^2 + (q-3)h - 2q}{m^2} \right) \quad [\text{VI.33}]$$

Las variaciones realizadas sobre “ $m$ ” tienen una incidencia sobre la demora que aumenta de forma cuadrática con el valor del parámetro  $h$ . Simultáneamente disminuyen a medida que aumenta “ $m$ ”.

$$\frac{\partial D}{\partial q} = \frac{kT_E}{6m} (2-h) \quad [\text{VI.34}]$$

Las variaciones realizadas sobre “ $q$ ” tienen una incidencia sobre la demora que disminuye con el valor del parámetro  $h$ , de acuerdo con una recta de pendiente “ $-1$ ” y ordenada en el origen de valor 2.

Podemos analizar la función  $D(h,m,q)$  desde otra perspectiva. En lugar de considerarla libremente variable, la podemos someter a la restricción impuesta por [VI.22], de dos formas, primero considerando que “ $q$ ” viene dado, por lo que pasaría a depender sólo de “ $h$ ” y “ $m$ ”, es decir, tendríamos una nueva función dada por la expresión:

$$D(h,m) = \frac{kT_E}{6} \left( \frac{h(1+m-C) + 2C - m}{m} \right) \quad [\text{VI.35}]$$

En segundo lugar, si consideramos que “ $m$ ” viene dado, la demora pasará a depender sólo de “ $h$ ” y “ $q$ ”. En este caso la expresión sería:

$$D(h,q) = kT_E \left( \frac{h^2(C-2) + h(2-2C-q) + q + C}{C-h-q} \right) \quad [\text{VI.36}]$$

Las funciones dadas por [VI.35] y [VI.36], una vez definidos los parámetros “ $m$ ” y “ $q$ ” en un determinado proyecto, quedarían como funciones únicamente de “ $h$ ”, de la forma  $D_m(h)$  y  $D_q(h)$ . Estas funciones expresarían la incidencia del parámetro  $h$  en el retraso del proyecto, teniendo en cuenta que se han fijado los otros parámetros. Es de destacar que una vez determinados los parámetros “ $m$ ” y “ $q$ ”, el parámetro “ $h$ ” muestra cuánto se anticipa o retrasa la aplicación de los recursos. El valor  $h = 0$  significaría máxima anticipación y  $h = 1$ , máximo retraso. De estas funciones se aporta una gráfica formando parte del ejemplo numérico que se describe más adelante. Como se observa en esa gráfica (Fig. VI.6), la intersección de ambas funciones determina la demora del proyecto para el parámetro “ $h$ ” elegido.



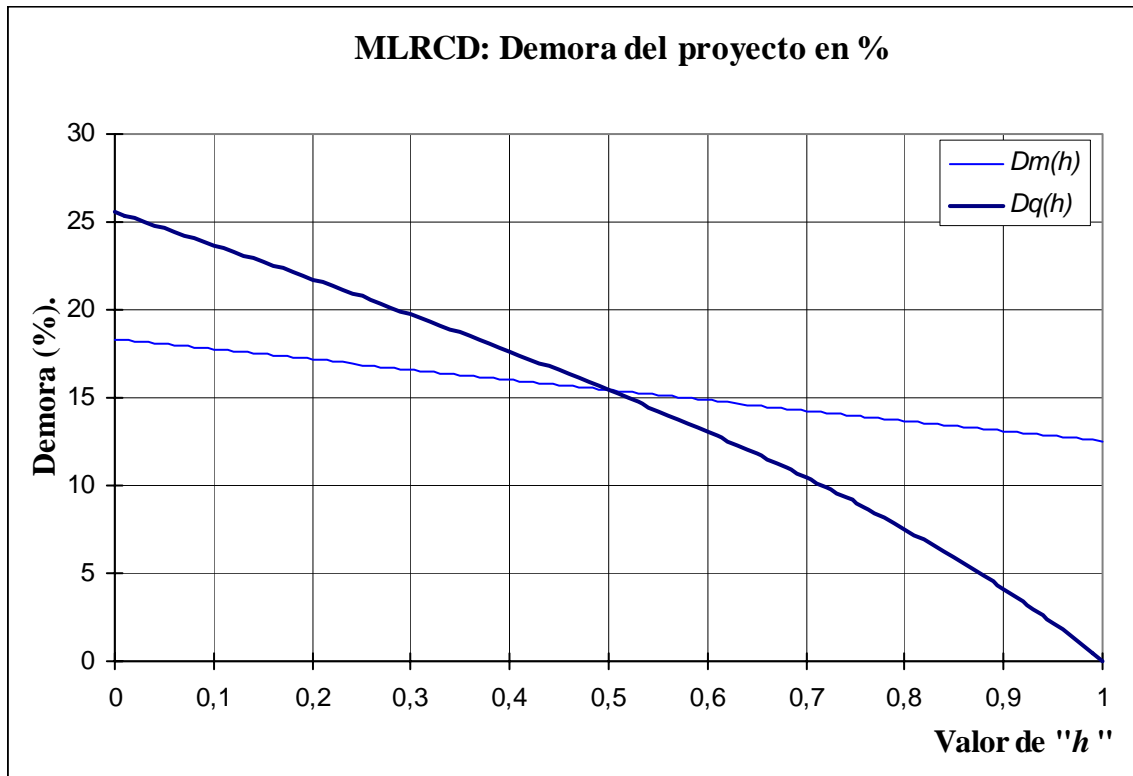


Fig. VI.6

A continuación insertamos una tabla en la que se recogen los resultados, aplicados a dos casos diferentes, que se derivan de provocar incrementos en los valores de “ $h$ ”. Se hace notar cómo se trasladan los incrementos de “ $h$ ”, sobre “ $m$ ” y “ $q$ ”, así como las respectivas incidencias en las demoras porcentuales calculadas. Para los dos casos que se estudian se han considerado como datos los valores:  $R_0 = 1$ ;  $T_E = 100$ ;  $k = 0,2$ .

Es de destacar cómo al desplazar la aplicación de recursos hacia el final del Proyecto, ( $\Delta h > 0$ ) se obtienen cada vez retrasos más pequeños.

También se desprende de la tabla que sigue, el efecto notable que el valor de “ $m$ ” tiene sobre los retrasos, por otra parte evidente, ya que “ $m$ ” determina el nivel de recursos constantes durante la demora del proyecto.

<b>Casos</b>	<b><i>h</i></b>	<b><i>q</i></b>	<b><i>m</i></b>	<b><math>R_T</math></b>	<b><math>T_R - T_E</math> (%)</b>	<b>Observaciones</b>
<b>A<sub>0</sub></b>	0,5	5	2	325	15,42	Primer caso de partida
<b>A<sub>1</sub></b>	0,6	5,1	2	325	14,83	Caso 1: m=cte. ( $\Delta h=0,1$ )
<b>A<sub>2</sub></b>	0,7	5,2	2	325	14,25	Caso 2: m=cte. ( $\Delta h=0,2$ )
<b>A<sub>3</sub></b>	0,6	5	2,25	325	13,04	Caso 3: q=cte. ( $\Delta h=0,1$ )
<b>A<sub>4</sub></b>	0,7	5	2,65	325	10,50	Caso 4: q=cte. ( $\Delta h=0,2$ )
<b>B<sub>0</sub></b>	0,5	10	5	650	11,67	Segundo caso de partida
<b>B<sub>1</sub></b>	0,6	10,4	5	650	11,20	Caso 1: m=cte. ( $\Delta h=0,1$ )
<b>B<sub>2</sub></b>	0,7	10,8	5	650	10,73	Caso 2: m=cte. ( $\Delta h=0,2$ )
<b>B<sub>3</sub></b>	0,6	10	5,97	650	9,15	Caso 3: q=cte. ( $\Delta h=0,1$ )
<b>B<sub>4</sub></b>	0,7	10	7,6	650	6,71	Caso 4: q=cte. ( $\Delta h=0,2$ )

En esta tabla se pueden observar las relaciones cuantitativas entre los parámetros del perfil (modelo MLRCD) y la demora del proyecto. A continuación se comenta cada uno de los casos y variantes que aparecen en la tabla:

- **A<sub>0</sub>** es el primer caso de partida, consistente en un perfil al que corresponden unos recursos totales de 325 unidades y que ha incurrido en un retraso del 15,42% (obtenido a partir de los valores de los parámetros).
- **A<sub>1</sub>** es la primera variante, suponiendo que se retrasa la aplicación de los recursos un equivalente a un  $\Delta h=0,1$ . Para que se mantenga constante  $C$  y dado que “ $m$ ” se supone constante, se precisa incrementar “ $q$ ” ( $\Delta q = 0,1$ ).
- **A<sub>2</sub>** es la segunda variante, suponiendo que se retrasa la aplicación de los recursos un equivalente a un  $\Delta h=0,2$ . Para que se mantenga constante  $C$  y dado que “ $m$ ” se supone constante, se precisa incrementar “ $q$ ” ( $\Delta q = 0,2$ ).
- **A<sub>3</sub>** es la tercera variante, suponiendo que se retrasa la aplicación de los recursos un equivalente a un  $\Delta h=0,1$ . Para que se mantenga constante  $C$  y dado que “ $q$ ” se supone constante, se precisa incrementar “ $m$ ” ( $\Delta m = 0,25$ ).

- **A<sub>4</sub>** es la cuarta variante, suponiendo que se retrasa la aplicación de los recursos un equivalente a un  $\Delta h=0,2$ . Para que se mantenga constante  $C$  y dado que “ $q$ ” se supone constante, se precisa incrementar “ $m$ ” ( $\Delta m = 0,65$ ).
- **B<sub>0</sub>** es el segundo caso de partida, consistente en un perfil al que corresponden unos recursos totales de 650 unidades (el doble que en el caso A) y que ha incurrido en un retraso del 11,67% (obtenido a partir de los valores de los parámetros). El seguimiento de las cuatro variantes para este segundo caso es similar al primer caso.

La relación entre los incrementos de los parámetros que cambian, puede observarse analizando las derivadas que resultan de considerar la constante característica  $C = (1 - m) h + q + m$ :

$$\frac{dq}{dh} = -\frac{\partial C / \partial h}{\partial C / \partial q} = m - 1; \text{ que en forma incremental : } \Delta q = (m - 1)\Delta h$$

$$\frac{dm}{dh} = -\frac{\partial C / \partial h}{\partial C / \partial m} = \frac{m - 1}{1 - h}; \text{ que en forma incremental : } \Delta m = \frac{m - 1}{1 - h} \Delta h$$

De las expresiones anteriores se desprenden las conclusiones siguientes:

- Si efectuamos pequeños cambios en “ $h$ ” y mantenemos constante  $m$ , debemos compensarlos con cambios en “ $q$ ”. Se observa que cuanto más se acerca “ $m$ ” a 1, los cambios en “ $q$ ” se hacen más pequeños. En la tabla anterior y para los casos “A”, se observa que  $\Delta q = \Delta h$ , mientras en los casos “B” se observa que  $\Delta q = 4\Delta h$ .
- Si efectuamos pequeños cambios en “ $h$ ” y mantenemos constante “ $q$ ”, debemos compensarlos con cambios en “ $m$ ”. Se observa que a medida que “ $h$ ” se acerca a 1, los cambios en “ $h$ ” se hacen más grandes. En la tabla anterior,

tanto para los casos “A” como para los “B”, se observa que  $\Delta m$  crece más que linealmente con  $\Delta h$ .

## VI.5 EJEMPLO NUMÉRICO

Supongamos un proyecto del que se dan a continuación su perfil de recursos y sus parámetros:

- Tiempo estimado para su ejecución,  $T_E = 100$  días
- Recursos iniciales asignados,  $R_0 = 25$  hh
- Factor de relajación (típico de la Organización),  $k = 0,2$
- Parámetro  $h$  (intervalo de recursos crecientes),  $h = 0,5$
- Parámetro  $q$  (máximo nivel de los recursos),  $q = 4,44$
- Parámetro  $m$  (nivel de recursos en  $T_E$ ),  $m = 2$

Utilizando los resultados del modelo MLRCD para este caso, con el cálculo implantado en una aplicación sobre la hoja de cálculo Excel™, obtenemos una demora del proyecto por dos caminos diferentes:

- Numéricamente, aplicando los resultados del modelo a los datos de este ejemplo, obteniendo un valor del **14,02%**.
- Analíticamente, mediante el cálculo previo de las áreas sobre el gráfico obtenido con los datos del ejemplo, resultando un valor del **14,00%**.

Como puede observarse, la diferencia entre los valores obtenidos por los dos caminos (el primero aplicando la expresión [VI.27] y el segundo mediante la automatización del modelo sobre Excel™), es relativamente pequeña.

A continuación se insertan los gráficos correspondientes a los perfiles del Proyecto y las curvas de avance (Fig. VI.7 y Fig. VI.8) respectivamente.

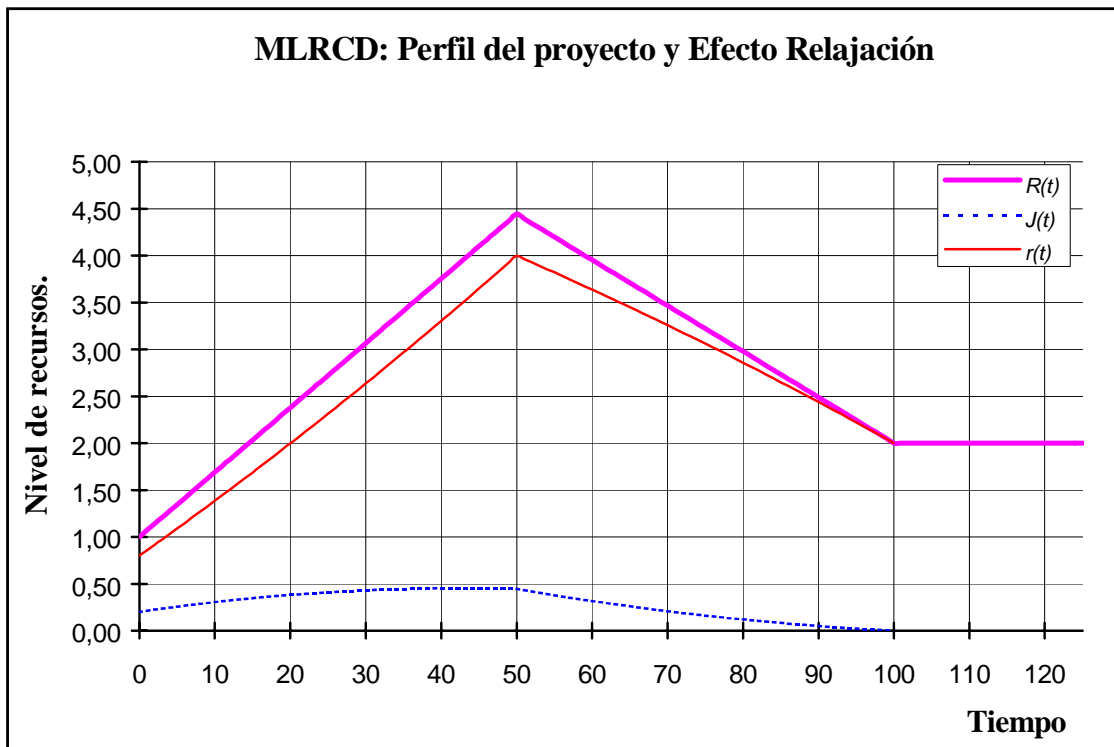


Fig. VI.7

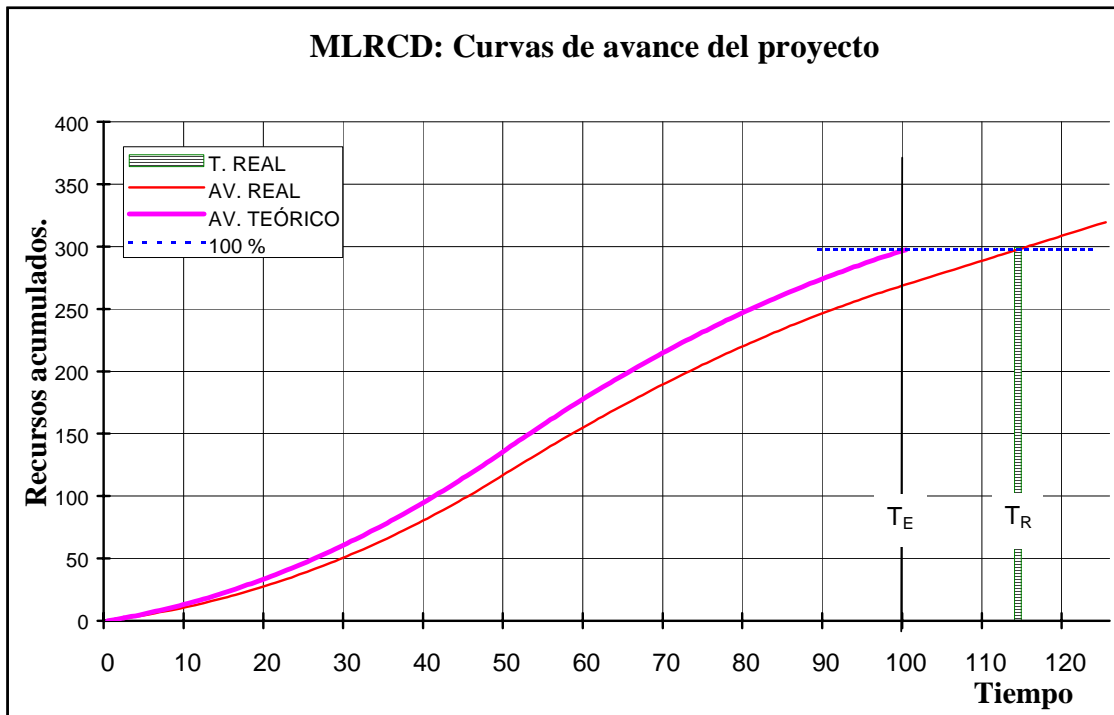


Fig. VI.8

## VI.6 TRATAMIENTO DE UN PERFIL CUALQUIERA

Si en nuestra aplicación desarrollada sobre Excel™ en lugar de introducir un perfil MLRCD (caracterizado por sus parámetros) introducimos un perfil real cualquiera (caracterizado por ser un perfil escalera), podemos ajustarlo al modelo MLRCD de forma que se obtenga como resultado la demora del proyecto asociado a ese perfil (en el caso de conocer la constante  $k$  de la Organización). Otra alternativa sería introducir como dato la demora en que se ha incurrido y obtener el valor de  $k$  asociado a ese perfil.

Para la creación de un perfil libre (nombre que adoptamos para indicar que nos referimos a un perfil cualquiera), hemos dividido el intervalo  $(0, T_E)$  en 25 partes iguales<sup>110</sup>, de tal forma que asociamos a cada una de esas partes el valor de los recursos aplicados. El resultado será una función escalera como perfil del proyecto, que será utilizada en el proceso de cálculo para la obtención de los parámetros que determinan el modelo MLRCD equivalente. A continuación se propone un ejemplo.

Supongamos un proyecto real cuyo perfil de recursos y sus parámetros se dan a continuación:

- Tiempo estimado para su ejecución,  $T_E = 300$  días
- Recursos iniciales asignados (los del primer periodo) =  $100$  hh, el valor de  $R_0$  será obtenido por la aplicación.
- Factor de relajación (típico de la Organización),  $k = 0,2$
- Recursos totales aplicados al proyecto<sup>111</sup>,  $R_T = 9500$  hh
- Demora del proyecto medida,  $D = 10\%$  (30 días)

---

<sup>110</sup> La elección de 25 intervalos la hemos realizado buscando un equilibrio entre la rapidez para confeccionar el perfil “libre” y una precisión mejor que el 1%.

<sup>111</sup> Obsérvese que los recursos totales aplicados superan a los que aparecen en la tabla. Su explicación está en que si ha habido retraso, algunos recursos se aplicaron después de la fecha de terminación estimada. Este exceso de recursos no ha alterado la utilidad total del proyecto, que debe corresponder a los recursos aplicados hasta  $T_E$  (sin  $ER$ ), de acuerdo con nuestras hipótesis.

- Recursos aplicados en la tabla que sigue:

<b>PERIODO</b>	<b>RECURSOS APLICADOS (hh), hasta <math>T_E</math></b>
1	100,0
2	120,0
3	160,0
4	200,0
5	200,0
6	220,0
7	260,0
8	220,0
9	240,0
10	280,0
11	320,0
12	400,0
13	450,0
14	470,0
15	500,0
16	560,0
17	600,0
18	580,0
19	500,0
20	520,0
21	450,0
22	400,0
23	360,0
24	350,0
25	330,0
<b>TOTAL =</b>	<b>8.790,0</b>

Reflejando el perfil dado en la aplicación Excel™ e introduciendo los datos disponibles, tenemos las siguientes opciones:

- Introducir el valor  $k$  de la Organización, obteniéndose como dato el retraso esperado para ese perfil.
- No introducir el valor  $k$ , obteniéndose como dato el valor  $k$  de la Organización (el correspondiente a este perfil dado).

En el primer caso (valor  $k = 0,2$ ) observamos los siguientes resultados, que se reflejan en los gráficos de las figuras VI.9 y VI.10:

Parámetros del modelo MLRCD:

- $R_0 = 7,5$
- $m = 3,67$
- $q = 6,09$
- $h = 0,74$

Otros resultados:

- Retraso calculado con los parámetros del modelo y con el valor de  $k = 8,72\%$  (26 días)
- Retraso calculado gráficamente con el valor de  $k = 8,70\%$
- Días naturales por periodo = 12 (300 días / 25 periodos)
- Horas por día natural = 5,71 (40 horas semanales / 7 días)

En el segundo caso (no se introduce el valor  $k$ ) se obtienen los mismos resultados que se han reflejado anteriormente, a los que debemos añadir un valor para la constante  $k$  que corresponde a los parámetros calculados y al retraso que se introdujo como dato (30 días):  $k = 0,23$ . Si este valor de  $k$  lo introducimos como dato (en lugar de 0,2), observamos cómo entonces el retraso calculado se corresponde con el que inicialmente se introdujo como dato (30 días).



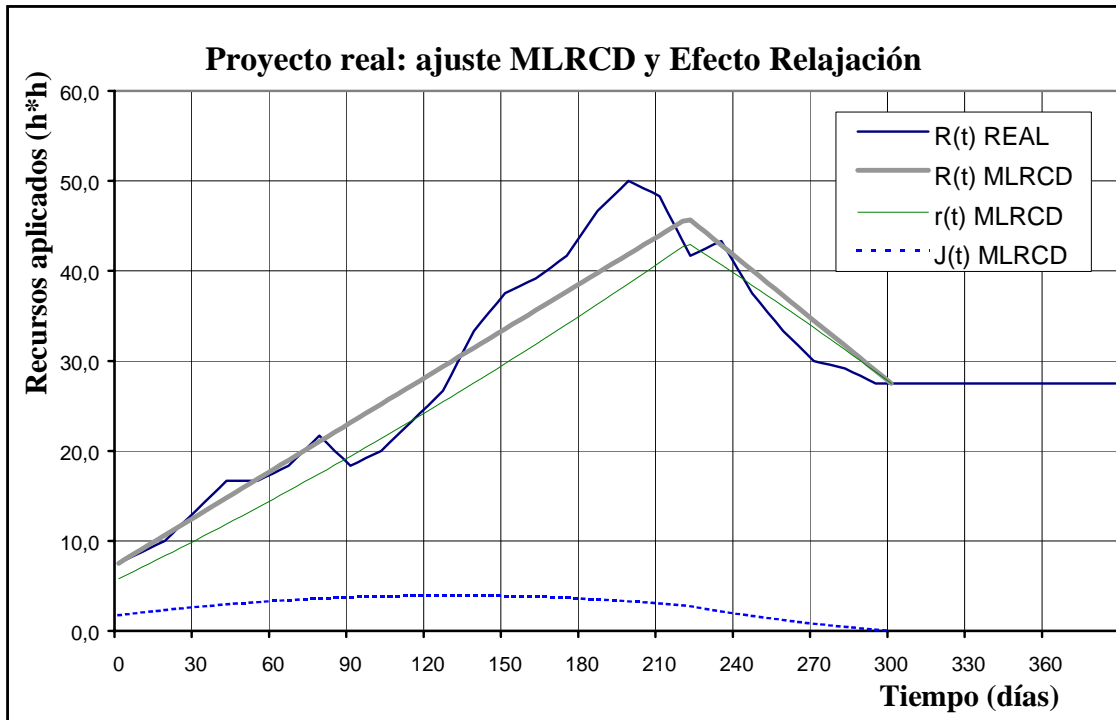


Fig. VI.9

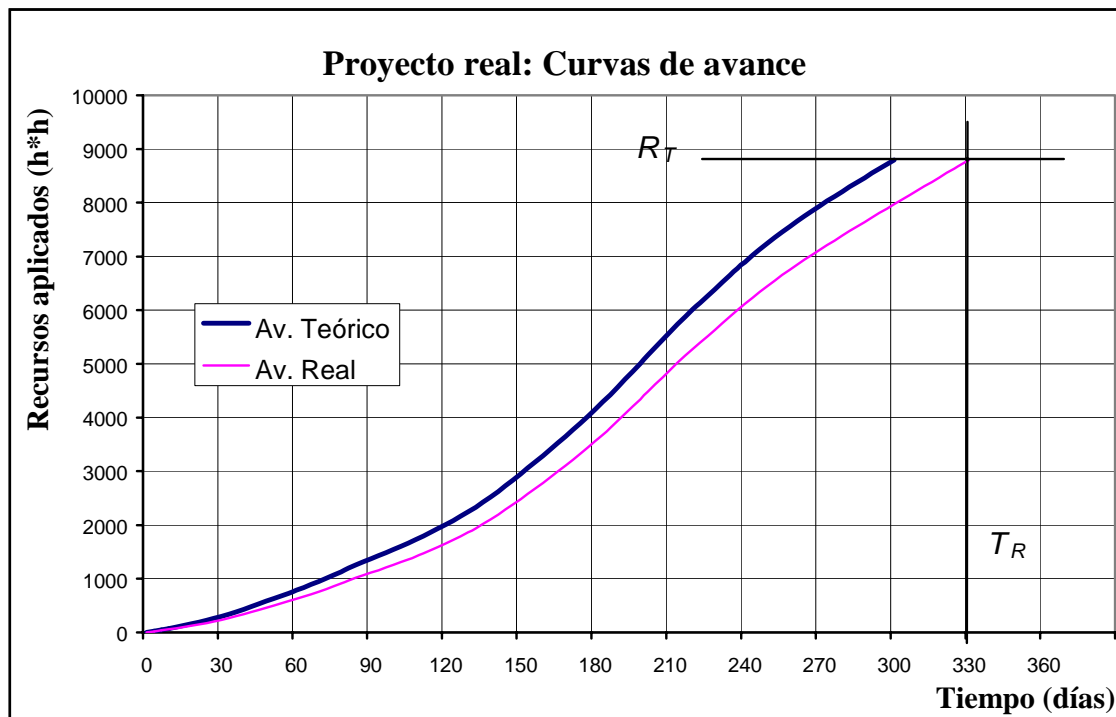


Fig. VI.10

*Observaciones a los resultados de la aplicación:* Aunque los datos introducidos corresponden a 25 periodos, la aplicación realiza un reparto sobre 100 periodos, con la finalidad de que el perfil MLRCD resultante refleje lo más fielmente posible la realidad. Esto trae consigo unas ligeras discrepancias entre los recursos introducidos totales y los obtenidos por la aplicación. En nuestro ejemplo se han introducido mediante la tabla 8.790hh, mientras la aplicación está considerando 8.800hh. Por otra parte, una vez efectuado el ajuste al modelo y medidos sobre él los recursos, observamos otra cantidad diferente (en este caso 8.794hh). Nótese cómo esas tres cantidades difieren en menos del 1%, precisión que se observará en cualquier caso que se analice.

*Observaciones a la Fig. VI.9:* Aunque los recursos aplicados en el primer periodo son 100hh, se debe tener en cuenta que ese periodo está integrado por 12 días, por lo que corresponde una media de 8,33hh/día (sería equivalente a 1,46 procesadores –valor decimal de la fracción 8,33/5,71–). De igual forma localizaríamos el máximo del perfil que corresponde al periodo 17:  $600/12=50hh$ , equivalentes a  $50/5,71=8,75$  procesadores.

## **VI.7 FORMA DE OPERAR LA APLICACIÓN DESARROLLADA SOBRE Excel™**

Utilizando como plataforma la hoja de cálculo Excel™, se ha desarrollado una aplicación que realiza los cálculos, ajustes y representaciones gráficas de las funciones que determinan los perfiles de los proyectos y otras informaciones.

La referida aplicación sirve para el tratamiento de cualquier proyecto, real o ficticio, con las restricciones ya comentadas de los 25 periodos en los que se divide el tiempo estimado  $T_E$ . Otras restricciones se refieren a la consideración de días naturales (en lugar de calendario laborable real), por lo que la distribución de

horas se realiza de forma uniforme (40 horas semanales corresponden a 5,71 horas por día natural).

### VI.7.1 Ajuste de un perfil “libre” al modelo MLRCD

Se trata de obtener de forma automática las funciones asociadas a un proyecto real, definido por su perfil, así como el valor de la demora (si se trata de analizar un proyecto ya ejecutado) o, en su caso, el de la constante  $k$  de la Organización (cuando se trata de calcular la demora en que incurriría el proyecto para ese perfil dado).

Los datos del proyecto que habría que introducir como inputs, serían los siguientes:

- Forma del perfil del proyecto (puede ser el estimado o el real de un proyecto ya concluido), se trata de introducir una tabla con los recursos aplicados ( $hh$ ) en cada uno de los 25 periodos en los que hemos dividido  $T_E$ . Cuando es el real, corresponderá a los recursos aplicados durante el periodo de ejecución teórico.
- Factor  $k$  de la Organización (factor de relajación inicial).
- Duración estimada del proyecto ( $T_E$ ) o periodo de ejecución teórico.
- Demora en que se incurrió (días), si se trata de un proyecto real.

Para la introducción del perfil de un proyecto real y con el fin de facilitar el reparto entre los 25 periodos, se ha desarrollado una hoja auxiliar en la que los datos se introducen en periodos de calendario (normalmente mensuales), pasando automáticamente a repartirse entre los referidos 25 periodos.

Los outputs del modelo serían las expresiones gráficas, ajustadas al proyecto real mediante el modelo MLRCD, de las funciones  $R(t)$ ,  $r(t)$ ,  $J(t)$ , así

como las curvas de avance estimado y corregida con el efecto relajación. Además, se obtendría el dato del retraso incurrido o de la constante  $k$ , según el que se haya considerado como input.

En el capítulo siguiente se analizarán un conjunto de proyectos reales y otro conjunto de ficticios, con la finalidad de extraer conclusiones de la aplicación del modelo MLRCD.

### **VI.7.2 Forma de operar de la aplicación para ajustar un perfil cualquiera al modelo MLRCD**

El algoritmo de ajuste está desarrollado sobre Visual-Basic de Excel, trabajando sobre dos restricciones fundamentales:

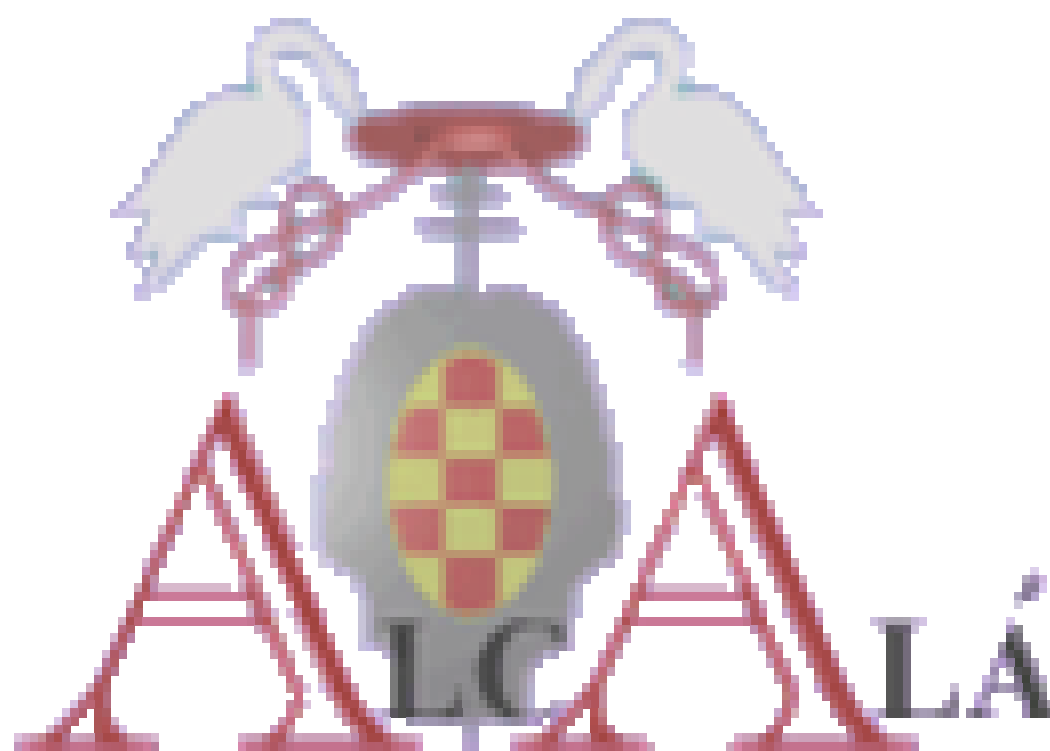
- Recursos totales aplicados hasta  $T_E$  constantes (con un margen de error del 0,1%).
- Centro de gravedad de los recursos aplicados hasta  $T_E$  constante (En este caso no se permite tolerancia, teniendo en cuenta que la precisión está acotada por la limitación a 100 puntos en el perfil).

Inicialmente el valor de  $R_0$  es el que se corresponda con los recursos aplicados al primer periodo, tomándose como referencia para el trazado de la primera pendiente (positiva).

El valor de los recursos aplicados en el último periodo se toma como referencia para el trazado de la segunda pendiente (negativa), se trata de la ordenada en  $T_E$ .

El algoritmo comienza generando una primera pendiente que implique el valor de los recursos buscados. La segunda pendiente se ha fijado en un valor

negativo suficientemente alto. Desde este momento se establece un proceso que modifica las dos pendientes hasta conseguir un perfil MLRCD que verifique las dos restricciones impuestas. Si fuera necesario y una vez ajustado el centro de gravedad, en una última fase del proceso se modifica el valor de  $R_0$  para mantener los recursos dentro de los límites establecidos.



## **CAPÍTULO VII**

### **RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PROYECTOS REALES**

#### **VII.1 INTRODUCCIÓN**

Davis recoge la siguiente conclusión de Kelley: "... la única forma de responder a la cuestión "¿Esto realmente vale para algo?" es la de aplicar el método, procedimiento o modelo a algún caso práctico y ver que ocurre. Si los resultados son razonables, existe algún mérito en el método. La generalización es muy difícil, salvo que se vea claro que determinadas propiedades del problema lo encajan en una determinada familia a la que hacer extensivo el uso del método" (Davis, 1973)<sup>112</sup>.

Hemos querido verificar el comportamiento del modelo MLRCD con perfiles de proyectos extraídos de la realidad. La información es de una

---

<sup>112</sup> Este extracto pertenece a la referencia 92 en Davis (1973), concretamente: [Muth, J.F. and Thompson, G.L. "Industrial Scheduling". Prentice-Hall (1963), Chapter 21, by J.E. Kelley, Jr.].

determinada Organización (Ingeniería) que ha venido desarrollando proyectos de plantas industriales en las últimas décadas. En particular sólo ha sido posible obtener información de los proyectos desarrollados en la década más reciente, correspondiéndose con la etapa en que se ha utilizado soporte informático para el control de los mismos. Concretamente la información obtenida corresponde a proyectos ejecutados desde febrero de 1989 hasta junio de 2000, momento en que se ha iniciado su análisis.

## VII.2 SELECCIÓN DE LOS PROYECTOS RELEVANTES

De la gran cantidad de datos disponibles ha sido necesario aplicar filtros para estudiar a fondo los más relevantes o representativos de esa Organización. Los criterios empleados han sido los siguientes:

- Proyectos cuyo inicio y terminación esté comprendido en el periodo que se ha indicado anteriormente.
- Proyectos cuya inversión sea superior a  $400 \times 10^6$  Ptas.
- Proyectos cuyos recursos totales aplicados hayan sido superiores a  $3600hh$ .
- Proyectos de plantas industriales o modificaciones de las mismas, descartando otros como: Ingenierías Básicas, Estudios de viabilidad, Preparación de terrenos, Intervención de Ingenierías externas, etc.

Con los filtros aplicados han resultado seleccionados para nuestro estudio un total de 13 proyectos. Aun así hemos tenido que descartar uno de esos proyectos por no haber funcionado con él el modelo MLRCD, debido posiblemente a la gran irregularidad mostrada en la aplicación de los recursos (perfil con muchos altibajos). En el caso de un proyecto cuya demora ha sido nula, nos hemos permitido su exclusión del estudio por la incidencia que un valor de  $k = 0$  tendría en el resultado global (otras razones en el punto VII.5). En resumen, sólo hemos podido contemplar como válidos 11 proyectos, cuyos datos



reflejamos en la tabla VII.1. La numeración dada a los proyectos (01 al 11) es simplemente el orden en que fueron analizados.

Existen otros condicionantes importantes en los datos disponibles que restan precisión a los resultados que se han obtenido. A ellos nos referiremos más adelante.

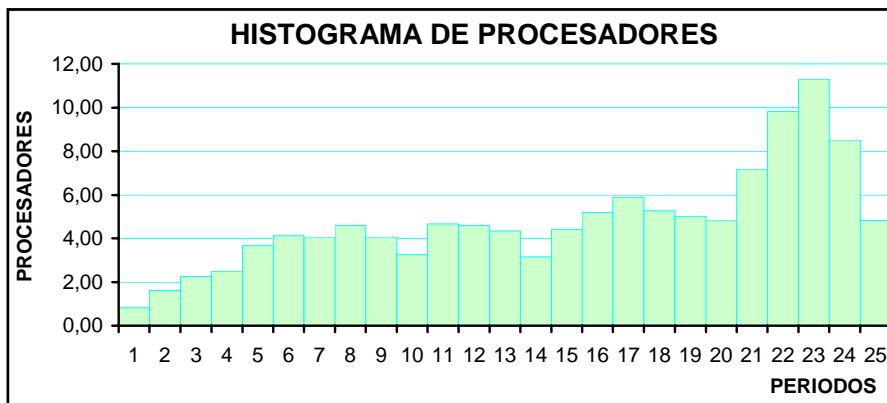
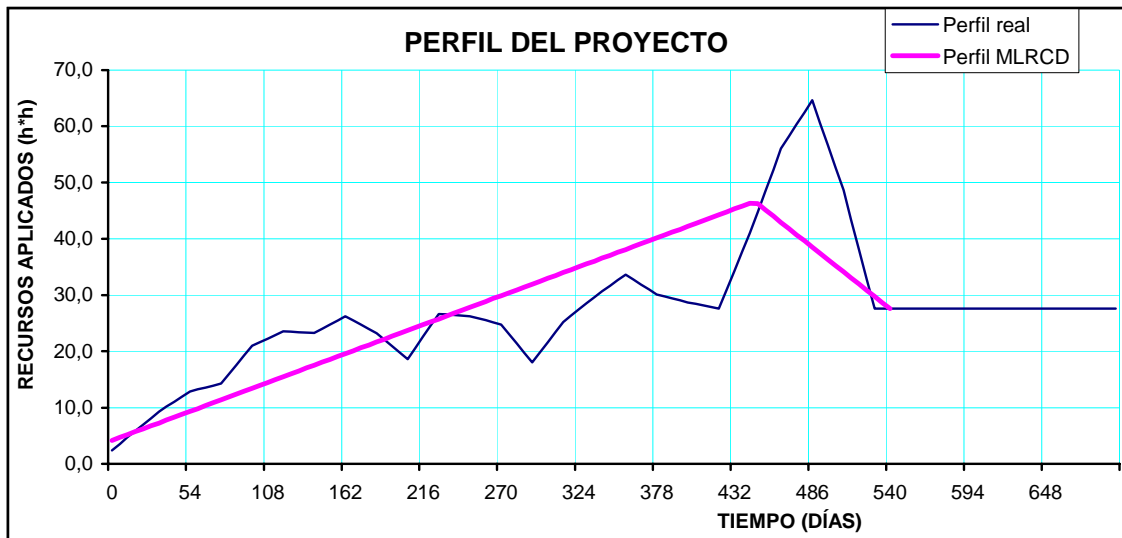
### VII.3 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

La tabla mostrada a continuación es una recopilación de los proyectos reales analizados y de los resultados obtenidos con nuestro modelo MLRCD. En las hojas sucesivas se muestran cada uno de los proyectos por separado.

<b>PROYECTO</b>	<b><math>R_T</math></b> (hh)	<b><math>T_E</math></b> (días)	<b><math>T_R</math></b> (días)	<b>RESULTADOS OBTENIDOS</b>				<b><math>\underline{T}_R</math></b> (con <i>k</i> media)
				<b><math>m</math></b>	<b><math>q</math></b>	<b><math>h</math></b>	<b><math>k</math></b>	
PROYECTO 01	16086	540	570	6,59	11,07	0,82	0,15	565
PROYECTO 02	11745	450	510	3,34	12,05	0,56	0,14	502
PROYECTO 03	8071	330	420	0,53	5,04	0,26	0,09	451
PROYECTO 04	19268	420	450	1,11	2,65	0,63	0,09	460
PROYECTO 05	20903	600	690	1,61	4,63	0,53	0,17	663
PROYECTO 06	33598	690	810	1,01	4,80	0,75	0,14	796
PROYECTO 07	8660	360	390	1,58	4,91	0,60	0,09	399
PROYECTO 08	3990	270	330	1,89	9,62	0,42	0,15	318
PROYECTO 09	4983	420	480	0,60	3,58	0,72	0,08	508
PROYECTO 10	11788	480	540	1,21	5,24	0,43	0,09	557
PROYECTO 11	5960	450	510	0,96	4,23	0,86	0,12	502

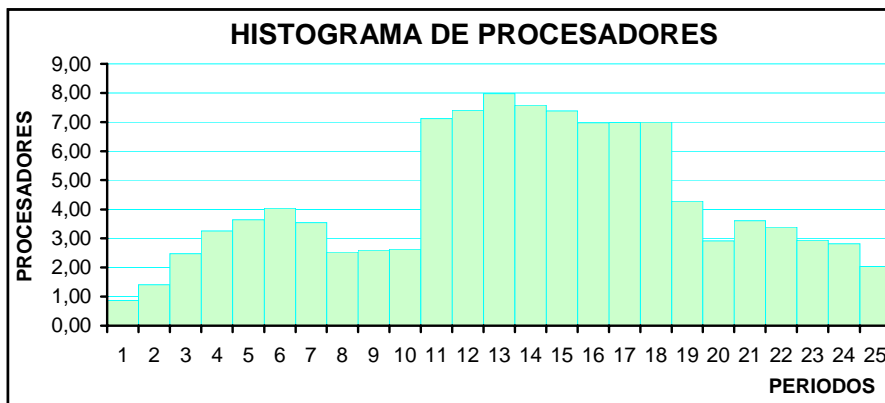
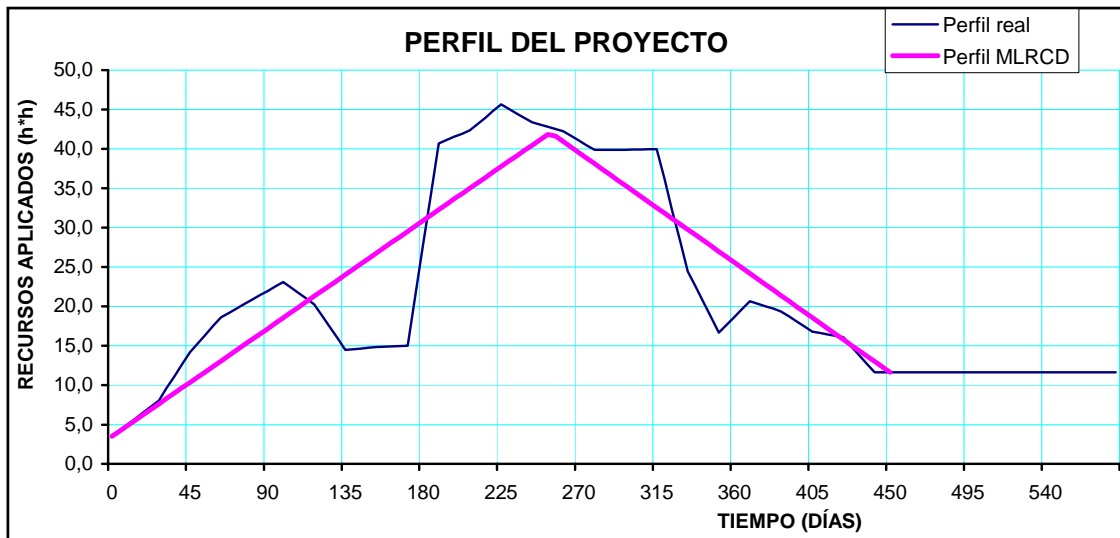
**Tabla VII.1**

## PROYECTO 01



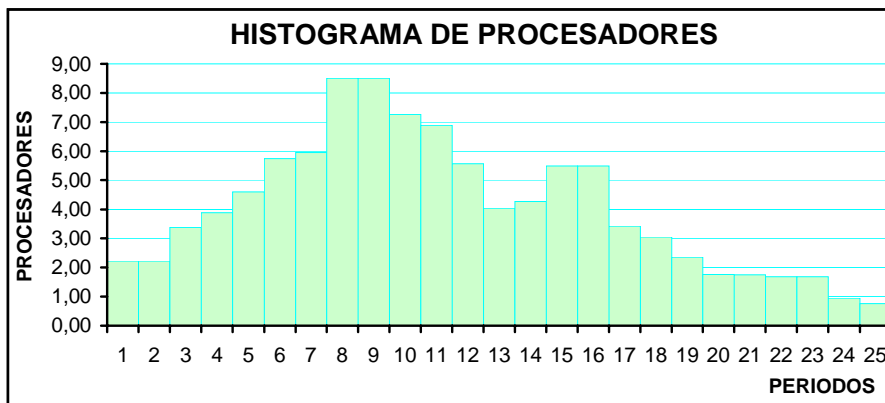
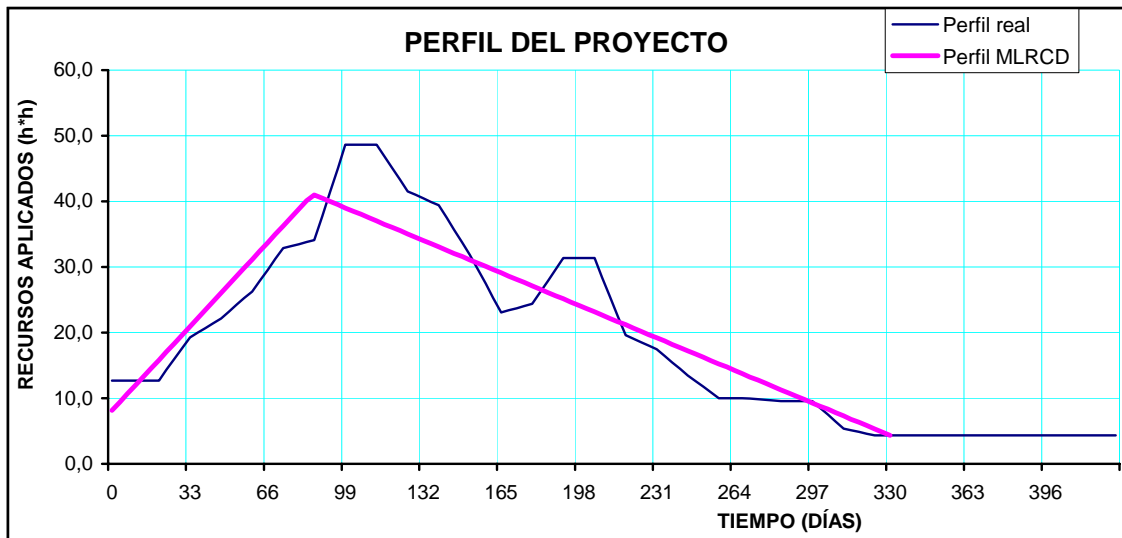
<b>Parámetros del PROYECTO</b>	<b>Parámetros del modelo "MLRCD"</b>
"Te" (DÍAS NATURALES): 540	DIAS NATURALES POR PERIODO: 21,60
RECURSOS BRUTOS APLICADOS (h*h): 16086	HORAS POR DÍA NATURAL: 5,71
RECURSOS REALES HASTA "Te": 14810	RECURSOS INICIALES: 4,18
JORNADA SEMANAL (HORAS): 40	PARÁMETRO "m": 6,59
DEMORA INCURRIDA (DÍAS): 30	PARÁMETRO "q": 11,07
CENTRO GRAVEDAD RECURSOS EN "Te": 65%	PARÁMETRO "h": 0,82
	k CALCULADA CON "DEMORA": 0,15

## PROYECTO 02



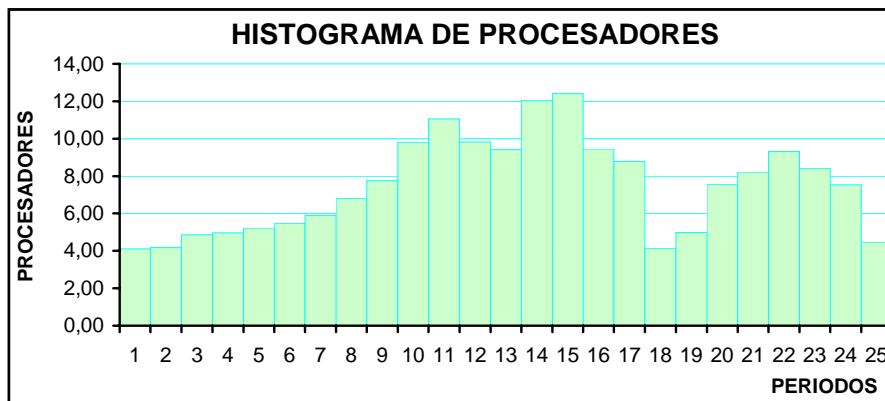
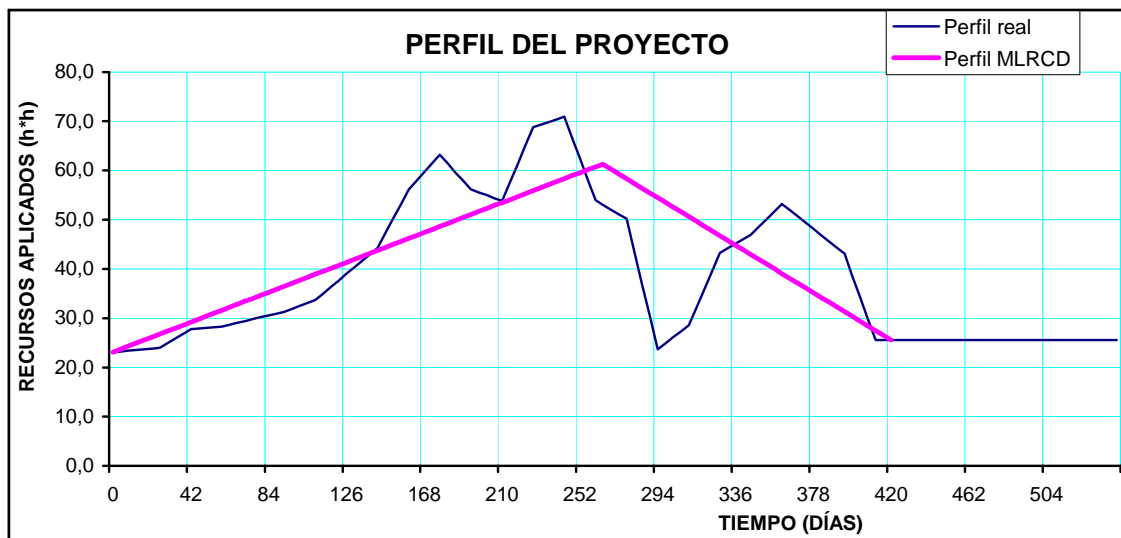
<b>Parámetros del PROYECTO</b>	<b>Parámetros del modelo "MLRCD"</b>
"Te" (DÍAS NATURALES): 450	DIAS NATURALES POR PERIODO: 18,00
RECURSOS BRUTOS APLICADOS (h*h): 11745	HORAS POR DÍA NATURAL: 5,71
RECURSOS REALES HASTA "Te": 11055	RECURSOS INICIALES: 3,47
JORNADA SEMANAL (HORAS): 40	PARÁMETRO "m": 3,34
DEMORA INCURRIDA (DÍAS): 60	PARÁMETRO "q": 12,05
CENTRO GRAVEDAD RECURSOS EN "Te": 54%	PARÁMETRO "h": 0,56
	k CALCULADA CON "DEMORA": 0,14

### PROYECTO 03



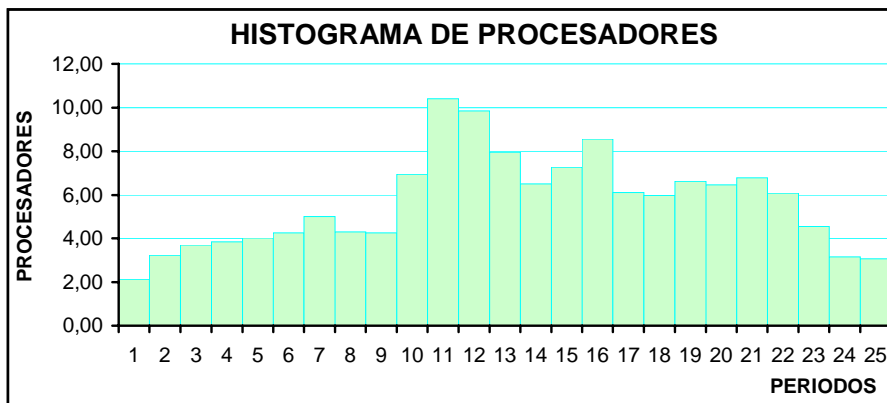
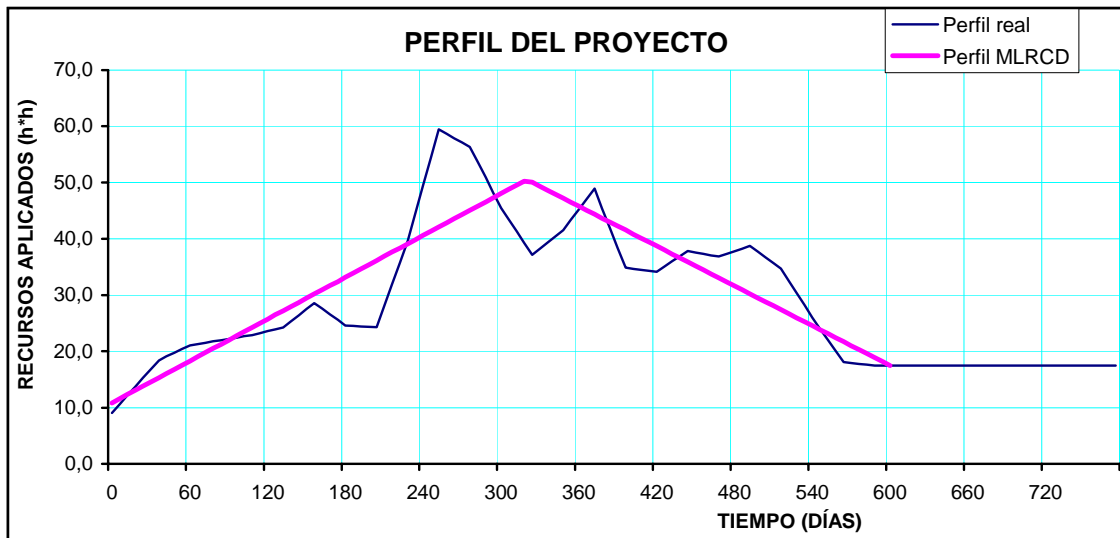
<b>Parámetros del PROYECTO</b>	<b>Parámetros del modelo "MLRCD"</b>
"Te" (DÍAS NATURALES): 330	DIAS NATURALES POR PERIODO: 13,20
RECURSOS BRUTOS APLICADOS (h*h): 8071	HORAS POR DÍA NATURAL: 5,71
RECURSOS REALES HASTA "Te": 7664	RECURSOS INICIALES: 8,13
JORNADA SEMANAL (HORAS): 40	PARÁMETRO "m": 0,53
DEMORA INCURRIDA (DÍAS): 90	PARÁMETRO "q": 5,04
CENTRO GRAVEDAD RECURSOS EN "Te": 39%	PARÁMETRO "h": 0,26
	k CALCULADA CON "DEMORA": 0,09

## PROYECTO 04



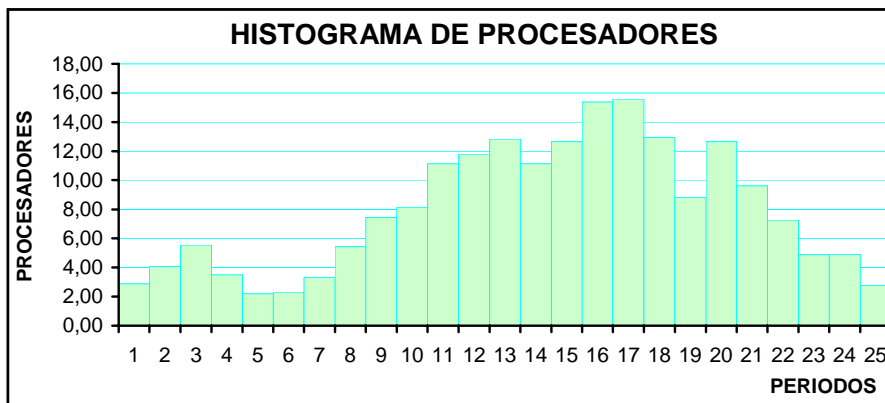
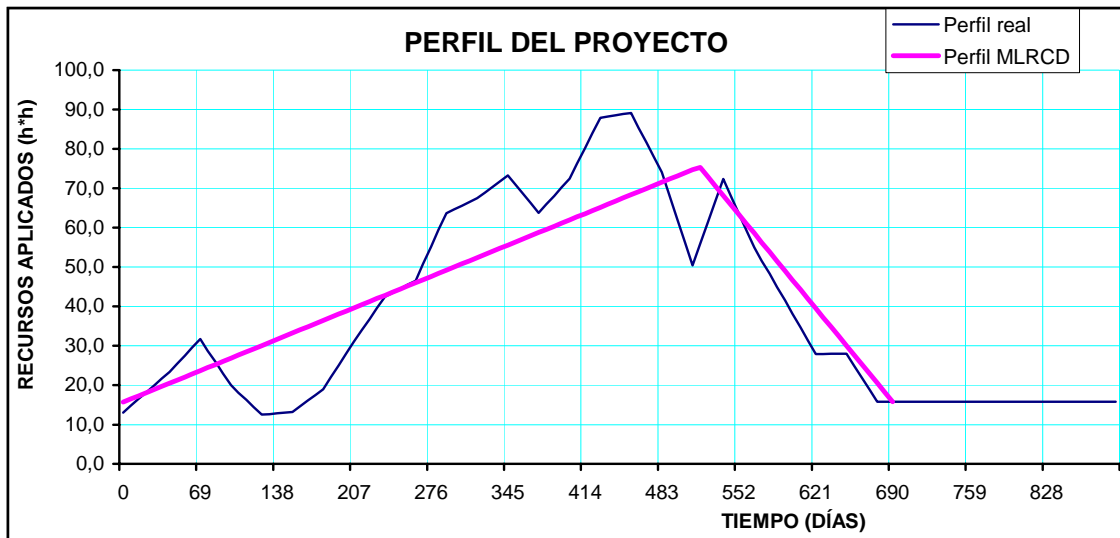
<b>Parámetros del PROYECTO</b>	<b>Parámetros del modelo "MLRCD"</b>
"Te" (DÍAS NATURALES): 420	DIAS NATURALES POR PERIODO: 16,80
RECURSOS BRUTOS APLICADOS (h*h): 19268	HORAS POR DÍA NATURAL: 5,71
RECURSOS REALES HASTA "Te": 17937	RECURSOS INICIALES: 23,12
JORNADA SEMANAL (HORAS): 40	PARÁMETRO "m": 1,11
DEMORA INCURRIDA (DÍAS): 30	PARÁMETRO "q": 2,65
CENTRO GRAVEDAD RECURSOS EN "Te": 53%	PARÁMETRO "h": 0,63
	k CALCULADA CON "DEMORA": 0,09

## PROYECTO 05



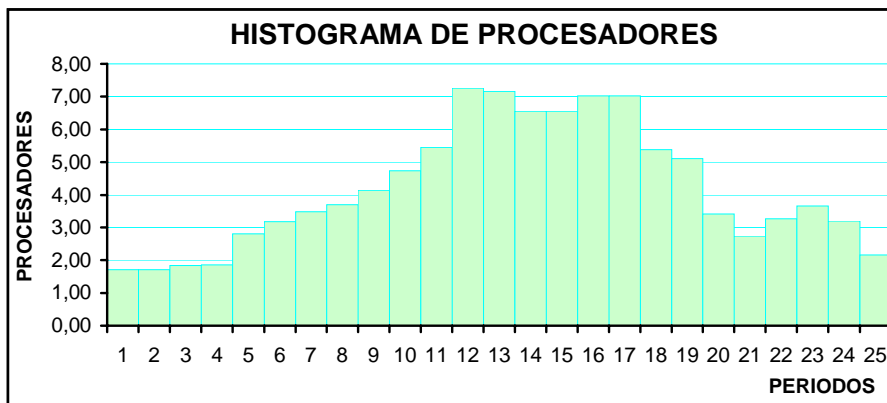
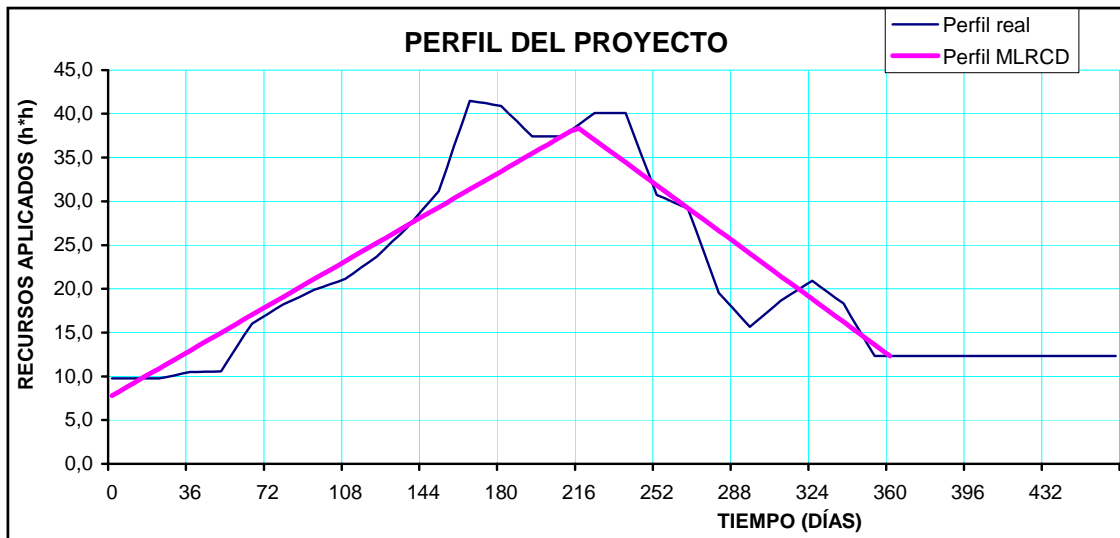
<b>Parámetros del PROYECTO</b>	<b>Parámetros del modelo "MLRCD"</b>
"Te" (DÍAS NATURALES): 600	DIAS NATURALES POR PERIODO: 24,00
RECURSOS BRUTOS APLICADOS (h*h): 20903	HORAS POR DÍA NATURAL: 5,71
RECURSOS REALES HASTA "Te": 19323	RECURSOS INICIALES: 10,85
JORNADA SEMANAL (HORAS): 40	PARÁMETRO "m": 1,61
DEMORA INCURRIDA (DÍAS): 90	PARÁMETRO "q": 4,63
CENTRO GRAVEDAD RECURSOS EN "Te": 52%	PARÁMETRO "h": 0,53
	k CALCULADA CON "DEMORA": 0,17

## PROYECTO 06



<b>Parámetros del PROYECTO</b>	<b>Parámetros del modelo "MLRCD"</b>
"Te" (DÍAS NATURALES): 690	DIAS NATURALES POR PERIODO: 27,60
RECURSOS BRUTOS APLICADOS (h*h): 33598	HORAS POR DÍA NATURAL: 5,71
RECURSOS REALES HASTA "Te": 31413	RECURSOS INICIALES: 15,67
JORNADA SEMANAL (HORAS): 40	PARÁMETRO "m": 1,01
DEMORA INCURRIDA (DÍAS): 120	PARÁMETRO "q": 4,80
CENTRO GRAVEDAD RECURSOS EN "Te": 58%	PARÁMETRO "h": 0,75
	k CALCULADA CON "DEMORA": 0,14

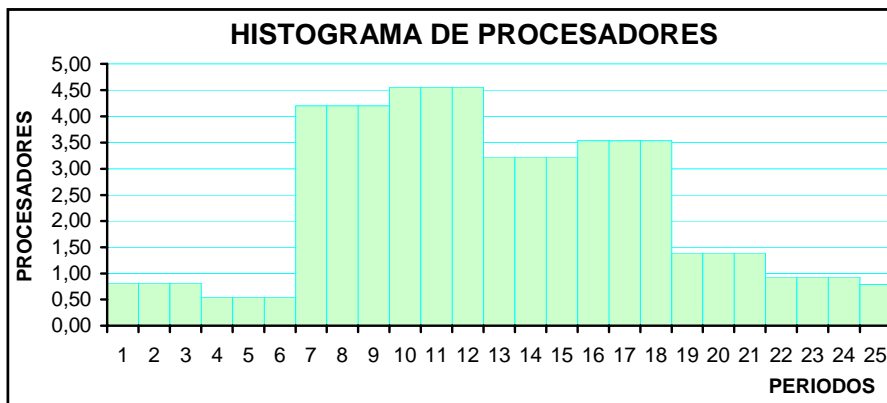
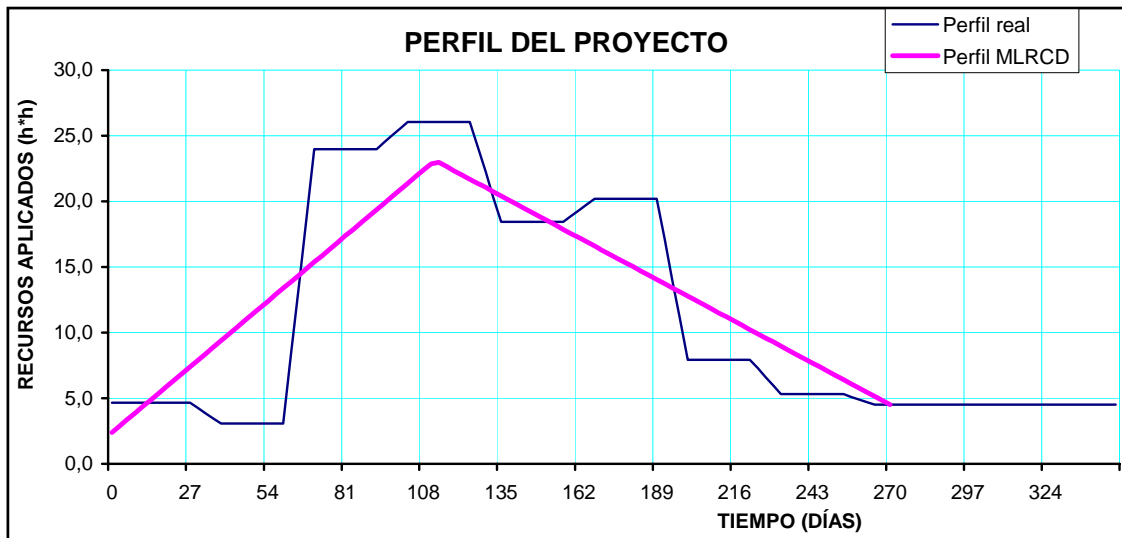
## PROYECTO 07



<b>Parámetros del PROYECTO</b>	<b>Parámetros del modelo "MLRCD"</b>
"Te" (DÍAS NATURALES): 360	DIAS NATURALES POR PERIODO: 14,40
RECURSOS BRUTOS APLICADOS (h*h): 9155	HORAS POR DÍA NATURAL: 5,71
RECURSOS REALES HASTA "Te": 8660	RECURSOS INICIALES: 7,80
JORNADA SEMANAL (HORAS): 40	PARÁMETRO "m": 1,58
DEMORA INCURRIDA (DÍAS): 30	PARÁMETRO "q": 4,91
CENTRO GRAVEDAD RECURSOS EN "Te": 54%	PARÁMETRO "h": 0,60
	k CALCULADA CON "DEMORA": 0,09

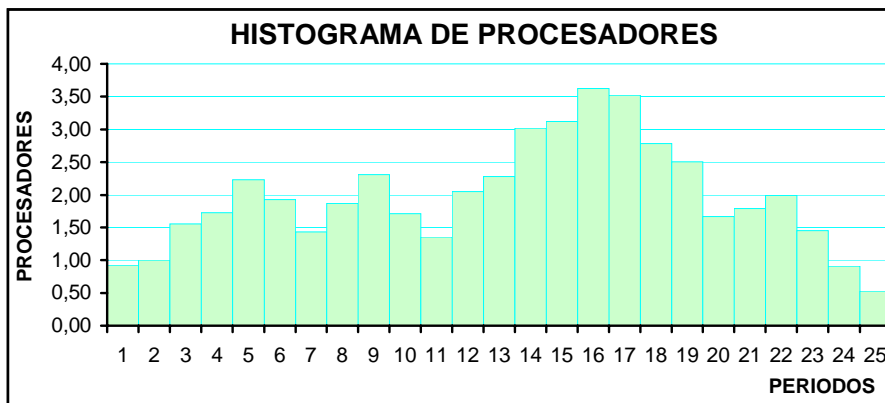
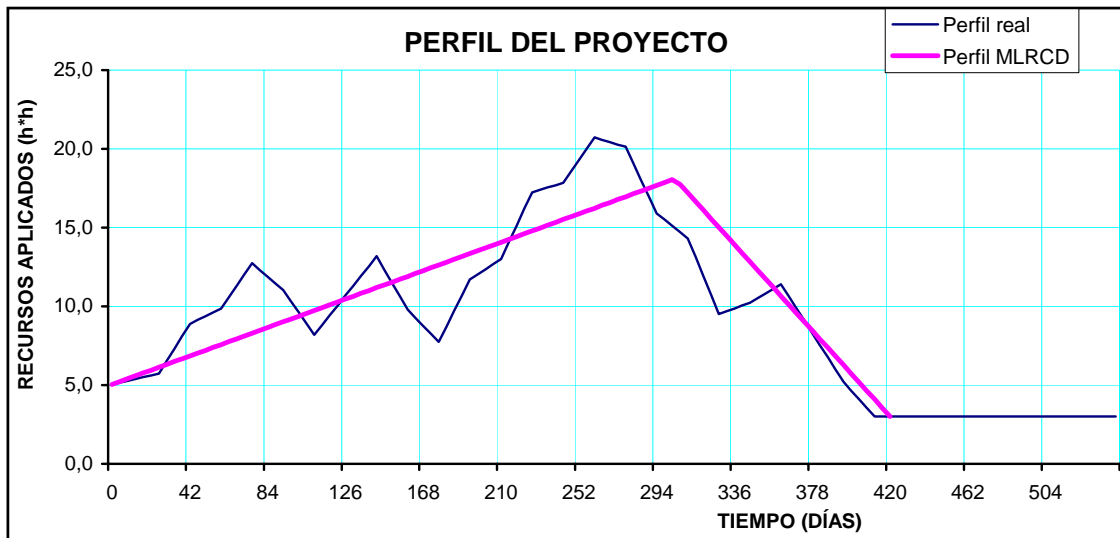


## PROYECTO 08



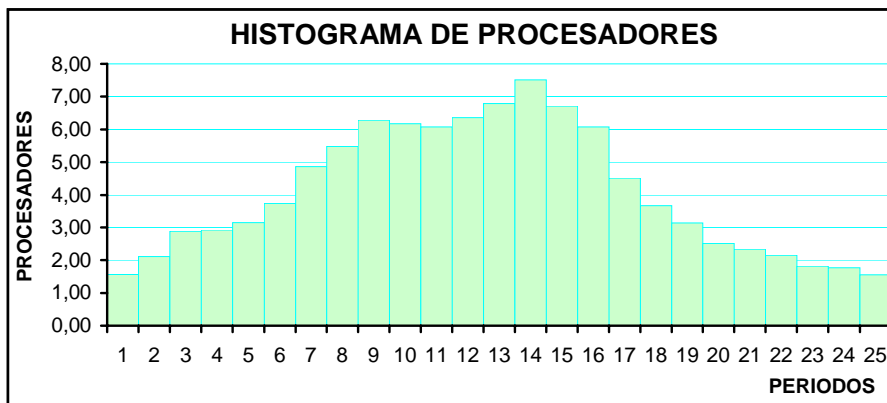
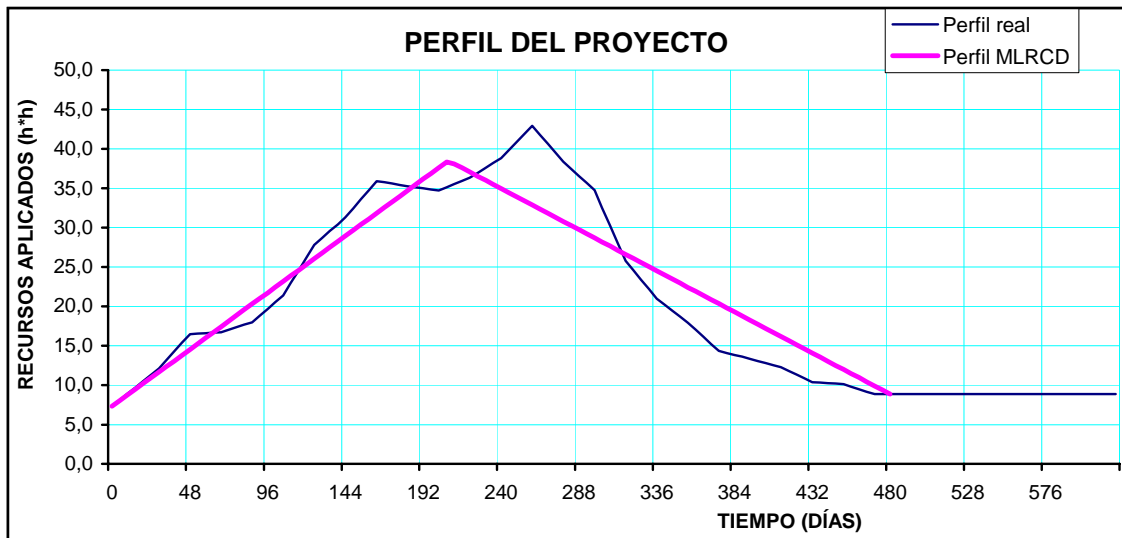
<b>Parámetros del PROYECTO</b>	<b>Parámetros del modelo "MLRCD"</b>
"Te" (DÍAS NATURALES): 270	DIAS NATURALES POR PERIODO: 10,80
RECURSOS BRUTOS APLICADOS (h*h): 3990	HORAS POR DÍA NATURAL: 5,71
RECURSOS REALES HASTA "Te": 3613	RECURSOS INICIALES: 2,39
JORNADA SEMANAL (HORAS): 40	PARÁMETRO "m": 1,89
DEMORA INCURRIDA (DÍAS): 60	PARÁMETRO "q": 9,62
CENTRO GRAVEDAD RECURSOS EN "Te": 47%	PARÁMETRO "h": 0,42
	k CALCULADA CON "DEMORA": 0,15

## PROYECTO 09



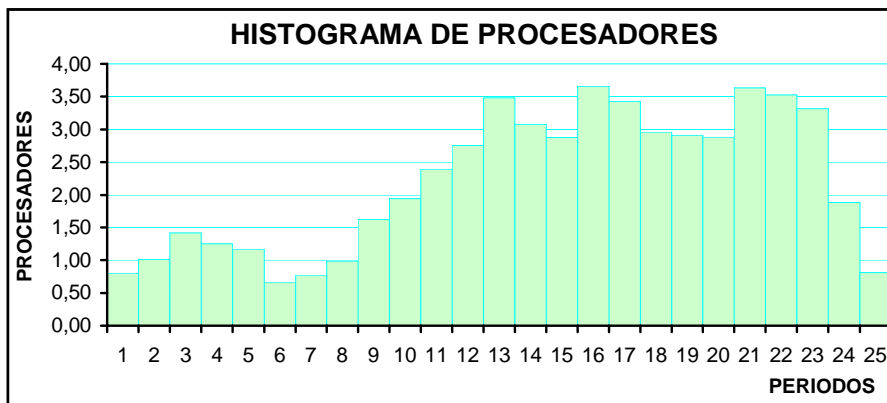
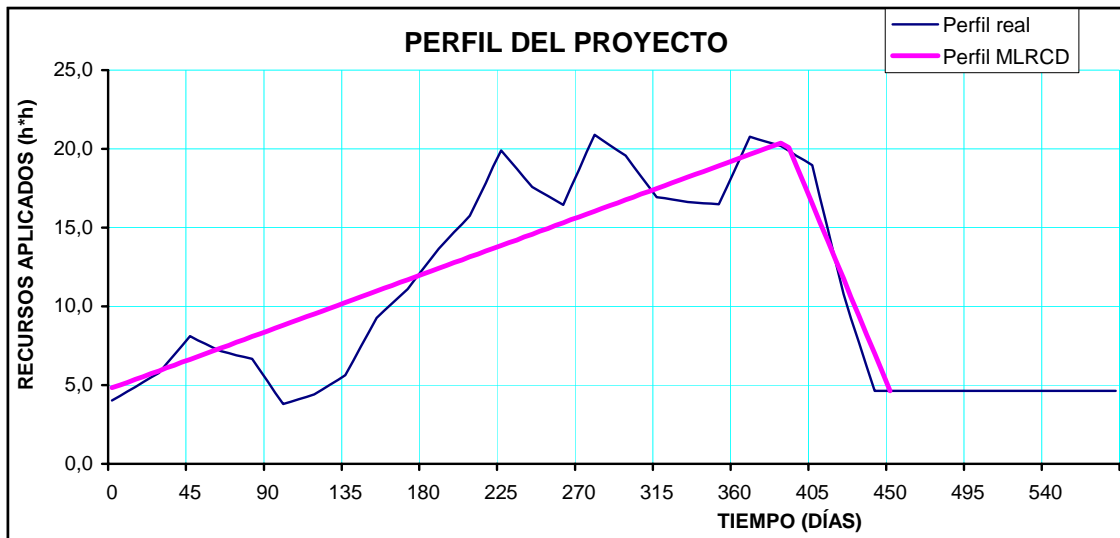
<b>Parámetros del PROYECTO</b>	<b>Parámetros del modelo "MLRCD"</b>
"Te" (DÍAS NATURALES): 420	DIAS NATURALES POR PERIODO: 16,80
RECURSOS BRUTOS APLICADOS (h*h): 4983	HORAS POR DÍA NATURAL: 5,71
RECURSOS REALES HASTA "Te": 4742	RECURSOS INICIALES: 5,04
JORNADA SEMANAL (HORAS): 40	PARÁMETRO "m": 0,60
DEMORA INCURRIDA (DÍAS): 60	PARÁMETRO "q": 3,58
CENTRO GRAVEDAD RECURSOS EN "Te": 55%	PARÁMETRO "h": 0,72
	k CALCULADA CON "DEMORA": 0,08

## PROYECTO 10



<b>Parámetros del PROYECTO</b>	<b>Parámetros del modelo "MLRCD"</b>
"Te" (DÍAS NATURALES): 480	DIAS NATURALES POR PERIODO: 19,20
RECURSOS BRUTOS APLICADOS (h*h): 11788	HORAS POR DÍA NATURAL: 5,71
RECURSOS REALES HASTA "Te": 11211	RECURSOS INICIALES: 7,31
JORNADA SEMANAL (HORAS): 40	PARÁMETRO "m": 1,21
DEMORA INCURRIDA (DÍAS): 60	PARÁMETRO "q": 5,24
CENTRO GRAVEDAD RECURSOS EN "Te": 47%	PARÁMETRO "h": 0,43
	k CALCULADA CON "DEMORA": 0,09

## PROYECTO 11



<b>Parámetros del PROYECTO</b>	<b>Parámetros del modelo "MLRCD"</b>
"Te" (DÍAS NATURALES): 450	DIAS NATURALES POR PERIODO: 18,00
RECURSOS BRUTOS APLICADOS (h*h): 5960	HORAS POR DÍA NATURAL: 5,71
RECURSOS REALES HASTA "Te": 5691	RECURSOS INICIALES: 4,82
JORNADA SEMANAL (HORAS): 40	PARÁMETRO "m": 0,96
DEMORA INCURRIDA (DÍAS): 60	PARÁMETRO "q": 4,23
CENTRO GRAVEDAD RECURSOS EN "Te": 61%	PARÁMETRO "h": 0,86
	k CALCULADA CON "DEMORA": 0,12

## VII.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### VII.4.1 Resultados mostrados por la aplicación

En el capítulo anterior hemos descrito cómo opera la aplicación informática desarrollada para modelizar cualquier proyecto real. Las láminas anteriores, correspondientes a 11 proyectos reales, son la salida gráfica de nuestra aplicación para cada proyecto objeto de análisis (en ellas el tiempo estimado para la ejecución del proyecto ( $T_E$ ) viene expresado como “Te”). Los resultados de la aplicación se enumeran a continuación:

- **PERFIL DEL PROYECTO:** Mostrando el perfil real y su equivalente en nuestro modelo MLRCD. El eje de recursos aplicados está calibrado en hh y el eje de tiempos en días.
- **HISTOGRAMA DE PROCESADORES:** Representa el número de procesadores que en valor medio intervienen en cada uno de los 25 periodos en que se ha fragmentado el tiempo estimado para la ejecución del proyecto.
- **TABLA DE PARÁMETROS DEL PROYECTO:** Muestra los datos globales con los que se ha cargado el modelo.
- **TABLA DE PARÁMETROS DEL MODELO "MLRCD":** Muestra los resultados de aplicar el modelo a ese proyecto en particular.

### VII.4.2 Análisis estadístico de los resultados

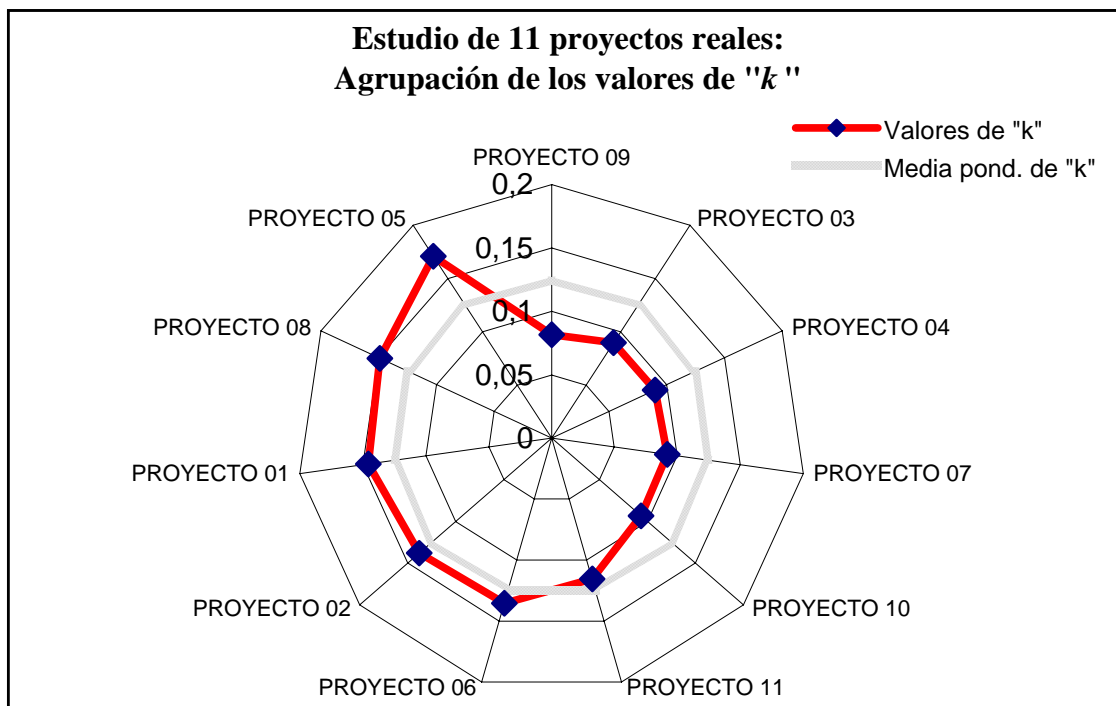
Un breve análisis de los valores de  $k$  obtenidos para cada uno de los 11 proyectos, nos conduce al siguiente resultado:

- Media simple: 0,1182
- Media ponderada (con los recursos totales de cada proyecto): 0,1248
- Varianza: 0,0009

- Coeficiente de asimetría: 0,3382

Otros análisis estadísticos realizados sobre este conjunto de proyectos reales, se refieren a la correlación existente entre  $k$  y otros aspectos de los proyectos. Si la hipótesis es que  $k$  es una constante de la Organización, mostrará una pobre correlación con determinados aspectos de los proyectos, tal como se indica a continuación:

- Correlación de  $k$  con la duración inicialmente estimada ( $T_E$ ): 0,43
- Correlación de  $k$  con la demora relativa observada: 0,05
- Correlación de  $k$  con los recursos totales aplicados ( $R_T$ ): 0,35
- Correlación de  $k$  con la duración real ( $T_R$ ): 0,44
- Correlación de  $k$  con el centro de gravedad de los recursos aplicados hasta  $T_E$ : 0,29



**Fig. VII.1**

En la tabla VII.1, el valor de  $T_R$  (con  $k$  media) se ha obtenido sumándole al  $T_E$  la demora calculada de acuerdo con los parámetros del modelo MLRCD y al valor  $k$  (en este caso  $k = 0,12$ ) que hubiera correspondido a esa Organización. Esto nos indicará el error que habríamos cometido en el caso de haber tenido la opción de pronosticar el retraso en que incurriría cada proyecto.

La concentración de los valores de  $k$  que hemos obtenido para el conjunto de proyectos analizados se muestra gráficamente en la Fig. VII.1, donde pueden compararse con su media ponderada. Dichos valores presentan un recorrido desde 0,08 a 0,17 con una media de 0,12 (bastante centrada). Sin embargo, la distribución de estos valores en el recorrido es algo irregular, como se aprecia en la siguiente tabla de frecuencias:

Valores de $k$	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17
Frecuencia	1	4	0	0	1	0	2	2	0	1

**Tabla VII.2**

### VII.4.3 Influencia del parámetro “ $h$ ” en los retrasos

Según se deduce de las expresiones [VI.35] y [VI.36] y como se observa en la Fig. VI.6 los retrasos disminuyen a medida que aumenta el valor de “ $h$ ”, manteniendo constantes los demás parámetros. Esto significa que desplazamientos a la derecha del centro de gravedad<sup>113</sup> del perfil de recursos aplicados darán lugar a menores retrasos. O lo que es lo mismo, la anticipación<sup>114</sup> de los recursos aplicados a un proyecto, en presencia de  $ER$ , dará lugar a mayores

<sup>113</sup> Recordamos la definición de centro de gravedad del perfil de recursos aplicados: Es el instante (en términos porcentuales de  $T_E$ ) para el que ya se han aplicado el 50% de los recursos totales hasta  $T_E$ .

<sup>114</sup> Anticipar los recursos aplicados a un proyecto implica la reducción del centro de gravedad del perfil de recursos totales hasta  $T_E$ .

retrasos. Esto se pone de manifiesto para el conjunto de proyectos analizados, mediante los siguientes coeficientes de correlación:

- Correlación del centro de gravedad ( $CG$ ) con el parámetro  $h$ : 0,96
- Correlación de la demora relativa  $(T_R - T_E)/T_E$  con el centro de gravedad ( $CG$ ): -0,71
- Correlación de la demora relativa  $(T_R - T_E)/T_E$  con el parámetro  $h$ : -0,64

Como no podía ser de otra manera entre  $CG$  y  $h$  existe una buena correlación (aunque  $CG$  depende de otros parámetros del modelo MLRCD). La correlación entre la demora y  $CG$  es relativamente buena (el signo menos muestra que a menor  $CG$  mayor demora), lo que permite confirmar la conclusión del párrafo anterior. Esto también se deduce de la correlación mostrada entre la demora y  $h$  directamente. En el punto VII.6.1 verificaremos esta propiedad para el caso de los proyectos reales.

**Observación:** Si el  $CG$  se corresponde de alguna manera con la forma del perfil del proyecto (máximo del perfil al principio:  $CG$  pequeño y viceversa) e incide en los posibles retrasos, guardaría alguna relación con el indicador “ $I_3$ ” de Tavares (ver capítulo IV).

## VII.5 VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS

Con el fin de acotar adecuadamente el análisis realizado, debemos tener en cuenta, en primer lugar, las particularidades de los datos en los que se fundamenta.

Es práctica común de las Ingenierías el registro de datos mes a mes y así es cómo hemos dispuesto de los datos históricos para nuestro análisis. De aquí que, tanto los tiempos estimados como los reales y, en consecuencia, la demora que tuvo lugar, son múltiplos de 30 días. Esto, evidentemente desfigurará los



resultados si tenemos en cuenta que nuestro modelo MLRCD utiliza como unidad de tiempo el día y a los efectos de la aplicación la centésima parte de  $T_E$  (expresado en días).

Como ya indicamos anteriormente, un proyecto con demora nula fue descartado del análisis, pensando que podría tener gran incidencia en los resultados globales. Las principales razones que nos movieron a ello fueron las siguientes:

- La periodicidad utilizada para el almacenamiento de los datos, que implica un salto relativo importante entre retraso nulo y retraso de un mes<sup>115</sup>.
- Dada la diversidad de directores de proyecto, debemos admitir la posibilidad de que, en este caso (retraso nulo), se hubiera aplicado acertadamente algún mecanismo de compensación del  $ER$ .
- La estimación para el tiempo de ejecución del proyecto ( $T_E$ ) podría haber sido realizada con tal holgura, que las demoras debidas al  $ER$  no llegaron a superar esa holgura.

Si para los proyectos analizados realizamos un esquema con sus características conocidas o elementos relevantes, podríamos resumirlas en las siguientes:

- Su duración estimada
- El retraso real en que cada proyecto ha incurrido
- Los recursos totales aplicados
- El objeto del proyecto (clase de planta industrial que se va a desarrollar)
- El volumen de la inversión
- El director del proyecto

---

<sup>115</sup> Descartamos “adelanto de un mes” por lo que muestra la experiencia: Lo normal es que se retrasen los proyectos.

- El equipo de procesadores (pertenecientes al Departamento Técnico de esa Ingeniería)
- La Organización (Ingeniería)

Con relación a los tres primeros puntos referidos a los 11 proyectos reales de nuestro estudio, podemos concretar lo siguiente (Ver tabla VII.1):

- La duración estimada para todos los proyectos está comprendida entre 330 días y 690 días.
- El retraso real en que han incurrido va desde 30 días a 120 días.
- Los recursos totales aplicados varían entre 4.000hh y 33.000hh.

Aunque en ningún momento hemos hecho referencia al objeto de cada proyecto ni al volumen de la inversión, afirmamos que dibujarían un amplio abanico. Además, han sido varios los directores de proyecto entre los que se han repartido. Así pues, la dispersión mostrada por los seis primeros elementos relevantes y la escasa correlación (ver VII.4.2) que manifestaron los tres primeros con respecto a  $k$ , los hace libres de sospecha de ser causa importante de la propia  $k$ .

Los únicos elementos relevantes que quedan son la Organización y el equipo de procesadores. Son los dos elementos comunes a los 11 proyectos de nuestro estudio, de ahí que los consideremos causantes de  $k$ .

El valor de  $k$  que estamos admitiendo como resultado ( $k = 0,12$ ) es el de la media ponderada redondeando a la centésima. Es de destacar que, en este análisis, coincide con la media simple aplicando el mismo criterio de redondeo. Si el valor de  $k$  lo hubiéramos utilizado para la estimación del retraso de los proyectos, conociendo cómo iban a ser aplicados los recursos en el tiempo, se habrían obtenido los errores que muestra la tabla VII.3, en la mayoría de los casos inferiores al 4%.

PROYECTO	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
ERROR(%)	0,9	1,6	7,4	2,2	3,9	1,7	2,3	3,6	5,8	3,1	1,6

**TABLA VII.3**

Una de las consecuencias que nuestro modelo pone de manifiesto es la influencia que tiene la forma del perfil en los retrasos esperados. La conclusión principal es que adelantos en la aplicación de los recursos, suponen retrasos en la terminación del proyecto. Esto se observa contrastando los proyectos reales entre sí, o también, analizando los resultados de los tres proyectos ficticios (PROYECTO 12 al 14) que presentamos más adelante. Esto nos conduce a pensar que, si existe efecto relajación, conviene una planificación que concentre los recursos en la etapa final del proyecto.

Lo anterior se desprende también de la valoración e interpretación que podemos realizar de la correlación existente entre la demora relativa y el centro de gravedad de los recursos aplicados (ver VII.4.3). El valor “-0,71” nos está indicando una aceptable correlación inversa.

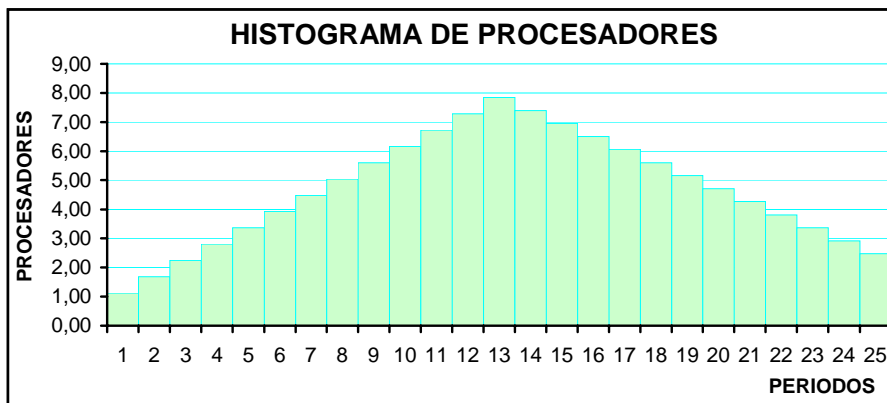
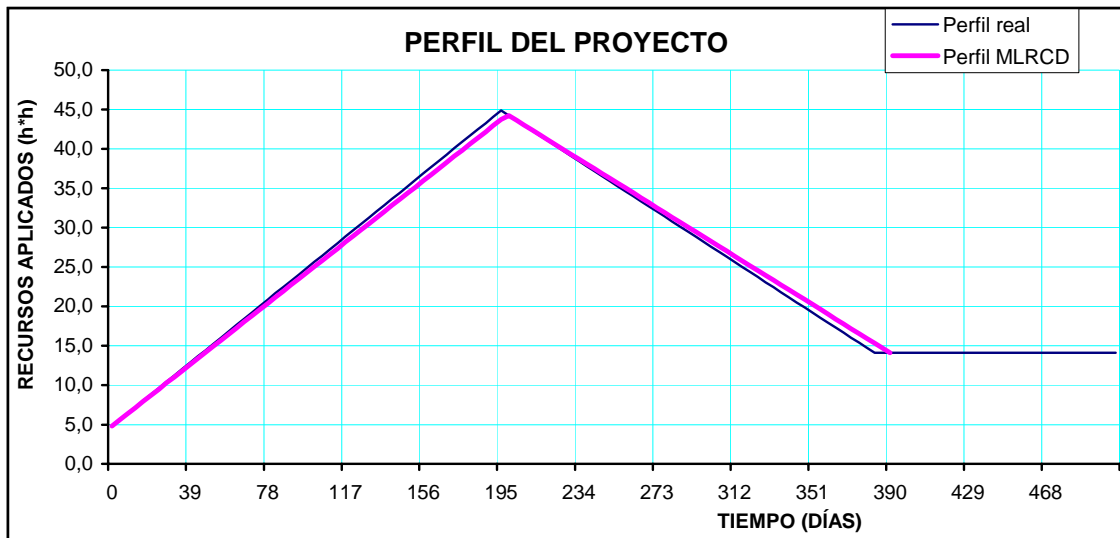
Con relación a la dispersión observada en los valores de  $k$  obtenidos con cada proyecto, pensamos que su causa pudiera estar en que el almacenamiento de los datos históricos se hizo por periodos de 30 días. No sería extraño que un retraso contemplado de 90 días, haya sido en la realidad de 65 ó de 85, por ejemplo.

**Observación:** El valor de  $k$  que se obtiene con el modelo MLRCD presupone que no se han aplicado mecanismos correctores del efecto relajación. Pero en los proyectos reales, es común que el director del mismo aplique algún tipo de presión sobre los procesadores. Dado que, también normalmente, a proyectos diferentes corresponden diferentes directores, podría ser que parte de la dispersión de los valores de  $k$  se debiera a esta circunstancia.

## VII.6 EL CENTRO DE GRAVEDAD DE LOS RECURSOS Y SU IMPACTO EN LOS RETRASOS

Con el fin de analizar cuantitativamente el impacto que la anticipación o el retraso en la aplicación de los recursos, tiene sobre la demora del proyecto en presencia de  $ER$ , creamos tres proyectos ficticios en los que mantenemos constantes los parámetros fundamentales del modelo, así como los recursos totales aplicados y la demora incurrida. En las páginas siguientes se reflejan las figuras correspondientes a los 3 proyectos ficticios (denominados PROYECTO 12 a PROYECTO 14, correlativamente). En ellos, el tiempo estimado para la ejecución del proyecto ( $T_E$ ) viene expresado como “Te”.

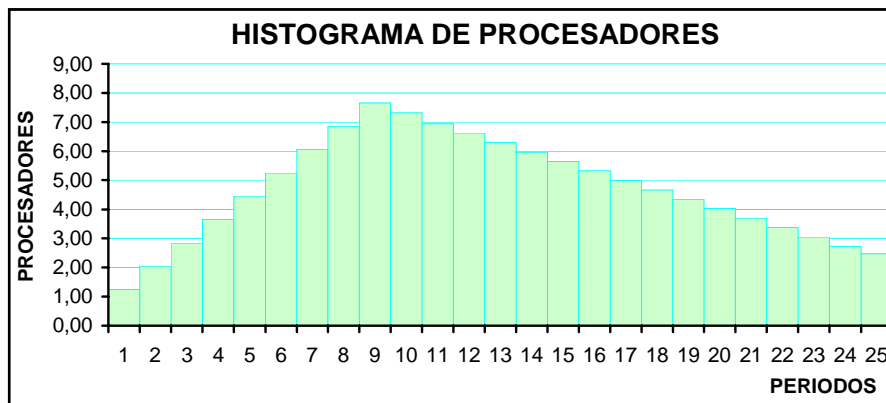
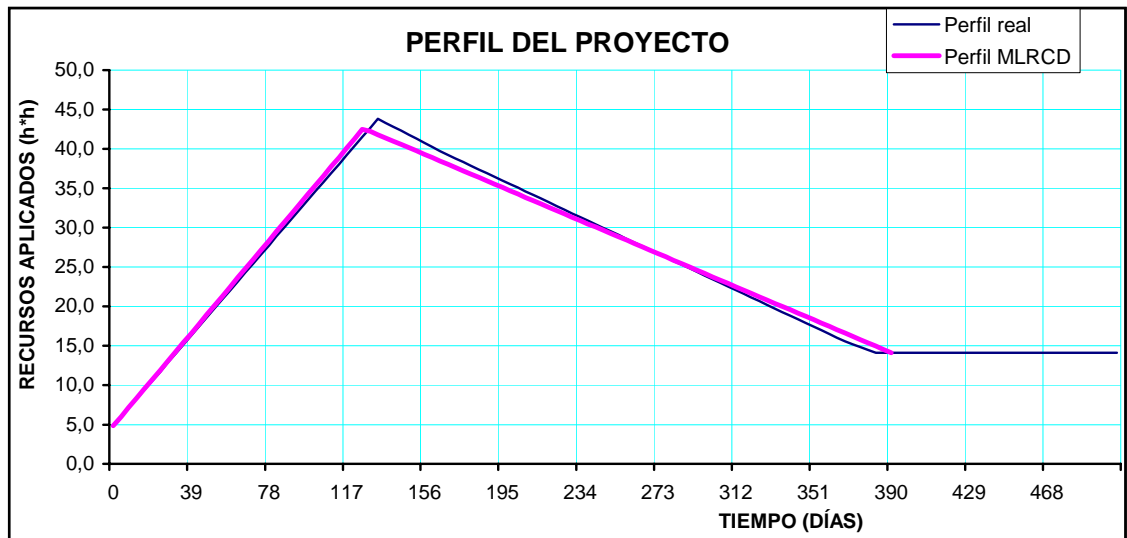
## PROYECTO 12



<b>Parámetros del PROYECTO</b>	<b>Parámetros del modelo "MLRCD"</b>
"Te" (DÍAS NATURALES): 390	DIAS NATURALES POR PERIODO: 15,60
RECURSOS BRUTOS APLICADOS (h*h): 10920	HORAS POR DÍA NATURAL: 5,71
RECURSOS REALES HASTA "Te": 10486	RECURSOS INICIALES: 4,81
JORNADA SEMANAL (HORAS): 40	PARÁMETRO "m": 2,93
DEMORA INCURRIDA (DÍAS): 60	PARÁMETRO "q": 9,20
CENTRO GRAVEDAD RECURSOS EN "Te": 52%	PARÁMETRO "h": 0,51
	k CALCULADA CON "DEMORA": 0,17

**DEMORA CALCULADA CON "k=0,17": 60 DÍAS**

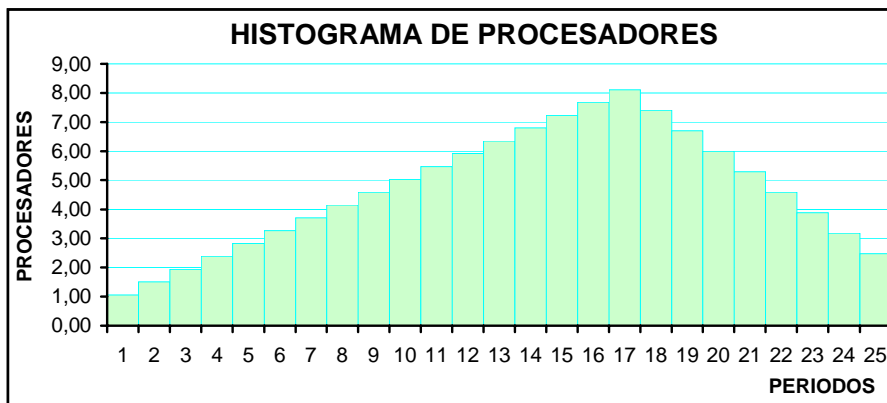
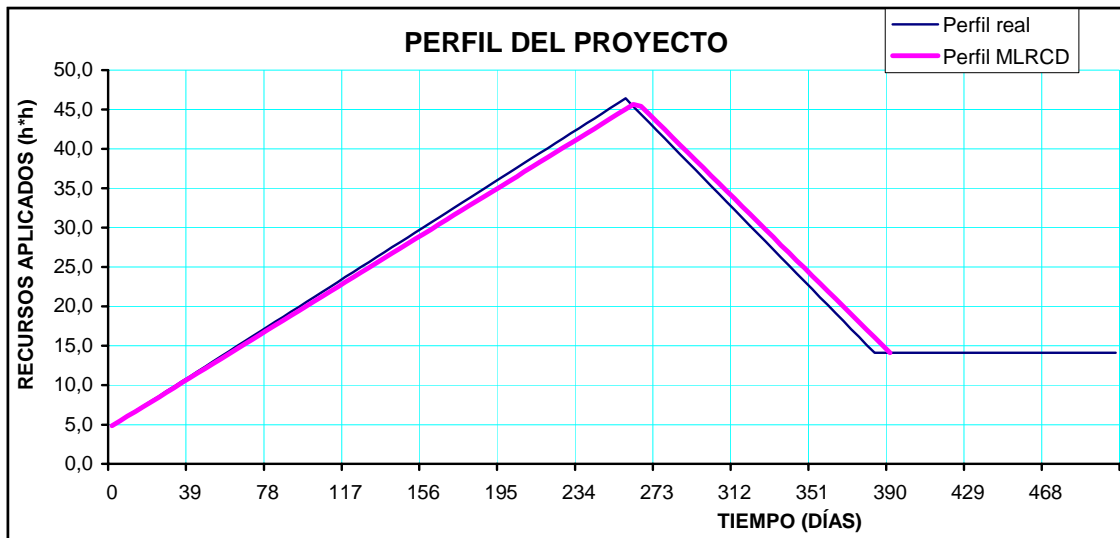
## PROYECTO 13



<b>Parámetros del PROYECTO</b>	<b>Parámetros del modelo "MLRCD"</b>
"Te" (DÍAS NATURALES): 390	DIAS NATURALES POR PERIODO: 15,60
RECURSOS BRUTOS APLICADOS (h*h): 10920,15	HORAS POR DÍA NATURAL: 5,71
RECURSOS REALES HASTA "Te": 10484	RECURSOS INICIALES: 4,81
JORNADA SEMANAL (HORAS): 40	PARÁMETRO "m": 2,93
DEMORA INCURRIDA (DÍAS): 60	PARÁMETRO "q": 8,82
CENTRO GRAVEDAD RECURSOS EN "Te": 46%	PARÁMETRO "h": 0,32
	k CALCULADA CON "DEMORA": 0,16

**DEMORA CALCULADA CON "k=0,17": 65 DÍAS**

## PROYECTO 14



<b>Parámetros del PROYECTO</b>	<b>Parámetros del modelo "MLRCD"</b>
"Te" (DÍAS NATURALES): 390	DIAS NATURALES POR PERIODO: 15,60
RECURSOS BRUTOS APLICADOS (h*h): 10920,2	HORAS POR DÍA NATURAL: 5,71
RECURSOS REALES HASTA "Te": 10488	RECURSOS INICIALES: 4,82
JORNADA SEMANAL (HORAS): 40	PARÁMETRO "m": 2,93
DEMORA INCURRIDA (DÍAS): 60	PARÁMETRO "q": 9,47
CENTRO GRAVEDAD RECURSOS EN "Te": 58%	PARÁMETRO "h": 0,67
	k CALCULADA CON "DEMORA": 0,19

**DEMORA CALCULADA CON "k=0,17": 55 DÍAS**

La tabla VII.4 recoge estos tres proyectos, cuyos perfiles y datos se han reflejado en las tres páginas anteriores.

<b>PROYECTO</b>	$R_T$ (hh)	$T_E$ (días)	$T_R$ (días)	<b>RESULTADOS OBTENIDOS</b>				$\underline{T}_R$ (con $k$ media)
				$m$	$q$	$h$	$k$	
PROYECTO 12	10920	390	450	2,93	9,20	0,51	0,17	450
PROYECTO 13	10920	390	450	2,93	8,82	0,32	0,16	455
PROYECTO 14	10920	390	450	2,93	9,47	0,67	0,19	445

**Tabla VII.4**

Tomando como referencia el PROYECTO 12 (con  $CG = 52$ ), anticipamos los recursos manteniendo constantes  $R_T$ ,  $T_E$ ,  $T_R$  y  $m$ , los valores de  $q$  y  $h$  se acomodan a los anteriores, resultando un valor de  $k = 0,17$ . El resultado es el PROYECTO 13, donde observamos cómo ha disminuido  $k$ , o el que sería el mismo efecto, si utilizamos el valor de  $k$  del PROYECTO 12 resultaría una demora de 65 días, es decir el proyecto, por el hecho de anticipar los recursos (nuevo  $CG = 46$ ), se retrasará 5 días más.

De forma similar retrasamos la aplicación de los recursos manteniendo constantes  $R_T$ ,  $T_E$ ,  $T_R$  y  $m$ , los valores de  $q$  y  $h$  se acomodan a los anteriores, resultando un valor de  $k = 0,19$ . El resultado es el PROYECTO 14, donde observamos cómo ha aumentado  $k$ , o el que sería el mismo efecto, si utilizamos el valor de  $k$  del PROYECTO 12 resultaría una demora de 55 días, es decir el proyecto, por el hecho de retrasar los recursos (nuevo  $CG = 58$ ), se adelantará 5 días con relación al primer retraso calculado.



### VII.6.1 Observación de este efecto en los proyectos reales analizados

De los 11 proyectos reales analizados, con relación al perfil mostrado y en particular al valor del parámetro " $h$ " calculado por el modelo (ver tabla VII.1), destacaríamos los de valores extremos. Como se muestra a continuación, también se confirma que los retrasos reales son mayores cuando se anticipan los recursos.

PROYECTO 11: El de mayor valor de " $h$ ": Es el proyecto en que los recursos se han aplicado más tarde (desde el punto de vista del modelo). La distribución real de los recursos muestra un centro de gravedad del 61% (sólo existe un proyecto que lo supera en tardanza en la aplicación de los recursos: el PROYECTO 01): Su retraso real fue del 13,3%.

PROYECTO 03: El de menor valor de " $h$ ": Es el proyecto en que los recursos se han aplicado más temprano (desde el punto de vista del modelo). La distribución real de los recursos muestra un centro de gravedad del 39% (es el que muestra una anticipación mayor de los recursos): Su retraso real fue del 27,3%.

Como podemos comprobar, sobre cualquier pareja de proyectos reales que se elijan se verificará lo anterior.



## **CAPÍTULO VIII**

### **CONCLUSIONES Y PRINCIPALES APORTACIONES**

#### **VIII.1 INTRODUCCIÓN**

Como ya se expuso en el tema introductorio, el primer objetivo del presente trabajo era la formulación de una teoría que diese otra explicación a los retrasos de los proyectos. Esa idea nació de ciertas observaciones de la realidad de los proyectos de ingeniería de plantas industriales, contrastada posteriormente con observaciones similares de algunos autores estudiosos de esta parte de la investigación operativa. El primer interrogante que nos hemos planteado se centra en encontrar algo que sea común a un conjunto de proyectos que se hayan retrasado respecto a lo planificado. Sin duda debemos enmarcar dicho conjunto en una Organización determinada, que presta a cada proyecto su entorno y un mismo<sup>116</sup> conjunto de procesadores.

---

<sup>116</sup> En el supuesto de que una Organización disponga de varios equipos de procesadores, cada uno de los cuales podría afectar a un proyecto diferente, asumiríamos que son homogéneos desde el punto de vista que conviene a nuestro planteamiento.

Después de lo observado en la literatura analizada, cabría pensar que las causas de los retrasos (o parte de ellas) podrían estar subsumidas en ese “algo común”. Si consideramos que todos los proyectos desarrollados por cierta Organización han participado por igual de ello, se trataría de una constante característica de la Organización en cuestión y así es como la hemos contemplado. A ese “algo común” lo hemos llamado efecto relajación y a su cuantificación “ $k$ ” (constante de la Organización). De esta manera nos hemos planteado la existencia de  $k$  y la necesidad de establecer un mecanismo para su cálculo, resuelto por el modelo MLRCD.

El presente capítulo quiere servir de reflexión sobre lo expuesto anteriormente, con la finalidad de extraer conclusiones y descubrir los vacíos por los que adentrarse en este campo, que tradicionalmente se ha encuadrado en la investigación operativa, abriendo nuevas líneas de investigación. También, aún a riesgo de ser repetitivos, resumiremos lo que consideramos principales aportaciones del presente trabajo.

## **VIII.2 CONCLUSIONES DERIVADAS DE LA DELIMITACIÓN REALIZADA**

Este trabajo se ha iniciado presentando el marco de nuestra investigación, intentando establecer un puente entre la difícil práctica de la planificación de proyectos y la extensa teoría sobre la misma.

El capítulo I intentó situar al lector en el marco de una Ingeniería, estableciendo las bases necesarias para asumir las particularidades del concepto de “proyecto de una planta industrial”. Sin duda existen manuales especializados donde se describen con toda solvencia las características de las Organizaciones que desarrollan este tipo de proyectos. El contenido de dicho capítulo, que es fruto de la experiencia y de la observación, no pretende sustituir a los referidos

manuales. Su única pretensión es destacar aquello que pudiera ser útil para el desarrollo posterior y, sobre todo, poner de relieve el contexto sobre el que se manifiesta el efecto relajación. El capítulo I concluye apuntando a un factor esencial en la planificación de proyectos: El comportamiento humano. Aquí hunde sus raíces nuestra teoría del efecto relajación.

En el capítulo II nos referimos al origen de la planificación de proyectos, que normalmente se sitúa en las fechas de aparición de la técnica PERT. Nadie pone en duda la popularidad de esta técnica, de hecho la mayoría de los planificadores dicen utilizarla. Sin embargo, la realidad muestra claramente que no se aplica, al menos en su forma ortodoxa<sup>117</sup>. A lo sumo se utilizan versiones “descafeinadas” que se limitan a la expresión gráfica de las redes y a la obtención del camino crítico y su tiempo de ejecución.

Estamos de acuerdo en que las actividades de I+D se caracterizan por una gran incertidumbre en sus tiempos de ejecución, que dan lugar a las dificultades inherentes a su planificación. Para ellas nació la técnica PERT y para cualquier otra tipología de proyectos cuyas actividades puedan ser asimiladas a las de I+D. Creemos que en nuestro caso las actividades debieran estar lo suficientemente definidas como para poder asignarles tiempos deterministas<sup>118</sup>. Lo que ocurre, es que no se presta la atención suficiente a la definición de aquéllas, justificándose en la supuesta incertidumbre que rodea a su ejecución.

---

<sup>117</sup> Este es el pensamiento de Schonberger (1981), que compartimos.

<sup>118</sup> A lo sumo podríamos asignarles un rango de tiempos, lo que permitiría aplicar “técnicas difusas” a la planificación.

### VIII.3 CONCLUSIONES DERIVADAS DE NUESTRO PLANTEAMIENTO TEÓRICO

El planteamiento teórico realizado se fundamenta en un conjunto de hipótesis, nuevos conceptos que se definen y otros sobre cuyo significado se puntualiza.

Consideramos fundamental el concepto de “utilidad de la actividad” como algo inmutable, separándolo de su “tiempo de ejecución”, ya que a éste último se deberán las variaciones en la fecha estimada para la finalización del proyecto. Para nosotros los retrasos son independientes del proceso utilizado para la estimación del tiempo de ejecución, de ahí nuestra hipótesis de suponer que los tiempos asociados a las actividades se han obtenido mediante un proceso adecuado, que no pondremos en tela de juicio. Es posible que esto resulte poco defendible, pero es necesario para garantizar que nuestros planteamientos no están afectados de otras posibles causas de los retrasos.

También consideramos fundamental la “función de modos de ejecución de la actividad”, que determinará la intensidad media con la que se ejecutó la actividad.

La clave para valorar la incidencia del efecto relajación en los retrasos, está en los conceptos de “horizonte temporal” y “factor de relajación”, como elementos determinantes de la percepción del procesador. Sin duda, se podría haber establecido otro mecanismo como cuantificación de esa percepción, lo que permite abrir nuevas líneas de investigación.

Sobre los modelos relativos a la actividad, cabrían infinidad de versiones que expresaran diferentes modos de interpretar la evolución de la intensidad con la que se ejecuta. Hemos expuesto dos modelos pensando en su sencillez y verosimilitud, pero sin ánimo de acaparar todas las alternativas. Aquí, de nuevo,

encontramos posibilidades para abrir nuevas líneas de investigación. La elección de un modelo u otro sólo incide en la cuantificación de la “presión sobre el procesador” que sería necesaria<sup>119</sup> en cada instante para la compensación total del efecto relajación. Es decir, sólo afectará a la relación entre “ $\alpha$ ” y “ $k_t$ ”. Esto es debido a que en nuestro enfoque lo que afecta al tiempo de la actividad es el valor medio de su intensidad. Sin embargo, sí es importante conocer el modelo más adecuado, porque de su forma depende cómo hay que aplicar la presión a lo largo del desarrollo del proyecto.

De los modelos propuestos para la actividad podemos extraer las siguientes conclusiones: En un caso (Modelo MABIT), hemos supuesto que la intensidad es constante en ausencia de mecanismos correctores del efecto relajación y creciente, con pendiente  $\alpha$ , cuando se aplican esos mecanismos, cuya cuantificación sería precisamente el valor  $\alpha$ . En este modelo vemos cómo  $\alpha$  crece casi linealmente con  $k_t$ . Es de destacar cómo cierta variante del modelo MABIT en la que la intensidad de la actividad es siempre creciente, sugerida por el Dr. J. Pérez Navarro, presenta un resultado que difiere muy poco del aportado por dicho modelo MABIT:  $\alpha$  crece linealmente con  $k_t$ . (ver Anexo de cálculos).

El otro modelo propuesto (Modelo MAPIT), presenta una intensidad que evoluciona con forma potencial de exponente “ $g$ ”, considerando que en ausencia de mecanismos correctores ( $\alpha = 0$ ) su valor máximo coincide con el estándar. Esto permite asociar a cada  $k_t$  un valor  $g$ . Para realizar la corrección suponemos simplemente que el coeficiente se incrementa en el valor  $\alpha$  (pasa de  $1$  a  $1 + \alpha$ ). Como en el caso anterior, vemos cómo  $\alpha$  es creciente con  $k_t$ , pero esta vez más que proporcionalmente.

---

<sup>119</sup> El valor del parámetro  $\alpha$  que justamente compense el efecto relajación, será una función de la brecha existente entre la intensidad media de la actividad y la estándar, o lo que es lo mismo, de  $k_t$ .

En la práctica de la Dirección de Proyectos puede observarse cómo se aplica presión sobre el procesador: Normalmente es creciente con la cercanía de la fecha teórica de finalización del proyecto (o avance del proyecto). Nuestras conclusiones al respecto son totalmente opuestas: Dadas las hipótesis planteadas, esa presión es creciente con  $k_t$  y en consecuencia decreciente con el avance del proyecto.

De lo anterior concluimos que la cuantificación del efecto relajación ( $k$  o constante de la Organización), sólo depende de la percepción del procesador y no del modelo elegido para la actividad. La agregación de todas las actividades tiene su expresión en el “perfil del proyecto”, siendo aquí donde se encuentra la relación implícita entre la percepción del procesador y  $k$ .

La modelización realizada del perfil del proyecto también permitiría otras variantes más complejas, pero creemos que el modelo elegido (MLRCD) o de las dos pendientes se ajusta bastante a la realidad, dentro de su sencillez. Quizás debamos resaltar la sensibilidad de nuestro modelo al parámetro “ $m$ ” (determinante del nivel de recursos finales), al considerarlo constante durante el tiempo de demora. Aquí llamamos la atención sobre nuevas posibilidades de investigación, si consideramos otra forma de evolución para el perfil en esta última fase.

#### **VIII.4 CONCLUSIONES SOBRE EL ENFOQUE CLÁSICO DE LOS RETRASOS**

Como ya se puso de manifiesto en las conclusiones del capítulo IV, los diferentes enfoques clásicos de los retrasos podríamos agruparlos en los apartados siguientes:



- (e) Para algunos autores, la causa principal del retraso en un proyecto es el tratamiento determinista dado a los tiempos de las actividades.
- (f) Otros se refieren a que no existen conocimientos suficientes para saber cómo determinados factores, inherentes a los sujetos estimadores de los tiempos de las actividades, pueden afectar a la incertidumbre asociada al resultado obtenido para el tiempo de ejecución del proyecto.
- (g) Determinados autores buscan la existencia de cierta correlación, entre la incertidumbre asociada al tiempo estimado para el proyecto y determinados aspectos de la red del proyecto.
- (h) Por último, otros opinan que cualquier acción que se tome dirigida a la compensación de los esperados retrasos en las fechas de terminación de los proyectos, resultaría ineficaz al actuar el efecto Parkinson.

Como puede observarse, en ningún caso se menciona al sujeto realizador de la actividad (procesador) como posible causa de los retrasos, por lo que concluimos que tal sujeto es considerado como una “máquina” en el enfoque clásico.

La opinión más general, es que no se aplican correctamente las técnicas para la planificación, al suponer que los tiempos son deterministas. Nunca se pone en duda la oportunidad de la aplicación de la técnica PERT a cualquier tipo de proyecto, suponiendo que es la técnica más adecuada para la programación de cualquier conjunto de actividades que pueda llamarse “proyecto”.

Algunos autores han admitido la existencia de “factores de difícil medición”. Si consideramos que el efecto relajación engloba a alguno de esos factores, dejarían de ser de “difícil medición” si se verificara la validez de nuestra teoría.

## VIII.5 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE PROYECTOS REALES

En el capítulo VII se ha expuesto el proceso mediante el cual obtenemos la constante  $k$  de la Organización, es decir, la cuantificación del efecto relajación. El haber practicado el experimento en sólo una Organización y sobre una muestra tan reducida (11 proyectos), no es suficiente para ser concluyentes con respecto a que el efecto relajación es una constante de cada Ingeniería. No obstante, se detectan indicios de que nuestras hipótesis pudieran estar en el buen camino, de acuerdo con lo que destacamos a continuación.

Con relación a la constante de la Organización ( $k$ ): Los planteamientos teóricos del capítulo III nos permiten acotar el valor de  $k$  ( $0 \leq k \leq 1$ ). El valor obtenido como constante de esa Organización ( $k = 0,12$ ), nos da una idea más exacta del rango de variación posible para  $k$  en las diferentes Organizaciones que pudieran ser objeto de análisis en el futuro. En particular, para la Organización objeto de nuestro estudio y los diferentes proyectos a analizar, los valores de  $k$  han estado comprendidos entre “0,08 y 0,17”.

A pesar de la dispersión de los valores de  $k$ , se ha demostrado que guarda una pobre correlación con determinados aspectos de los proyectos estudiados, por lo que cabría afirmar que depende más de otros aspectos de la Organización. En particular, destacamos aquellos aspectos de los proyectos con los que  $k$  guarda una baja correlación:

- Con la duración inicialmente estimada ( $T_E$ ): 0,43
- Con la demora relativa observada  $(T_R - T_E)/T_E$ : 0,05
- Con los recursos totales aplicados ( $R_T$ ): 0,35
- Con la duración real ( $T_R$ ): 0,44
- Con el centro de gravedad de los recursos aplicados ( $CG$ ): 0,29

Obsérvese cómo, aun siendo bajas las correlaciones anteriores, destacan por “menos bajas” las relativas a las duraciones del proyecto (sean estimadas o reales). Da la impresión de que la expectativa de un proyecto “largo” incentiva aún más los mecanismos que originan el *ER*.

Otra conclusión importante es cómo afecta la distribución de los recursos en el tiempo a los retrasos del proyecto (o al valor de  $k$ , según se mire), en caso de no tomar acciones compensatorias del *ER*. Aunque las relaciones de precedencia típicas de estos proyectos dejarán poco margen a esa distribución de recursos, llama la atención la forma en que esa distribución o lo que es lo mismo, el centro de gravedad de los recursos, afecta a los retrasos: Una anticipación de los recursos dará lugar a mayores retrasos. Esto se pone de manifiesto en el capítulo anterior (punto VII.4.3), mediante la correlación que existe entre la demora relativa y el centro de gravedad de los recursos aplicados. El valor “-0,71” nos está indicando una aceptable correlación inversa.

La explicación de lo anterior está en la forma en que evoluciona el “factor de relajación” mientras el proyecto está en ejecución (ver III.5.3). En efecto, anticipar recursos significa someterlos a mayores factores de relajación, lo que implica una menor efectividad de aquellos y, en consecuencia, un incremento en los tiempos de ejecución de sus actividades, lo que se trasladará al final del proyecto en forma de retraso.

Con relación a la dispersión observada en los valores de  $k$  obtenidos con cada proyecto, pensamos que su causa pudiera estar en que el almacenamiento de los datos históricos se hizo por periodos de 30 días. No sería extraño que un retraso contemplado de 90 días, haya sido en la realidad de 65 ó de 85, por ejemplo.

**Observación:** El valor de  $k$  que se obtiene con el modelo MLRCD presupone que no se han aplicado mecanismos correctores del efecto relajación. Pero en los

proyectos reales es común que el director de los mismos aplique algún tipo de presión sobre los procesadores. Dado que, también normalmente, a proyectos diferentes corresponden diferentes directores, podría ser que parte de la dispersión de los valores de  $k$  se debiera a esta circunstancia.

## VIII.6 PRINCIPALES APORTACIONES

A continuación hacemos un breve repaso de los conceptos, ideas o definiciones que consideramos las aportaciones originales más relevantes de este trabajo.

### VIII.6.1 Particular concepto de actividad

En la bibliografía analizada no aparece claro el concepto de actividad en el contexto de un proyecto. En este sentido se aprecia una amplia gama criterios, de tal manera que al no delimitar el concepto se llega a confundir actividad con proyecto. Además, cuando en la literatura se encuentran referencias a actividades concretas, lo son fundamentalmente a aquellas que conllevan labores manuales, por lo que las actividades de ingeniería quedan marginadas.

Determinados planteamientos metodológicos que hacemos en este trabajo nos llevan a la necesidad de establecer una clara definición del concepto de actividad (al menos en el contexto del presente trabajo), definición que destacamos a continuación:

*Conjunto de operaciones y trabajos dirigidos a completar algo útil en el contexto de un proyecto. Dichas operaciones son ejecutadas por una persona (procesador), con un conjunto manejable de medios (herramientas y/o procedimientos), en un determinado entorno.*

La definición propuesta es válida para cualquier proyecto, siempre que las actividades sean el resultado de una determinada partición de aquél, que asigna fracciones a procesadores individuales en lugar de asignarlas a un conjunto de procesadores.

### VIII.6.2 Modo de ejecución estándar de una actividad

Cuando nos referimos al modo de ejecución estándar de una actividad, es porque estamos admitiendo otros modos de ejecutarla. Muchos autores se han referido anteriormente a la existencia de diversos modos o formas de ejecutar una actividad, la mayoría haciendo referencia a diferentes combinaciones de recursos y/o diferentes combinaciones de coste y calidad. La primera referencia encontrada a este concepto (Kelley y Walker, 1959) alude a la forma “normal” de ejecución de una actividad que se caracteriza por ser la de menor coste y corresponderle una duración considerada “normal”.

Nuestro concepto coincide con los conceptos encontrados en la bibliografía analizada en lo relativo a lo que suele denominarse “tiempo normal”. Sin embargo, es original en lo relativo al procesador y su entorno, como se refleja en la transcripción que realizamos de la definición de nuestro concepto de modo de ejecución estándar de una actividad:

*Aquel que presupone, en cuanto a los medios, la utilización de herramientas y/o procedimientos conocidos; y en cuanto al procesador, una actitud que implica niveles de destreza y presteza considerados normales. Al modo de ejecución estándar le asignamos un tiempo estimado o “tiempo de ejecución”.*

### VIII.6.3 Concepto de “utilidad de un proyecto”

El sentido que damos a la utilidad de un proyecto de una Planta Industrial, se refiere a la percepción que tiene la Organización propietaria de esa *PI* sobre los beneficios netos que le reportará a lo largo de su vida útil (aquí incluimos no sólo el proyecto, sino también la inversión realizada y el proceso de construcción, cuando se trate de una *PI*).

Parece evidente que la utilidad de un proyecto está asociada a sus beneficios futuros y así parece considerarse en la bibliografía analizada, aunque no se indica expresamente. Nuestra opinión es que si es así, podríamos suponer que su generación tiene lugar en el proceso de desarrollo del proyecto y si éste está fragmentado en actividades, irá acumulando utilidad en la medida en que se vayan concluyendo aquéllas. A continuación recordamos la definición de “utilidad de un proyecto de una Planta Industrial”:

*Es cierta capacidad intrínseca al proyecto para satisfacer su transformación en Planta Industrial (mediante el proceso de construcción). Esto sería equivalente a considerar que esa utilidad reside en la expectativa de un beneficio futuro (a veces evitar una penalización).*

### VIII.6.4 Concepto de “utilidad de una actividad”

No hemos encontrado bibliografía que de alguna manera se refiera al concepto de utilidad en relación con las actividades que conforman un proyecto. Partiendo de la base de que un proyecto es algo con una utilidad manifiesta y susceptible de ser valorada, podemos trasladar el concepto a los fragmentos del proyecto que son las actividades (recordemos que al efectuar la planificación del proyecto fue fragmentado en actividades, de acuerdo con los planteamientos y definiciones dadas en el presente trabajo).

Nuestro concepto de utilidad de una actividad es algo intrínseco a la misma y que, en consecuencia, es independiente del tiempo que el procesador tarde en ejecutarla. Consideramos de interés la asignación de valor a la utilidad de la actividad y proponemos el número de *hh* que corresponde al modo de ejecución estándar de esa actividad como valor para su utilidad. Con estos criterios está elaborada nuestra definición, que recordamos a continuación:

*Es la aportación que esa actividad realiza al proyecto y que significará cierto incremento de la utilidad acumulada por el mismo. Convendremos en que la unidad para medir la utilidad sea la hora-hombre (hh), y su valor la medida del tiempo de ejecución de la actividad correspondiente al modo estándar.*

#### **VIII.6.5 Concepto de “modos de ejecutar una actividad”**

Existen abundantes referencias en la bibliografía sobre la planificación de proyectos relativas a los diferentes modos o formas de ejecutar una actividad, asociándole a cada modo un tiempo de ejecución y/o un coste.

Nuestro planteamiento con relación a este punto es original y se sustenta en nuestra definición de actividad y nuestro concepto de utilidad de la actividad. A cada modo le asociamos un tiempo de ejecución (en esto coincidimos con la bibliografía existente) y una intensidad media que depende del *ER* (esto es lo original), cuyo producto es la expresión de la utilidad que la actividad aporta al proyecto.

### VIII.6.6 Función de modos de ejecución de una actividad

No es más que una relación funcional entre la intensidad media con que se ejecuta una actividad y su tiempo de ejecución. Su caracterización (utilidad aportada al proyecto constante), está expresada en el punto VIII.6.5 y en la definición que a continuación se recuerda:

*Es el lugar geométrico de las combinaciones tiempo  $\times$  intensidad, caracterizados por aportar al proyecto una utilidad constante.*

### VIII.6.7 Concepto de “horizonte temporal”

Se introduce este concepto de *HT* de una actividad como la variable independiente que sirve a la cuantificación del *ER*. De ahí que, aunque contemplemos el *ER* como algo inherente a la Organización, se manifieste de forma desigual durante el desarrollo del proyecto, dependiendo del instante en que se inicie cada una de las actividades. Concretamente, el *HT* es una función decreciente en el intervalo de ejecución del proyecto, como se desprende de la definición que se recuerda a continuación:

*Es la diferencia entre la fecha determinada por  $T_E$  y el momento ( $t$ ) en que realmente se inicia esa actividad, es decir:  $HT = T_E - t$ . Cuando estemos en tiempo de demora, (momento de inicio de la actividad comprendido entre  $T_E$  y  $T_R$ ), convendremos que  $HT = 0$ .*

### VIII.6.8 Concepto de “efecto relajación”

Lo consideramos como la aportación principal del presente trabajo. No hemos encontrado en la bibliografía analizada ninguna referencia a este concepto,



ni explícita ni implícitamente. Se trata de un concepto nuevo, que intenta explicar los retrasos en que incurren con tanta frecuencia la mayoría los proyectos<sup>120</sup>.

Conceptualmente el *ER* se refiere a determinados aspectos de la personalidad del procesador, relacionada con la Organización en cuyo seno desarrollan sus actividades. Aunque entendemos que la forma de manifestar cada procesador el *ER* será muy desigual, consideraremos por hipótesis sólo aquellos aspectos derivados de su interacción con el entorno (aspectos que consideramos sólo dependientes de la Organización y, en consecuencia, comunes a todos los procesadores de la misma). El *ER* se traducirá en una disminución de la intensidad media con la que los procesadores ejecutan sus respectivas actividades. Esa traducción, como anteriormente se ha puesto de manifiesto, no es constante a lo largo del desarrollo del proyecto. A continuación se reproduce la definición dada:

*Es aquella componente de la actitud del procesador que se deriva de su interacción con el entorno y que se manifiesta con una reducción de la intensidad media con la que ejecutó su actividad.*

### **VIII.6.9 Concepto de “factor de relajación”**

No es más que la cuantificación del *ER*, como ya se adelantó en el punto VIII.6.8 y cuya definición recordamos a continuación:

*Es la cuantificación del ER en el instante del inicio de una determinada actividad y cuyo valor es directamente proporcional a HT.*

---

<sup>120</sup> Consideramos que el *ER* no sólo se manifiesta en el desarrollo de un proyecto, sino en cualquier forma de actividad humana cuyo objetivo esté relacionado con un momento futuro.

### VIII.6.10 Concepto de “constante de la Organización”

Con las hipótesis efectuadas, el  $ER$  es únicamente dependiente de la Organización, por lo tanto afectará por igual a todos los proyectos que se desarrollen en su seno. O lo que es lo mismo, se trata de una constante; así se indica en la definición que se recuerda a continuación:

*Es el valor del factor de relajación que afecta por igual a cualquier proyecto de esa Organización, en el momento de su inicio (factor de relajación inicial).*

### VIII.6.11 Modelo de actividad intensidad-tiempo

Con el fin de reflejar gráficamente los conceptos que se han ido introduciendo y servir de soporte a la expresión de las relaciones analíticas que conducirán a la cuantificación del parámetro correspondiente a la “presión sobre el procesador”, se propone un modelo de análisis que denominamos “Modelo de actividad intensidad-tiempo”. En el contexto del presente trabajo se han presentado dos variantes del modelo. Una primera, que se ha denominado modelo “MABIT” y otra denominada modelo “MAPIT”.

La diferencia fundamental entre alternativas para los modelos, estriba en el supuesto que en cada caso se realice para la forma de la función que expresa la evolución de la intensidad instantánea de la actividad durante su desarrollo, y en la forma de actuación del parámetro “ $\alpha$ ” sobre dicha función. Así, en las dos variantes propuestas para análisis, consideramos la referida función lineal (modelo MABIT, en el que  $\alpha$  actúa modificando la pendiente), y potencial (modelo MAPIT, en el que  $\alpha$  actúa modificando la amplitud).

### VIII.6.12 Concepto de “presión sobre el procesador”

Este concepto engloba a un conjunto de acciones tomadas por la Organización y dirigidas a la compensación del ER. La entidad o medida de esas acciones vienen expresadas por el parámetro “ $\alpha$ ”, quedando recogidas en la siguiente definición:

*Es aquella llamada permanente a la destreza del procesador, realizada por la Organización (en particular por el director del proyecto), con el fin de que acelere la actividad en curso. Se trata de una componente de interacción del binomio Organización-procesador, orientada a la compensación del ER.*

### VIII.6.13 Modelo lineal de recursos crecientes-decrecientes

Con el fin de reflejar gráficamente los conceptos que, con relación al “perfil del proyecto”, se han ido introduciendo, y servir de soporte a la expresión de las relaciones analíticas que conducirán a la cuantificación del parámetro correspondiente a la “constante de la Organización”, se propone un modelo de análisis que denominamos “Modelo lineal de recursos crecientes-decrecientes” (MLRCD).

En el contexto del presente trabajo se presenta este modelo sin perjuicio del interés que pudieran tener otras variantes, que podrían diferenciarse en la caracterización del perfil mediante otras “formas” funcionales o en la manera de tratar el tramo final del proyecto, correspondiente al tiempo de demora.

### **VIII.6.14 Aplicación para adaptar el perfil real de un proyecto al modelo MLRCD**

Se trata de una aplicación informática que incorpora las expresiones y resultados del modelo MLRCD (desarrollada sobre Excel), que nos permite introducir como dato un perfil cualquiera. Como resultado obtendremos un perfil lineal de dos pendientes (primero positiva y luego negativa), así como sus parámetros asociados. Si el retraso en que incurrió el proyecto fuera un dato, obtendríamos como resultado la constante  $k$  de la Organización. Y a la inversa, si consideramos el perfil de un proyecto en fase de planificación, el valor conocido de  $k$  nos permitirá estimar el retraso. Es de interés observar cómo la forma del perfil afecta al retraso calculado.

El objetivo principal de esta aplicación es utilizarla en el análisis de proyectos reales, de los que se conozca el perfil de recursos aplicados y retraso en que se incurrió. El capítulo VII muestra los resultados de este análisis obteniendo el valor de la “constante de la Organización”, verificando el grado de cumplimiento de nuestra Teoría del Efecto Relajación sobre una determinada Organización.

## ANEXO: CÁLCULOS

### I CÁLCULOS RELATIVOS A LOS MODELOS EXPLICATIVOS DE LA ACTIVIDAD

Se trata de obtener el valor de “ $\alpha$ ”, que sirva como parámetro para determinar la presión que se debe ejercer sobre el procesador, en cada momento del desarrollo del proyecto, con el fin de compensar el *ER*. El proceso de cálculo se fundamenta en la consideración de que la actividad requiere una determinada eficiencia media en el intervalo de su ejecución, de manera que los defectos (intensidad inferior a la normal) tienen que ser compensados por los excesos (intensidad superior a la normal). De acuerdo con este criterio, la superficie determinadas por el eje “ $w$ ”, y la función  $I(\alpha, w)$ , debe ser igual a la estándar ( $I \times w_e$ ).

#### I.1 Cálculos relativos al modelo “MABIT”

Con las consideraciones realizadas anteriormente, planteamos las ecuaciones fundamentales del modelo “MABIT”.

Ecuación de la recta (intensidad instantánea):  $z_1(\alpha, w) = (I - k_t) + \alpha \times w$

Ecuación de la hipérbola (modos de ejecutar la actividad):  $z_2(w) = w_e / w$

La función intensidad-tiempo corregida, quedará de la forma:

$$I(\alpha, w) = \begin{cases} z_1(\alpha, w), & \text{para } 0 \leq w < w_Y \\ z_2(w), & \text{para } w_Y \leq w < w_e \end{cases}$$

El valor  $\alpha$  será tal que la superficie determinada por la función Intensidad-tiempo corregida “ $I(\alpha, w)$ ” sea de valor  $w_e$ , es decir:

$\int_0^{w_e} I(\alpha, w) dw = w_e$ , que expresada en cada una de las partes, queda de la forma:

$$\int_0^{w_Y} (1 - k_t + \alpha w) dw + \int_{w_Y}^{w_e} \left( \frac{w_e}{w} \right) dw = w_e, \text{ y resolviendo:}$$

$$(1 - k_t) w + \frac{\alpha}{2} w^2 \Big]_0^{w_Y} + w_e \ln w \Big]_{w_Y}^{w_e} = w_e, \text{ y realizando operaciones:}$$

$$(1 - k_t) w_Y + \frac{\alpha}{2} w_Y^2 + w_e (\ln w_e - \ln w_Y) = w_e, \text{ y recomponiendo:}$$

$w_e (\ln w_e - \ln w_Y - 1) = -(1 - k_t) w_Y - \frac{\alpha}{2} w_Y^2$ , que también puede ponerse de la forma:

$$w_e \left( 1 + \ln \frac{w_Y}{w_e} \right) = (1 - k_t) w_Y + \frac{\alpha}{2} w_Y^2 \quad [1]$$

Para poder relacionar la recta con la variable  $w_Y$ , obtenemos la ecuación de la recta que pasa por los puntos  $(0, 1 - k_t)$  y  $(w_Y, z_Y)$ , teniendo en cuenta que  $w_Y \times z_Y = w_e$ , o sea  $w_Y = w_e / w_Y$ :

$$\frac{w - 0}{z(w) - (1 - k_t)} = \frac{w - w_Y}{z(w) - \frac{w_e}{w_Y}}, \text{ o también:}$$

$$(w - 0) \left[ z(w) - \frac{w_e}{w_Y} \right] = (w - w_Y) [z(w) - (1 - k_t)], \text{ y efectuando operaciones:}$$

$$w \left[ z(w) - \frac{w_e}{w_Y} \right] = w [z(w) - (1 - k_t)] - w_Y [z(w) - (1 - k_t)], \text{ simplificando:}$$

$$-w \frac{w_e}{w_Y} = -w (1 - k_t) - z(w) w_Y + w_Y (1 - k_t), \text{ y agrupando:}$$

$$z(w) w_Y = w \frac{w_e}{w_Y} + (1 - k_t) (w_Y - w), \text{ de donde obtenemos la expresión } z(w):$$

$z(w) = 1 - k_t + \left(\frac{w_e}{w_Y} - 1 + k_t\right) \frac{w}{w_Y}$ , y comparando este resultado con la ecuación de la recta dada anteriormente:  $z_I(\alpha, w) = (1 - k_t) + \alpha \times w$ , deducimos que la pendiente  $\alpha$  tendrá por valor:

$$\alpha = \left(\frac{w_e}{w_Y} - 1 + k_t\right) \frac{1}{w_Y}, \text{ o también } \alpha = \frac{w_e - (1 - k_t) w_Y}{w_Y^2} \quad [2]$$

La expresión obtenida para la pendiente  $\alpha$ , será sustituida en la ecuación deducida de la comparación de las áreas [1], quedando:

$$w_e \left(1 + \ln \frac{w_Y}{w_e}\right) = (1 - k_t) w_Y + \frac{1}{2} \left(\frac{w_e - (1 - k_t) w_Y}{w_Y^2}\right) w_Y^2, \text{ donde operando:}$$

$$1 + \ln \frac{w_Y}{w_e} = \frac{1}{2} \left[1 + (1 - k_t) \frac{w_Y}{w_e}\right], \text{ donde al margen de } k, \text{ hemos adoptado como}$$

variable  $w_Y / w_e$ . Realizando transformaciones en esta expresión, obtenemos la equivalente:

$$\ln \left(\frac{w_Y}{w_e}\right)^2 - (1 - k_t) \frac{w_Y}{w_e} + 1 = 0, \text{ por simplicidad de la expresión utilizamos una}$$

variable auxiliar  $x = w_Y / w_e$ , quedando de la forma:

$$\ln x^2 - (1 - k_t) x + 1 = 0 \quad [3]$$

La variable  $x$  muestra el tanto por uno de avance de la actividad cuando la intensidad de la misma adquiere el valor máximo. El valor obtenido de  $x$  (que depende exclusivamente de  $k_t$ ) y, en consecuencia, el correspondiente para  $t_Y$ , servirá para el cálculo de la pendiente  $\alpha$ , al sustituirlo en la expresión [2]. Es evidente que  $\alpha$  dependerá exclusivamente de  $k_t$ . Otra manera de expresar el valor de  $\alpha$  viene dado por la expresión siguiente:

$$\alpha = \frac{\frac{1}{x} - (1 - k_t)}{w_e x} \quad [4]$$

Es evidente que sólo debemos considerar, de los dos posibles valores de  $x$ , aquél que se traduzca en un valor  $\alpha \geq 0$ , es decir siempre se ha de verificar  $1/x \geq (1 - k_t)$ . O lo que es lo mismo, la inversa del avance de la actividad correspondiente al momento en que se ejecuta con intensidad máxima, será siempre mayor (en tantos por uno) que el valor de la intensidad en el momento del inicio de aquella. Por otra parte, es evidente que el valor máximo de  $x$  es 1,

(recordemos que  $x = w_Y / w_e$ ), por lo que podremos establecer la acotación que sigue:

$I \geq x \geq x(I - k_t)$ , que nos permite establecer el rango de la solución factible de la ecuación dada por la expresión [3].

### I.1.1 Cálculos relativos a una variante del modelo “MABIT”

Una variante del modelo “MABIT” es considerar que la intensidad de la actividad es siempre creciente<sup>121</sup>. La función intensidad-tiempo corregida, quedará de la forma:

$$I(\alpha, w) = z_I(\alpha, w) = (I - k_t) + \alpha \times w$$

El valor  $\alpha$  será tal que la superficie determinada por la función Intensidad-tiempo corregida “ $I(\alpha, w)$ ” sea de valor  $w_e$ , es decir:

$$\int_0^{w_e} I(\alpha, w) dw = w_e, \text{ donde sustituyendo:}$$

$$\int_0^{w_e} (I - k_t + \alpha w) dw = w_e, \text{ y resolviendo:}$$

$$(1 - k_t)w + \frac{\alpha}{2} w^2 \Big|_0^{w_e} = w_e, \text{ y realizando operaciones:}$$

$$(1 - k_t)w_e + \frac{\alpha}{2} w_e^2 = w_e, \text{ y despejando el valor de } \alpha: \alpha = \frac{2k_t}{w_e}$$

### I.2 Cálculos relativos al modelo “MAPIT”

Con las mismas consideraciones que hemos realizado para el modelo anterior, la superficie determinadas por el eje “ $w$ ” y la función  $I(\alpha, w)$ , debe ser igual a la estándar ( $I \times w_e$ ).

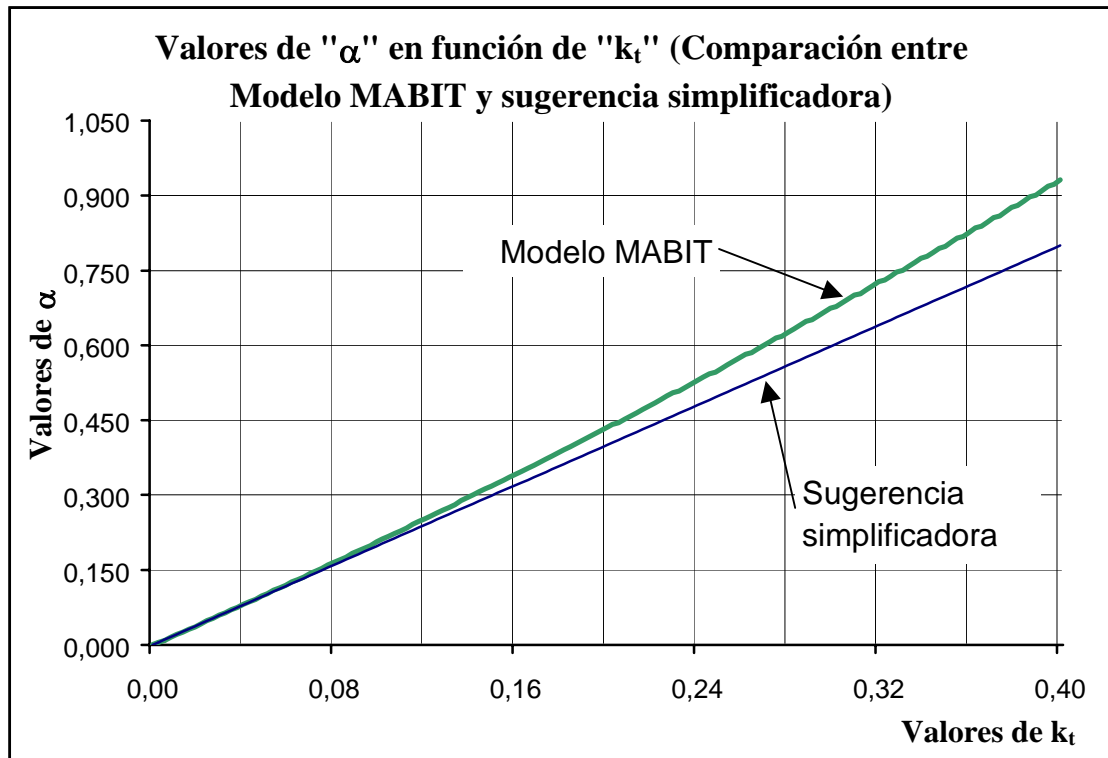
Ecuación de la función (intensidad instantánea):  $z_I(\alpha, w) = (I + \alpha)w^g$

Ecuación de la hipérbola (modos de ejecutar la actividad):  $z_2(w) = w_e / w$

<sup>121</sup> Esta sugerencia es del Dr. J. Pérez Navarro, poniendo de manifiesto que la simplificación considerada da lugar a un  $\alpha$  que difiere poco del obtenido por el modelo MABIT. Ver gráficas.



En este modelo (MAPIT), el exponente "g" será dependiente del valor del factor de relajación en cada instante del proyecto ( $k_t$ ). La clave para la obtención de  $g$  es la siguiente consideración (ver Fig. V.8):



$\int_0^1 w^g dw + \int_1^{w_r} \frac{w_e}{w} dw = w_e$ , donde  $w_e = 1$  y  $w_r$  lo obtenemos teniendo en cuenta que:  $w_Y z_Y = w_r z_r = w_r (1 - k_t) = w_e$ , es decir:  $w_r = \frac{w_e}{1 - k_t} = \frac{1}{1 - k_t}$ , por lo que la expresión anterior queda de la forma:

$$\int_0^1 w^g dw + \int_1^{\frac{1}{1-k_t}} \frac{1}{w} dw = 1, \text{ que al resolver queda: } \left[ \frac{w^{g+1}}{g+1} + \ln w \right]_1^{\frac{1}{1-k_t}} = 1, \text{ que}$$

simplificando:  $\frac{1}{g+1} + \ln \frac{1}{1-k_t} = 1$ , donde operando para obtener el valor de  $g$ :

$$g+1 = \frac{1}{1 - \ln \frac{1}{1-k_t}} = \frac{1}{1 + \ln(1-k_t)}, \text{ de donde queda como valor de } g:$$

$$g = \frac{\ln \frac{1}{1-k_t}}{1 - \ln \frac{1}{1-k_t}}$$

[5]

La función intensidad-tiempo corregida, quedará de la forma:

$$I(\alpha, w) = \begin{cases} z_1(\alpha, w), & \text{para } 0 \leq w < w_Y \\ z_2(w), & \text{para } w_Y \leq w < w_e \end{cases}$$

El valor  $\alpha$  será tal que la superficie determinada por la función Intensidad-tiempo corregida " $I(\alpha, w)$ " sea de valor  $w_e$ , es decir:

$$\int_0^{w_e} I(\alpha, w) dw = w_e, \text{ que expresada en cada una de las partes, queda de la forma:}$$

$$\int_0^{w_e} I(\alpha, w) dw = \int_0^{w_e} (\min\{(1 + \alpha) w^g, \frac{w_e}{w}\}) dw, \text{ o lo que es lo mismo:}$$

$$\int_0^{w_Y} (1 + \alpha) w^g dw + \int_{w_Y}^{w_e} \left(\frac{w_e}{w}\right) dw = w_e, \text{ pero como } w_e = I, \text{ resulta:}$$

$$\int_0^{w_Y} (1 + \alpha) w^g dw + \int_{w_Y}^I \frac{dw}{w} = 1, \text{ y teniendo en cuenta que } w_Y z_Y = w_r (1 - k_t) = I,$$

de donde:  $w_Y = \frac{w_r}{z_Y} (1 - k_t)$ , y si además admitimos que se mantiene la

proporción entre el tiempo de finalización de la actividad ( $w_e$ ) y el tiempo que

corresponde a la máxima intensidad ( $w_Y$ ) para todo valor del parámetro  $\alpha$ , es

decir:  $\frac{w_r}{w_e} = \frac{w_e}{w_Y}$ , o sea:  $w_r = \frac{1}{w_Y}$ , que sustituyendo en la anterior expresión de

$w_Y$ , resulta:  $w_Y = \frac{1}{z_Y w_Y} (1 - k_t) = (1 - k_t)$ , que al sustituir en los límites de la

integral anterior y resolver queda:

$$(1 + \alpha) \frac{w^{g+1}}{g+1} \Big|_0^{1-k_t} + \ln w \Big|_{1-k_t}^1 = 1, \text{ donde operando:}$$

$$(1 + \alpha)(1 - k_t)^{g+1} = (g + 1)[1 + \ln(1 - k_t)], \text{ de donde despejando } \alpha:$$

$$\alpha = \frac{1}{(1 - k_t)^{g+1}} - 1, \text{ y si tenemos en cuenta que } g + 1 = \frac{1}{1 + \ln(1 - k_t)}, \text{ obtenemos}$$

la expresión del parámetro  $\alpha$  en función de del factor de relajación  $k_t$ :

$$\alpha = (1 - k_t)^{\frac{-1}{1 + \ln(1 - k_t)}} - 1 \quad [6]$$

## II CÁLCULOS RELATIVOS A LOS MODELOS “MB” Y “MLRCD”

Nuestro planteamiento se sustenta en la supuesta existencia de una relación entre los retrasos en que con frecuencia incurren los proyectos y lo que hemos llamado efecto relajación. Esa relación se rige por la forma de las expresiones matemáticas deducidas de los modelos adoptados.

Se trata de obtener el valor de la demora en que incurriría un proyecto, sujeto al efecto relajación, en el caso de no tomar medidas de compensación del mismo. También, si el dato conocido es la demora del proyecto, podríamos calcular el valor “ $k$ ” de la Organización o factor de relajación inicial. El proceso de cálculo se fundamenta en la consideración de que el efecto relajación, causante del probable retraso del proyecto, se va a traducir en la necesidad de aportar determinado nivel de recursos durante un tiempo adicional al estimado y que la eficiencia de los recursos en este tiempo es la estándar.

Nuestra hipótesis fundamental se centra en que la eficiencia perdida durante el periodo inicialmente estimado, debe ser compensada con recursos adicionales. Comprobaremos cómo la “forma” del perfil del proyecto incide en la demora del mismo, manteniendo constantes los recursos totales aplicados.

Sin más preámbulos y considerando que el análisis del perfil del tipo general, al que se refiere el punto VI.2.2, no requiere cálculo adicional, nos centraremos en los desarrollos más detallados correspondientes a los perfiles tipo “MB” y “MLRCD”.

### II.1 Cálculos relativos al modelo “MB”

Partiendo de la expresión [VI.13], dada a continuación:

$$T_R - T_E = \frac{k}{R_0} \int_0^{T_E} R_0 dt - \frac{k}{T_E R_0} \int_0^{T_E} t R_0 dt, \quad \text{donde resolviendo obtenemos:}$$

$$T_R - T_E = \left[ \frac{k R_0}{R_0} t \right]_0^{T_E} - \left[ \frac{k R_0}{T_E R_0} \frac{t^2}{2} \right]_0^{T_E} = k T_E - \frac{k}{T_E} \frac{T_E^2}{2} = k T_E - \frac{k T_E}{2} = \frac{k}{2} T_E, \quad \text{es decir:}$$

$$T_R - T_E = \frac{k}{2} T_E, \quad \text{que es la expresión de la demora del proyecto dada en [VI.14].}$$

Donde si lo conocido es el retraso en que ha incurrido el proyecto, podemos obtener el valor de  $k$ , despejando:

$$k = 2 \frac{T_R - T_E}{T_E} \quad [7]$$

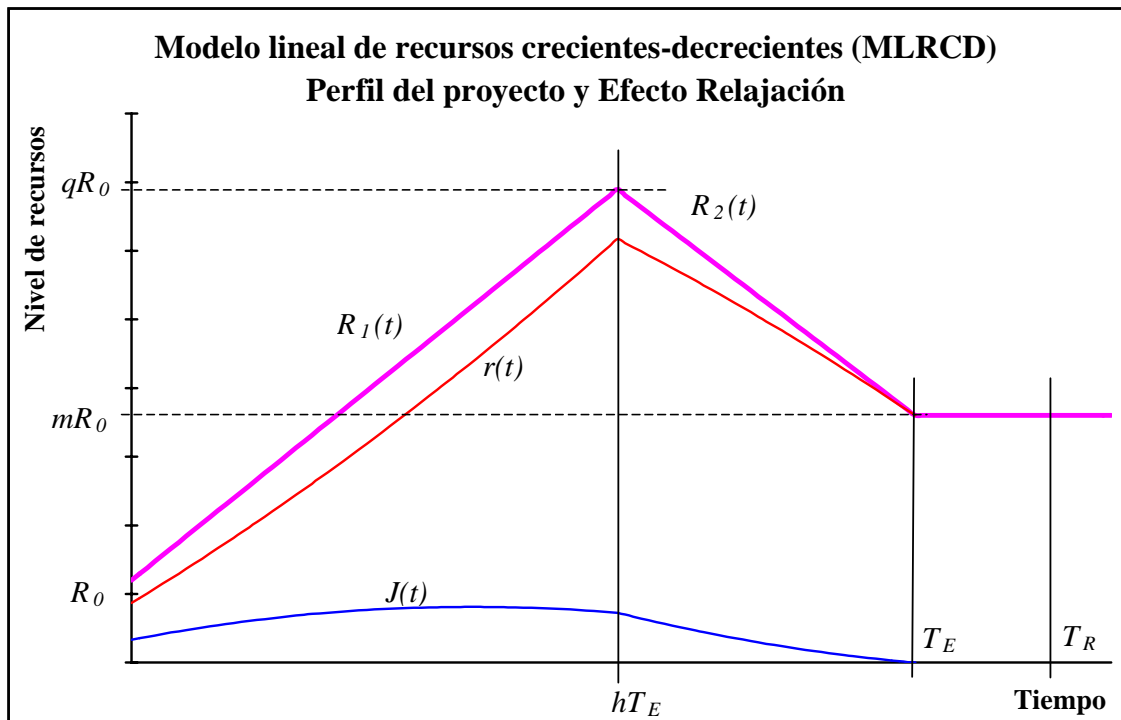
De donde se desprende que cuando los recursos son constantes a lo largo del desarrollo del proyecto, la constante  $k$  de la Organización es el doble del valor relativo de la demora en que ha incurrido el proyecto.

## II.2 Cálculos relativos al modelo "MLRCD"

La expresión de la función  $R(t)$  que determina este modelo fue definida en [VI.16], de la forma:

$$R(t) = \left\{ \begin{array}{ll} R_1(t) = R_0 + R_0 \frac{q-1}{hT_E} t & (0 < t \leq hT_E) \\ R_2(t) = R_0 \frac{q-mh}{1-h} - R_0 \frac{q-m}{T_E(1-h)} t & (hT_E < t \leq T_E) \end{array} \right\}, \text{ que se trata de una}$$

función no continua determinada por dos tramos rectilíneos, como refleja la figura VI.5, que se reproduce a continuación:



A los referidos tramos de  $R(t)$  los hemos denominado  $R_1(t)$  y  $R_2(t)$ , respectivamente. Para cada uno de los tramos tenemos la ordenada en el origen y la pendiente que se indican a continuación:

$$\text{Para } R_1(t): \quad R_1(0) = R_0; \quad \angle = R_0 \frac{q-1}{hT_E}$$

$$\text{Para } R_2(t): \quad R_2(0) = R_0 \frac{q-mh}{1-h}; \quad \angle = -R_0 \frac{q-m}{T_E(1-h)}$$

### II.2.1 Cálculo de los recursos totales en el modelo MLRCD

Aplicando la expresión general de los recursos totales a este modelo, obtenemos la expresión [VI-19], de la que partimos:

$$R_T = \int_0^{T_E} R(t) dt = \int_0^{hT_E} R_1(t) dt + \int_{hT_E}^{T_E} R_2(t) dt, \text{ donde sustituyendo las funciones } R_1(t) \text{ y}$$

$R_2(t)$ , tenemos la expresión:

$$R_T = \int_0^{T_E} R(t) dt = \int_0^{hT_E} \left( R_0 + R_0 \frac{q-1}{hT_E} t \right) dt + \int_{hT_E}^{T_E} \left( R_0 \frac{q-mh}{1-h} - R_0 \frac{q-m}{T_E(1-h)} t \right) dt,$$

donde resolviendo:

$$R_T = \left( R_0 t + R_0 \frac{q-1}{hT_E} \frac{t^2}{2} \right) \Big|_0^{hT_E} + \left( R_0 \frac{q-mh}{1-h} t - R_0 \frac{q-m}{T_E(1-h)} \frac{t^2}{2} \right) \Big|_{hT_E}^{T_E} =$$

$$= R_0 hT_E + R_0 \frac{q-1}{hT_E} \frac{h^2 T_E^2}{2} + R_0 \frac{q-mh}{1-h} (T_E - hT_E) - R_0 \frac{q-m}{T_E(1-h)} \frac{(T_E^2 - h^2 T_E^2)}{2} =$$

$$= R_0 hT_E + R_0 \frac{q-1}{2} hT_E + R_0 T_E (q-mh) - R_0 T_E \frac{(q-m)(1+h)}{2} =$$

$$= R_0 hT_E \left( \frac{q+1}{2} \right) + R_0 T_E \left( \frac{(q+m)(1-h)}{2} \right), \quad \text{donde el primer sumando}$$

corresponde a la integral de la función  $R_1(t)$  y el segundo a la de  $R_2(t)$ . El resultado final quedará como indica la expresión [VI-21], de la forma:

$$R_T = \int_0^{T_E} R(t) dt = R_0 T_E \left( \frac{(1-m)h + q + m}{2} \right) \quad [8]$$

Que es la expresión de los recursos totales aplicados al proyecto. Dado un determinado proyecto, con  $R_0$ ,  $T_E$  y  $R_T$  definidos, existe entre los parámetros una relación implícita que es constante y que se deduce de la expresión anterior. A esa relación implícita la hemos llamado Constante Característica, cuya expresión es:

$$C = \frac{2 R_T}{R_0 T_E} = (1-m)h + q + m \quad [9]$$

## II.2.2 Cálculo del retraso en el modelo MLRCD

Partiendo de la expresión del retraso obtenida en [VI-12], sustituiremos la función genérica  $R(t)$  por la particular de este modelo, dada por [VI-16]. A continuación se reproduce la expresión [VI-12]:

$T_R - T_E = \frac{k}{R(T_E)} \int_0^{T_E} R(t) dt - \frac{k}{T_E R(T_E)} \int_0^{T_E} t R(t) dt$ , expresión que fragmentaremos en dos partes para facilidad de los cálculos, quedando la primera parte como sigue:

$$\frac{k}{R(T_E)} \int_0^{T_E} R(t) dt = \frac{k}{R(T_E)} \left( \int_0^{hT_E} R_1(t) dt + \int_{hT_E}^{T_E} R_2(t) dt \right), \text{ donde teniendo en cuenta que}$$

el nivel de recursos en el instante  $T_E$ , es, de acuerdo con la definición dada para los parámetros,  $R(T_E) = m \times R_0$ , y sustituyendo las respectivas expresiones de las funciones  $R_1(t)$  y  $R_2(t)$ :

$$\frac{k}{m R_0} \int_0^{T_E} R(t) dt = \frac{k}{m R_0} \left( \int_0^{hT_E} \left( R_0 + R_0 \frac{q-1}{hT_E} t \right) dt + \int_{hT_E}^{T_E} \left( R_0 \frac{q-mh}{1-h} - R_0 \frac{q-m}{T_E(1-h)} t \right) dt \right), \text{ teniendo en cuenta}$$

que esta integral ya ha sido calculada, siendo su valor:

$$\int_0^{T_E} R(t) dt = R_0 T_E \left( \frac{(1-m)h + q + m}{2} \right), \text{ sustituyendo tendremos:}$$

$$\begin{aligned} \frac{k}{m R_0} \int_0^{T_E} R(t) dt &= \frac{k}{m R_0} R_0 T_E \left( \frac{(1-m)h + q + m}{2} \right) = \\ &= \frac{k T_E}{m} \left( \frac{(1-m)h + q + m}{2} \right) \end{aligned} \quad [10]$$

(Expresión que reservamos para más adelante).

La segunda parte (prescindiendo del signo, que recuperaremos después) tendrá la forma:

$$\frac{k}{T_E R(T_E)} \int_0^{T_E} t R(t) dt = \frac{k}{T_E R(T_E)} \left( \int_0^{hT_E} t R_1(t) dt + \int_{hT_E}^{T_E} t R_2(t) dt \right),$$

donde sustituyendo las funciones  $R_1(t)$  y  $R_2(t)$  y teniendo en cuenta que  $R(T_E) = m \times R_0$ :

$$\frac{k}{m T_E R_0} \int_0^{T_E} t R(t) dt = \frac{k}{m T_E R_0} \left( \int_0^{hT_E} \left( R_0 t + R_0 \frac{q-1}{hT_E} t^2 \right) dt + \int_{hT_E}^{T_E} \left( R_0 \frac{q-mh}{1-h} t - R_0 \frac{q-m}{T_E(1-h)} t^2 \right) dt \right),$$

que para

facilidad de cálculo separamos, a su vez en dos sumandos, de forma que el primero queda:

$$\begin{aligned} \int_0^{hT_E} \left( R_0 t + R_0 \frac{q-1}{hT_E} t^2 \right) dt &= R_0 \left[ \frac{t^2}{2} \right]_0^{hT_E} + R_0 \frac{q-1}{hT_E} \left[ \frac{t^3}{3} \right]_0^{hT_E} = \\ &= \int_0^{hT_E} \left( R_0 t + R_0 \frac{q-1}{hT_E} t^2 \right) dt = R_0 \frac{h^2 T_E^2}{2} + R_0 \frac{q-1}{3} \frac{h^3 T_E^3}{hT_E} = R_0 h^2 T_E^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{q-1}{3} \right) = \\ &= R_0 h^2 T_E^2 \left( \frac{2q+1}{6} \right) \end{aligned} \quad [11]$$

El segundo sumando, quedará de la forma:

$$\begin{aligned} \int_{hT_E}^{T_E} \left( R_0 \frac{q-mh}{1-h} t - R_0 \frac{q-m}{T_E(1-h)} t^2 \right) dt &= R_0 \frac{q-mh}{1-h} \left[ \frac{t^2}{2} \right]_{hT_E}^{T_E} - R_0 \frac{q-m}{T_E(1-h)} \left[ \frac{t^3}{3} \right]_{hT_E}^{T_E} = \\ &= \frac{R_0 (q-mh)}{2(1-h)} (T_E^2 - h^2 T_E^2) - \frac{R_0 (q-m)}{3T_E(1-h)} (T_E^3 - h^3 T_E^3) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{R_0(q-mh)}{2} T_E^2 (1+h) - \frac{R_0(q-m)}{3(1-h)} T_E^2 (1-h^3) = \\
&= \frac{R_0(q-mh)T_E^2(1+h)}{2} - \frac{R_0(q-m)T_E^2(h^2+h+1)}{3} = \\
&= R_0 T_E^2 \left( \frac{3(q-mh)(1+h) - 2(q-m)(h^2+h+1)}{6} \right) = \\
&= R_0 T_E^2 \left( \frac{3(q+qh-mh-mh^2) - 2(qh^2+qh+q-mh^2-mh-m)}{6} \right) = \\
&= R_0 T_E^2 \left( \frac{3q+3qh-3mh-3mh^2-2qh^2-2qh-2q+2mh^2+2mh+2m}{6} \right) = \\
&= R_0 T_E^2 \left( \frac{q+qh-mh-mh^2-2qh^2+2m}{6} \right) = \\
&= R_0 T_E^2 \left( \frac{-h^2(m+2q)+h(q-m)+2m+q}{6} \right) \tag{12}
\end{aligned}$$

Y sumando las dos expresiones calculadas [11] y [12], tenemos:

$$\begin{aligned}
&R_0 h^2 T_E^2 \left( \frac{2q+1}{6} \right) + R_0 T_E^2 \left( \frac{-h^2(m+2q)+h(q-m)+2m+q}{6} \right) = \\
&= R_0 T_E^2 \left( \frac{h^2(2q+1)}{6} + \frac{-h^2(m+2q)+h(q-m)+2m+q}{6} \right) = \\
&= R_0 T_E^2 \left( \frac{2qh^2+h^2-h^2m-2qh^2+hq-hm+2m+q}{6} \right) = \\
&= R_0 T_E^2 \left( \frac{h^2-h^2m+hq-hm+2m+q}{6} \right) = \\
&= R_0 T_E^2 \left( \frac{h^2(1-m)+h(q-m)+2m+q}{6} \right), \text{ por lo que resulta:}
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
-\frac{k}{mT_E R_0} \int_0^{T_E} t R(t) dt &= -\frac{k}{mT_E R_0} R_0 T_E^2 \left( \frac{h^2 (1-m) + h(q-m) + 2m + q}{6} \right) = \\
&= -\frac{kT_E}{m} \left( \frac{(1-m)h^2 + (q-m)h + q + 2m}{6} \right) \quad [13]
\end{aligned}$$

Y por fin, sumando las dos expresiones [10] y [13], resulta:

$$\begin{aligned}
\frac{kT_E}{m} \left( \frac{(1-m)h + q + m}{2} \right) - \frac{kT_E}{m} \left( \frac{(1-m)h^2 + (q-m)h + q + 2m}{6} \right) &= \\
\frac{kT_E}{m} \left( \frac{(1-m)h + q + m}{2} - \frac{(1-m)h^2 + (q-m)h + q + 2m}{6} \right) &= \\
\frac{kT_E}{m} \left( \frac{3h - 3mh + 3q + 3m - h^2 + mh^2 - qh + mh - q - 2m}{6} \right) &= \\
\frac{kT_E}{m} \left( \frac{(m-1)h^2 + (3-q-2m)h + 2q + m}{6} \right), &\text{ que es la expresión de la demora del} \\
\text{proyecto, es decir:} &
\end{aligned}$$

$$T_R - T_E = \frac{kT_E}{m} \left( \frac{(m-1)h^2 + (3-q-2m)h + 2q + m}{6} \right) \quad [14]$$

### II.2.3 Cálculo de la eficiencia perdida en el modelo MLRCD

Ya vimos que la eficiencia perdida era la diferencia entre las funciones  $R(t)$  y  $r(t)$ . Reproducimos a continuación la expresión del modelo general:

$$\begin{aligned}
\int_0^{T_E} J(t) dt &= \int_0^{T_E} R(t) dt - \int_0^{T_E} r(t) dt = \\
&= \int_0^{T_E} R(t) dt - \left( \int_0^{T_E} R(t) dt - \int_0^{T_E} k_t \times R(t) dt \right) = \int_0^{T_E} k_t \times R(t) dt, \quad \text{por otra parte esta}
\end{aligned}$$

eficiencia perdida debía ser compensada con la aportación del nivel de recursos del instante  $T_E$  durante la demora del proyecto  $T_R - T_E$ , es decir:

$\int_0^{T_E} J(t) dt = \int_0^{T_E} k_t R(t) dt = R(T_E)(T_R - T_E) = m R_0 (T_R - T_E)$ , por lo que la pérdida de eficiencia en este modelo vendrá dada por:

$$\int_0^{T_E} J(t) dt = m R_0 (T_R - T_E) = m R_0 \frac{k T_E}{m} \left( \frac{(m-1)h^2 + (3-q-2m)h + 2q+m}{6} \right) =$$

$$= k R_0 T_E \left( \frac{(m-1)h^2 + (3-q-2m)h + 2q+m}{6} \right), \text{ si tenemos en cuenta el valor de la constante característica, que viene dado por:}$$

$C = \frac{2 R_T}{R_0 T_E}$ , de donde:  $R_0 T_E = \frac{2 R_T}{C}$ , y sustituyendo en la expresión precedente:

$$\int_0^{T_E} J(t) dt = \frac{2 k R_T}{C} \left( \frac{(m-1)h^2 + (3-q-2m)h + 2q+m}{6} \right) \quad [15]$$

Que corresponde a la expresión anticipada en [VI-29].

#### II.2.4 Cálculo de los avances en el modelo MLRCD

Por definición, el avance de un proyecto viene a expresar la relación entre los recursos aplicados hasta ese instante y los recursos totales previstos. Otra definición alternativa está en considerar hitos fácilmente observables y compararlos con el proyecto en términos globales. Esta alternativa tiene una fácil transcripción a la primera, siempre que exista (y así debe ser) una correlación directa entre los hitos superados y los recursos eficaces aplicados.

En este modelo hemos contemplado varios tipos de avances, en función del punto temporal en que nos encontremos y de si estamos contemplando avances teóricos, estimados o reales. Consideraremos la siguiente tipología de avances:

- a) Avance teórico: Es un concepto que se fundamenta en aportaciones puramente teóricas, es decir, la relación entre los recursos teóricamente aplicados (eficiencia estándar) hasta el instante “ $t$ ” y la estimación realizada para los recursos totales, o sea, la expresión:

$$A_T = \frac{100 \int_0^t R(t) dt}{\frac{R_0 T_E}{2} [(1-m)h + q + m]} (\%), \text{ para: } (0 < t \leq T_E)$$

- b) Avance estimado: Es un concepto que, aunque también se fundamenta en aportaciones teóricas, está compensado el efecto relajación, por lo que presumiblemente se adaptarán más a la realidad. Este avance sería la relación entre los recursos teóricamente aplicados (eficiencia real) hasta el instante “ $t$ ” y la estimación realizada para los recursos totales, o sea, la expresión:

$$A_E = \frac{100 \int_0^t r(t) dt}{\frac{R_0 T_E}{2} [(1-m)h + q + m]} (\%), \text{ para: } (0 < t \leq T_E)$$

(Nótese que si existe efecto relajación, siempre se verificará  $A_T > A_E$ ).

- c) Avance real 1: Es un concepto que intenta acercarse más a la realidad, contemplando como recursos totales los que presumiblemente tendrá el proyecto si incurre en retraso, contemplando los recursos aplicados más allá del instante  $T_E$ . Este avance sería la relación entre los recursos teóricamente aplicados (eficiencia real) hasta el instante “ $t$ ” y la estimación realizada para los recursos totales incluyendo los correspondientes a la demora del proyecto, es decir, la expresión:

$$A_{RI} = \frac{100 \int_0^t r(t) dt}{m R_0 (T_R - T_E) + \int_0^{T_E} r(t) dt} (\%), \text{ para: } (0 < t \leq T_E)$$

Los avances analizados hasta aquí, tendrán dos expresiones diferentes, según se considere la evaluación en los subintervalos  $(0 < t \leq hT_E)$  o  $(hT_E < t \leq T_E)$ , ya que las funciones  $R(t)$  y  $r(t)$  tienen forma diferente en cada subintervalo.

- d) Avance real 2: Es un concepto complementario del anterior, que sería aplicable en el intervalo de demora del proyecto, contemplando los recursos aplicados más allá del instante  $T_E$ . Este avance sería la relación entre los recursos teóricamente aplicados (eficiencia real) hasta cualquier instante en el intervalo de demora y la estimación realizada para los recursos totales incluyendo los correspondientes a la demora del proyecto, es decir, la expresión:

$$A_{R2} = \frac{100 \left( \int_0^{T_E} r(t) dt + mR_0(t - T_E) \right)}{mR_0(T_R - T_E) + \int_0^{T_E} r(t) dt} (\%), \text{ para: } (T_E < t \leq T_R)$$

## **BIBLIOGRAFÍA**

Adlakha, V.G. y Kulkarni, V.G., (1989), "A classified bibliography of research on stochastic PERT networks: 1966-1987", *INFOR*, 27, 3, 272-296.

Agrawal, M.K. y otros (1996), "DAGEN: A generator of testsets for project activity nets", *European Journal of Operational Research*, 90, 376-382.

Babu, A.J.G. y Suresh, N., (1996), "Project management with time, cost, and quality considerations", *European Journal of Operational Research*, 88, 320-327.

Bartusch, M. y otros, (1986), "Scheduling project network with resource constraints and time windows", *Universitat Bonn Sonderforschungsbereich*, 303, *Discussion Paper: 86448-OR*, 1-45.

Berman, E.B., (1964), "Resource allocation in a PERT network under continuous activity time-cost functions", *Management Science*, 10, 4, 734-745.

Bigelow, C.G., (1962), "Bibliography on project planning and control by network analysis: 1959-1961", *Operational Research*, 10, 728-731.

Boctor, F.F., (1993), "Heuristics for scheduling projects with resource restrictions and several resource duration modes", *International Journal Production Research*, 31, 11, 2547-2558.

Boctor, F.F., (1996), "A new and efficient heuristic for scheduling projects with resource restrictions and multiple execution modes", *European Journal of Operational Research*, 90, 349-361.

Bolte, K.A., (1986), "Productivity in engineering disciplines", *National Productivity Review*, 5, 134-141.

Bravoco, R.R. y Yadav, S.B., (1985), "A methodology to model the functional structure of an Organization", *Computers in Industry*, 6, 345-361.

Britney, R.R., (1976), "Bayesian point estimation and the PERT scheduling of stochastic activities", *Management Science*, 22, 9, 938-948.

Brucker, P. (1995), "*Scheduling algorithms*", Ed. Springer. Berlin.

Burgess, A.R. y Killebrew, J.B., (1962), "Variation in activity level on a cyclical arrow diagram", *The Journal of Industrial Engineering*, XIII-2, 76-83.

Busby, J.S. y Willians, G.M., (1993), "The value and limitations of using process models to describe the manufacturing organizations", *International Journal of Production Research*, 31, 9, 2179-2194.

Clark, C.E., (1961), "The greatest of a finite set of random variables", *Operational Research*, 9, 145-162.

Clark, C.E., (1962), "The PERT model for the distribution of an activity time", *Operational Research*, 10, 405-406.

Clingen, C.T., (1963), "A modification of Fulkerson's PERT algorithm", *Operational Research*, 12, 629-632.

Chacko, G.K., (1976), "*PERT networks and even-sequencing*", applied operations research/systems analysis in hierarchical decision-making II. American Elsevier - North-Holland.

Chase, y Aquilano, "*Dirección y administración de la producción y de las operaciones*". Sexta edición española, Ed. Irwin. Barcelona.

Christofides, N. y otros (1987), "Project scheduling with resource constraints: A branch and bound approach", *European Journal of Operational Research*, 29, 262-273.

Davis, E.W., (1973), "Project scheduling under resource constraints: historical review and categorization of procedures", *AIIE Transactions*, 297-313.

Davis, E.W. y Heidorn, G.E., (1971), "An algorithm for optimal project scheduling under multiple resource constraints", *Management Science*, 17, 12, B803-B816.

De Wit, J. y Herroelen, W., (1990), "An evaluation of microcomputer-based software packages for project management", *European Journal of Operational Research*, 49, 102-139.

De, P. y otros, (1995), "The discrete time-cost tradeoff problem revisited", *European Journal of Operational Research*, 81, 225-238.

Deckro, R.F. y Hebert, J.E., (1990), "A multiple objective programming framework for tradeoffs in project schedulings", *Engineering Cost and Production Economics*, 18, 255-264.

Demeulemeester, E., (1994), "On a paper by Christofides et al. for solving the multiple-resource constrained, single project scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, 76, 218-228.

Demeulemeester, E. y Herroelen, W., (1992), "A branch and bound procedure for the multiple resource constrained project scheduling problem", *Management Science*, 38, 12, 1803-1818.

Demeulemeester, E. y Herroelen, W., (1996), "An efficient optimal solution procedure for the preemptive resource constrained project scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, 90, 334-348.

Demeulemeester, E. y otros, (1993), "A random activity network generator", *Operational Research*, 41, 5, 972-980.

Devroye, L.P., (1979), "Inequalities for the completion times of stochastic PERT networks", *Mathematics of operations research*, 4, 4, 441-447.

Dodin, B., (1985), "Bounding the project completion time distribution in PERT networks", *Operations Research*, 33, 4, 862-881.

Dodin, B. y Elimam, A.A., (1997), "Audit scheduling with overlapping activities and sequence-dependent setup costs", *European Journal of Operational Research*, 97, 22-33.

Donalson, W.A., (1964), "The estimation of the mean and variance of a PERT activity time", *Operational Research*, 13, 382-385.

Elmaghraby, S.E., (1967), "On the expected duration of PERT type networks", *Management Science*, 13, 5, 299-306.

Elmaghraby, S.E., (1989), "The estimation of some network parameters in the PERT model of activity networks: Review and critique", *Advances in Project Scheduling Part III, Chapter 1*, 371-432.

Eppinger, S.D. y otros, (1994), "A model-based method for organizing tasking product development", *Research in Engineering Design*, 6, 1-13.

Farnum, N.R. y Stanton, L.W., (1987), "Some results concerning the estimation of beta distribution parameters in PERT", *Journal of Operational Research Society*, 38, 3, 287-290.

Fisher, D.L. y otros, (1985), "Stochastic PERT networks: OP diagrams, critical paths and the project completion time", *Computers and Operational Research*, 12, 5, 471-482.

Fulkerson, D.R., (1962), "Expected critical path lengths in PERT networks", *Operational Research*, 10, 808-831.

Gallagher, C., (1987), "A note on PERT assumptions", *Management Science*, 33, 10, 1360-1360.

Giménez, L., (1993), "Teoría y psicología de las organizaciones", Ministerio para las Administraciones Públicas, V.1.

Golenko, D., (1989), "A new approach the activity-time distribution in PERT", *Journal of Operational Research Society*, 40, 4, 389-393.



Golenko, D. y Gonik, A., (1997), "Stochastic network project scheduling with non-consumable limited resources", *International Journal of Production Economics*, 48, 29-37.

Golenko, D. y otros, (1996), "Hierarchical decision-making model for planning and controlling stochastic projects", *International Journal of Production Economics*, 46, 39-54.

Graham, R.L., (1978), "Matemática combinatoria de la planificación", *Investigación y Ciencia*, 20, 76-85.

Grubbs, F.E., (1962), "Attempts to validate certain PERT statistics or "picking PERT"", *Operational Research*, 10, 6, 912-915.

Ha, A.Y. y Porteus, E.L., (1995), "Optimal timing of reviews in concurrent design for manufacturability", *Management Science*, 41, 9, 1431-1447.

Hagstrom, J.N., (1990), "Computing de probability distribution of project duration in a PERT network", *Networks*, 20, 231-244.

Hackman, S.T. y Leachman, R.C., (1989), "An aggregate model of project-oriented production", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 19, 2, 220-231.

Harhalakis, G., (1990), "Special features of precedence network charts", *European Journal of Operational Research*, 49, 50-59.

Herroelen, W. y Demeulemeester, E. , (1996), "Project management and scheduling", *European Journal of Operational Research*, 90, 197-199.

Hershauer, J.C. y Nabielsky, G., (1972), "Estimating activity times", *Journal of Systems Management*, 17-21.

Hughes, M.W., (1986), "Why projects fail: The effects of ignoring the obvious", *Industrial Engineering*, 4, 14-18.

Jones, R.E.; Jones, K.M. y Deckro, R.F., (1994), "Strategic decision processes in matrix organizations", *European Journal of Operational Research*, 78, 192-203.

Kamburowski, J., (1.985a), "An upper bound on the expected completion time of PERT networks", *European Journal of Operational Research*, 21, 206-212.

Kamburowski, J., (1.985b), "Normal distributed activity durations in PERT networks", *Journal of Operational Research Society*, 36, 11, 1051-1057.

Kelley, J.E. y Walker, M.R., (1959), "Critical path planning and scheduling", *Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference*, 15, 160-173.

Kerzner, H., (1989), "*Project management a systems approach to planning, Scheduling and Controlling*". V.N.R., 3ª Ed.

Kilduff, A. y otros, (1997), "Engineering identity in a japanese factory", *Organization Science*, 8, 6, 579-592.

King, W.R. y otros, (1967), "On the analysis of critical path time estimating behaviour", *Management Science*, 14, 1, 79-84.

King, W.R. y Wilson. T.A. , (1967), "Subjective time estimates in critical path planning. A preliminary analysis ", *Management Science*, 13, 5, 307-320.

Kleindorfer, G.B., (1971), "Bounding distributions for a stochastic acyclic network", *Operational Research*, 19, 1586-1601.

Klingel, A.R., (1966), "Bias in PERT project completion time calculations for a real network", *Management Science*, 13, 4, 476-489.

Koushik, H.V. y Hookerjee, V.S., (1995), "Modeling coordination in software construction: An analytical approach", *Information Systems Research*, 6, 3, 220-254.

Kumar, A. y Ganesh, L.S., (1998), "Use of petrinets for resource allocations in projects", *IEEE Transactions of Engineering Management*, 45, 1, 49-66.

Leachman, R.C., (1983), "Multiple resource leveling in construction systems through variation of activity intensities", *Naval Research Logistics Quarterly*, 30, 187-198.

Leachman, R.C. y otros, (1990), "Resource-constrained scheduling of project with variable-intensity activities", *IEEE Transactions*, 22, 1, 31-40.

Leachman, R.C., (1993), "A revised critical path method for networks including both overlap relationships and variable duration activities", *European Journal of Operational Research*, 64, 229-248.

Lerda-Olberg, S., (1966), "Bibliography on network-based project planning and control techniques: 1962-1965", *Operational Research*, 925-931.

Lewis, H.R. y Papadimitriou, C.H., (1978), "La eficiencia de los algoritmos", *Investigación y Ciencia*, 18, 78-91.

Lewis, J.P., (1995), "*Planificación, programación y control de proyectos*", Ediciones S. Barcelona.

Liberatore, M.J. y Titus, G.J., (1983), "The practice of management science in R&D project management", *Management Science*, 29, 8, 962-974.

Litoiu, M. y Tadei, R., (1997), "Real time task scheduling allowing fuzzy due dates", *European Journal of Operational Research*, 100, 475-481.

Littlefield, T.K. y Randolph, P.H., (1987), "Replay: An answer to Sasieni's question on PERT times", *Management Science*, 33, 10, 1357-1359.

Littlefield, T.K. y Randolph, P.H., (1991), "PERT durationtimes: Mathematics or MBO", *Interfaces*, 21, 6, 92-95.

Liu, L. Y Horowitz, E., (1989), "A Formal model for software project management", *IEEE Transactions on Software Engineering*, 15, 10, 1280-1293.

Loch, C.H. y Terwiesch, C., (1996), "Communications and uncertainty in concurrent engineering", *INSEAD, working paper*.

Luh, P.B. Y otros, (1999), "Scheduling of design projects with uncertain number of iterations", *European Journal of Operational Research*, 113, 575-592.

MacCrimmon, K.R. Y Ryavec, C.A., (1964), "An analytical study of the PERT assumptions", *Operational Research*, 12, 16-37.

Malcolm, D.G. y otros, (1959), "Application of a technique for research and development program evaluation", *Operational Research*, 7, (1959) 646-669.

Martí, R., (1993), "*Técnicas exactas y heurísticas en el diseño automático de redes de planificación de proyectos*", Tesis Doctoral del Departamento de Estadística e Investigación Operativa de la Universidad de Valencia.

Martin, J.J., (1965), "Distribution of the time through a directed, acyclic network", *Operational Research*, 13, 46-66.

McBride, W.J. y McClelland, (1967), "PERT and the beta distribution", *IEEE Transactions of Engineering Management*, 14, 4, 166-169.

Moeller, G.L. Y Digman, L.A., (1981), "Operations planning with VERT", *Operational Research*, 29, 4, 676-697.

Panagiotakopoulos, D., (1977), "A CPM time-cost computational algorithm for arbitrary activity cost functions", *INFOR*, 15, 2, 183-195.

Parkinson, C.N., (1962), "*Parkinson's law and other studies in administration*", Houghton Mifflin Company Boston, sentry edition.

Patterson, J.H., (1984), "A comparison of exact approaches for solving the multiple constrained resource, project scheduling problem", *Management Science*, 30, 7, 854-867.

Patterson, J.H. y otros, (1989), "An algorithm for a general class of precedence and resource constrained scheduling problems", *Advances in Project Scheduling (1989) Part I, Chapter 1*, 3-28.

Pocok, J.W., (1962), "PERT as an analytical aid for program planning: its payoff and problems", *Operational Research*, 10, 6, 893-903.

Pritsker, A.A.B. y Happ, W.W., (1966), "GERT: Graphical evaluation and review technique. Part I, fundamentals", *J. Industrial Engineering*, 17, 267-274.

Ross, D.T. y Schoman, K.E., (1977), "Structured analysis for requirements definition", *IEEE Transactions on Software Engineering*, 3, 1, 6-15.

- Sasieni, M.W., (1986), "A note on PERT times", *Management Science*, 32, 1652-1653.
- Schonberger, R.J., (1981), "Why projects are "always" late: a rationale based on manual simulation of a PERT/CPM network", *Interfaces*, 11, 5, 66-70.
- Sculli, D., (1983), "The completion time of PERT networks", *Journal of Operational Research Society*, 34, 2, 155-158.
- Shogan, A.W., (1977), "Bounding distributions for a stochastic PERT network", *Networks*, 7, 359-381.
- Shtub, A., (1997), "Project segmentation - a tool for project management-", *International Journal of Project Management*, 15, 1, 15-19.
- Speranza, M.G. y Vercellis, C., (1993), "Hierarchical models for multiproject planning and scheduling", *European Journal of Operational Research*, 64, 312-325.
- Steward, D.V., (1981a), "The design structure system: a method for managing the design of complex system", *IEEE Transactions of Engineering Management*, 28, 3, 71-74.
- Steward, D.V., (1981b), "*Systems analysis and management*", Petrocelli Books Inc., New York.
- Stinson, T., (1990), "Team work in real engineering", *Machine Design*, 22, 99-104.
- Talbot, F.B., (1982), "Resource-constrained project scheduling with time-resource trade-offs: the nonpreemptive case", *Management Science*, 28, 10, 1197-1210.
- Tavares, L.V., (1987), "Optimal resource profiles for program scheduling", *European Journal of Operational Research*, 29, 83-90.
- Tavares, L.V., (1994), "A stochastic model to control project duration and expenditure", *European Journal of Operational Research*, 78, 262-266.

Tavares, L.V. y otros, (1999), "The risk of delay of a project in terms of the morphology of its network", *European Journal of Operational Research*, 119, 510-537.

Terwiesch, C. y Loch, C.H., (1996), "The role of uncertainty reduction in concurrent engineering: an analytical model and empirical test", *INSEAD, working paper*.

Tsai, Y. y Gemmill, D.D., (1998), "Using tabu search to schedule activities of stochastic resource-constrained projects", *European Journal of Operational Research*, 11, 129-141.

Van Slyke, R.M., (1963), "Monte Carlo methods and the PERT problem", *Operational Research*, 11, 839-960.

Vercellis, C., (1994), "Constrained multi-project planning problems: A lagrangean decomposition approach", *European Journal of Operational Research*, 78, 267-275.

Wiest, J.D., (1967), "A heuristic model for scheduling large projects with limited resources", *Management Science*, 13, 6, B359-B377.

Wiest, J.D., (1981), "Precedence diagramming method: Some unusual characteristics and their implications for project managers", *Journal of Operational Management*, 1, 3, 121-130.

Williams, T. y otros, (1995) "The effects of design changes and delays on project costs", *Journal of Operational Research Society*, 46, 809-818.