

Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



Departamento de
Organización de
Empresas y C.I.M

Escuela de Ingenierías Industriales
Departamento de Organización de Empresas y C.I.M

TESIS DOCTORAL

Integración de la Incertidumbre y Riesgos en la Gestión y Control del Proyecto.

Presentada por
D. Fernando Acebes Senovilla
para optar al Grado de Doctor por la
Universidad De Valladolid

Codirigida por: Dr. Adolfo López Paredes y Dr. Javier Pajares Gutiérrez

Valladolid, Junio 2015

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis directores de tesis, Adolfo López Paredes y Javier Pajares, todo el tiempo dedicado para la consecución de este gratificante trabajo. Sin ellos no hubiera sido posible llevarlo a cabo. Han conseguido que pueda disfrutar en el campo de la investigación y me han dado la oportunidad de conocer a otros académicos y profesionales relacionados con la misma.

Gracias al profesor José Manuel Galán por su visión y aportaciones a este trabajo, siempre muy interesantes.

Gracias a Cristina que me animó desde el principio a embarcarme en este proyecto tan enriquecedor.

A Elena y Raquel,
por ser la energía de mi vida

Índice

Índice	I
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes y motivación	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Estructura del documento	4
1.4 El Grupo INSISOC	7
1.4.1 Simulación Computacional	9
1.4.2 Redes Complejas	10
1.4.3 Data-Driven Research	10
1.4.4 Dirección de Proyectos	10
1.4.5 Proyectos de Investigación	11
2 Gestión de Proyectos	15
2.1 Evolución histórica de la Dirección de Proyectos	15
2.2 Enfoques en Dirección de Proyectos	21
2.2.1 Prince2	21
2.2.2 ITIL	22
2.2.3 ICB / IPMA	23
2.2.4 ISO 21500	23
2.2.5 PMBoK / PMI	24
2.2.5.1 Grupos de Procesos	25
2.2.5.2 Áreas de Conocimiento	27
2.2.5.3 Gestión del Tiempo del Proyecto	29
2.2.5.4 Gestión del Coste del Proyecto	31
3 Gestión de Riesgos del Proyecto	37
3.1 De la Gestión de Riesgos a la Gestión de la Incertidumbre	38
3.1.1 Definición de Riesgo	38
3.1.2 Concepto de incertidumbre	42
3.1.3 Del concepto de Riesgo al concepto de Incertidumbre	47
3.1.4 Fuentes de Riesgo. Causas de Incertidumbre	49
3.1.5 Categorías de Riesgo	59

3.1.6 Herramientas para la gestión del Riesgo.....	61
3.2 Escuelas de Gestión de Riesgos.....	62
3.3 Metodologías de Gestión de Riesgos.....	65
3.4 Comparación de distintas metodologías de Gestión de Riesgos.....	73
3.5 Complejidad del Proyecto.....	77
3.6 Conclusiones.....	83
4 Control de Proyectos. Integración de la Incertidumbre.....	89
4.1 Metodología de Valor Ganado.....	90
4.1.1 Introducción.....	90
4.1.2 Metodología del Valor Ganado.....	92
4.1.3 EVM. Parámetros característicos.....	93
4.1.4 EVM. Índices de rendimiento.....	95
4.1.5 EVM. Estimación de la duración del Proyecto.....	96
4.1.6 EVM. Earned Schedule (ES).....	97
4.1.7 EVM. Debilidades del Valor Ganado.....	99
4.2 Integración de la incertidumbre en el seguimiento y control de proyectos SCoI / CCoI.....	103
4.3 Estudio de la robustez de los índices de control.....	112
4.3.1 Ejecución de proyecto según planificación.....	120
4.3.2 Ejecuciones del proyecto en adelanto.....	121
4.3.2.1 Adelanto Mantenido.....	121
4.3.2.2 Adelanto Perdido.....	123
4.3.2.3 Adelanto Retraso.....	124
4.3.3 Ejecuciones del proyecto en retraso.....	125
4.3.3.1 Retraso Mantenido.....	126
4.3.3.2 Retraso Ganado.....	127
4.3.3.3 Retraso Adelanto.....	128
4.4 Modificaciones al marco gráfico de control.....	132
4.4.1 Modificación de los índices de control.....	134
4.4.2 Sensibilidad a los límites de control.....	137
5 Estudio de la Incertidumbre en los Proyectos.....	145
5.1 Incertidumbre Estacional.....	146
5.1.1 Introducción. Sensibilidad de las actividades.....	146
5.1.2 Incertidumbre Estacional.....	148
5.1.3 Integración de la Incertidumbre del Proyecto y del Riesgo Estacional.....	153
5.1.4 Análisis de sensibilidad.....	160
5.2 Sensibilidad de la Duración del Proyecto.....	170

5.2.1 Duración esperada del proyecto en función de la duración esperada de las actividades	174
5.2.2 Variabilidad de la duración del proyecto en función de la duración esperada de las actividades	178
5.2.3 Duración esperada del proyecto en función de la variabilidad de la duración de las actividades	181
5.2.4 Variabilidad de la duración del proyecto en función de la variabilidad de la duración de las actividades.....	183
5.3 Sensibilidad del Coste del Proyecto.....	185
5.3.1 Sensibilidad de los parámetros de coste del proyecto en función de la duración esperada de las actividades.....	188
5.3.2 Sensibilidad de los parámetros de coste del proyecto en función de la variabilidad de las actividades	189
6 Control estadístico de los Proyectos	195
6.1 Percentiles de coste del proyecto	195
6.2 Metodología Triad (x,t,c)	212
6.3 Ejemplos de aplicación.....	221
6.4 Comparación de metodologías de seguimiento y control de proyectos con incertidumbre	227
6.4.1 Proyecto ejecutado según su planificación.....	230
6.4.2 Proyecto ejecutado con retraso respecto de su planificación	232
6.4.3 Proyecto que comienza con retraso y finaliza según planificación.....	235
6.4.4 Proyecto que comienza con adelanto respecto de su planificación y que finaliza con retraso	238
7 Conclusiones.....	247
7.1 Extensiones y líneas futuras.....	252
Bibliografía.....	255
Índice de Figuras.....	275
Índice de Tablas	281
Índice de Ecuaciones	283
Anexo: Publicaciones.....	291



1

Introducción



1 Introducción

1.1 Antecedentes y motivación

Un gran porcentaje de las actividades que generan valor para las compañías son nuevos proyectos y como tal, si son proyectos, tiene lógica aplicar todo lo que sabemos sobre buenas prácticas en Dirección de Proyectos, así como metodologías y herramientas específicas para ello. Así pues, dado que todos estos proyectos van a contribuir a generar nuevo valor económico para la compañía, como dice el Profesor Pajares en sus conferencias, “*el éxito de una empresa es, en gran medida, el éxito de sus proyectos*”. Para superar los retos de la crisis económica mundial, algunas organizaciones modernas se han visto en la necesidad de obtener más y mejores resultados con menos recursos. Al mismo tiempo, la búsqueda de nuevos mercados ha llevado a las organizaciones tradicionales a salir de su “zona de confort” y exportar sus casos de éxito a otros países.

Según un informe de PwC titulado “*Global Project Management Report 2012*”, el 65% de los entrevistados reportaron participación en proyectos de alcance nacional e internacional, lo que refleja la importancia de la colaboración más allá de las fronteras geográficas y departamentales.

Además, en el mismo informe, se añade que durante el periodo 2000-2020, más del 25% del valor económico será generado a través de proyectos. Esto significa que tendremos mucho dinero involucrado que se manejará por proyectos.

Sin embargo, según el informe del Project Management Institute “*PMI’s 2012 Pulse of the Profession*”, en organizaciones con poca o ninguna cultura de Dirección de Proyectos, el 64% de los proyectos no alcanzaron las metas y objetivos de negocio que se plantearon.

Otros informes de Institutos de investigación, como el del Servicio de Estudios del Deutsche Bank, indican que la economía basada en proyectos se multiplicará por 7 en el período 2010-2020.

Como consecuencia de lo anterior, las organizaciones han comenzado a prestar atención a la correcta identificación de beneficios, definición del alcance y gestión de los riesgos de sus proyectos. Según el informe *Closing the Gap: The Link between project management excellence and long-term success, the Economist Intelligence Unit*, el 90% de los Altos Directivos entrevistados identificaron la Dirección de Proyectos como una habilidad crítica o muy importante para su capacidad de completar exitosamente los proyectos y seguir siendo competitivos.

Otro informe que puede alertarnos sobre la situación actual es el informe *Chaos* realizado por Standish Group con la finalidad de medir el éxito y fracaso de los proyectos IT, muestra que solo un 39% de estos proyectos finalizaron con éxito, mientras que el 43% lo hicieron con deficiencias (retraso, sobrecoste y/o menos requisitos de los esperados) y el 18% restante se cancelaron o dieron lugar a un producto que nunca se utilizó.

Con las perspectivas de futuro que pronostican los informes, está clara la importancia creciente que está adquiriendo la gestión de los proyectos en las empresas y más concretamente en la gestión de los riesgos que pueden impactar en los objetivos del proyecto. Por tanto, se deben buscar todas y cada una de las incertidumbres que afectan al proyecto para dar un tratamiento adecuado que pueda reconducir el proyecto hacia los objetivos fijados.

Para ello, el director de proyecto y su equipo dispondrán de herramientas específicas para el control de gestión del Proyecto que deberán utilizar convenientemente en cada una de las etapas del ciclo de vida del Proyecto.

En organizaciones de cualquier tipo y tamaño, cada vez es más común organizar las tareas como proyectos. La organización de las tareas como proyectos y el establecimiento de sistemas con el propósito de controlar el desempeño de las actividades relacionadas con el programa, el costo y la calidad, han ganado importancia para la consecución de los objetivos de la organización. Por ello, el desarrollo de sistemas de control eficaces se convierte en un aspecto

crucial en la organización, para garantizar el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

Este proceso de control de proyectos tiene como fin minimizar las desviaciones de los planes del proyecto y consiste en determinar el estado del proyecto, comparándolo con la planificación establecida, analizando las desviaciones e implementando las acciones correctivas apropiadas. Un sistema de control de proyectos muy conocido y ampliamente utilizado es la metodología del Valor Ganado (EVM).

La metodología del Valor Ganado se ha hecho muy popular dentro del ámbito de la Dirección de Proyectos, sin embargo, presenta ciertas limitaciones. Pajares & López-Paredes (2011) indican que la debilidad más importante que presenta esta metodología es la falta de consideración de la incertidumbre que presentan las actividades que conforman el proyecto. La metodología del Valor Ganado no tiene en cuenta el análisis de riesgo de los proyectos ni su variabilidad.

Por eso, proponen dos nuevos índices de control: el *Schedule Control Index* (SCol) y el *Cost Control Index* (CCol) con los que tratan de solventar el problema citado.

Otros autores, como Vanhoucke (2012), intentan dar solución de igual modo al problema, sin llegar a un resultado definitivo.

El fin último es integrar la variabilidad inherente a las actividades en el control del plazo y del coste del proyecto.

Dado que la metodología del Valor Ganado es una metodología ampliamente utilizada por académicos y profesionales, se avanza en la dirección de integrar esta metodología en el control del proyecto en un entorno con incertidumbre.

1.2 Objetivo

El objetivo de esta investigación es proponer indicadores de control de gestión que integren los aspectos económicos y los riesgos en su dimensión de incertidumbre.

Así mismo, realizar un estudio sobre la incertidumbre del proyecto relacionado con los indicadores utilizados para la priorización de las actividades bajo diversas hipótesis.

Para conseguir los objetivos formulados proponemos los siguientes apartados que conforman el **alcance**:

- Implementar un marco gráfico de control para realizar el seguimiento y control del proyecto, que integre la representación de los indicadores SCoI y CCoI.
- Estudiar detalladamente los indicadores SCoI y CCoI. Validar y verificar la robustez de dicha metodología.
- Desarrollar una nueva metodología de seguimiento y control de proyectos en entorno de incertidumbre, que denominaremos Metodología Triad.
- Comparar las distintas metodologías de control de proyectos (EVM, SCoI/CCoI, Triad).
- Estudiar y modelar la línea base de riesgos. Observar el impacto sobre la línea base de riesgos en función de la fecha de inicio del proyecto.
- Estudiar los indicadores de programación para la priorización de actividades del proyecto (criticidad, crucialidad, índice de sensibilidad) en función de fecha de inicio del proyecto, en presencia de incertidumbre estacional.
- Estudiar los efectos que la criticidad y crucialidad tienen al realizar modificaciones en los parámetros de las actividades del proyecto.
- Estudiar indicadores de coste para la priorización de actividades del proyecto.

1.3 Estructura del documento

El trabajo realizado en esta tesis doctoral se presenta en siete capítulos, incluido el presente capítulo introductorio así como las conclusiones.

El **capítulo 2** realiza un breve recorrido bibliográfico sobre la historia de la Dirección de Proyectos en artículos publicados. Se analizan las tendencias en las investigaciones sobre la materia así como los sectores en los que más importancia se ha dado a la Dirección de Proyectos. En otro punto se describen algunos de los estándares en Dirección de Proyectos más reconocidos. Hacemos especial hincapié en los Grupos de Procesos y Áreas de Conocimiento de la Guía propuesta por el *Project Management Institute*.

En el **capítulo 3** revisamos parte de la bibliografía reciente sobre Gestión de Riesgos del Proyecto. El capítulo trascurre desde el concepto más tradicional de riesgo para finalizar en el concepto de incertidumbre. Por otra parte se exponen los distintos modos de entender la gestión de riesgos por parte de los

investigadores y también se describen las distintas metodologías utilizadas para la gestión de los riesgos. El capítulo finaliza con un estudio de la complejidad en los proyectos. La complejidad surge de la estructura del proyecto y de la forma en que se interrelacionan sus elementos. Es difícil observar cómo las variaciones en las variables del proyecto pueden afectar al resultado final del mismo, debido al número de interconexiones e interdependencias que existen entre los elementos que lo componen. El comportamiento de los proyectos complejos es a menudo ambiguo, lo que significa que los proyectos complejos son siempre arriesgados.

El grado de incertidumbre, la complejidad del proyecto y el impacto son tres variables interrelacionadas que afectan la capacidad general de tratar con riesgo. La comprensión de estas variables es importante para la selección de un método apropiado de gestión del riesgo, y para involucrar a las personas adecuadas y a las organizaciones necesarias para hacer frente eficazmente a una situación de riesgo específico.

El **capítulo 4** comienza con una breve explicación sobre la metodología del Valor Ganado, utilizada para el seguimiento y control de proyectos. A continuación exponemos la metodología SCoI/CCoI, que integra la incertidumbre presente en las actividades. Por una parte se utilizan los indicadores SCoI y CCoI para su validación y contrastación, y se proporciona un marco gráfico donde poder integrar estos indicadores. Con la implementación de los índices de control y su incorporación posterior dentro del marco gráfico, logramos identificar las oscilaciones del proyecto respecto de la planificación inicial y además conseguimos estimar la magnitud de dicha variación, determinando si se exceden los límites de control que fije de antemano el director de proyecto.

Paralelamente a la línea de investigación de la integración de la incertidumbre en el control del plazo y del coste del proyecto, se realiza un estudio de la incertidumbre en los proyectos.

El **capítulo 5** comienza con un análisis de la influencia que puede tener una incertidumbre que denominamos “estacional” sobre la ejecución del proyecto, es decir, que se presenta aleatoriamente en ciertas épocas del año y que, además, afecta únicamente a algunas de las actividades que componen el proyecto. Se

discute cómo el riesgo del proyecto puede verse afectado por tal incertidumbre, dependiendo de la fecha de inicio del proyecto.

En nuestro caso, aplicando simulación de Monte Carlo, estudiaremos el riesgo total del proyecto en función de la fecha de comienzo del mismo, considerando tanto la incertidumbre propia de las actividades así como la presencia de la incertidumbre “estacional”.

Por otra parte, realizamos un análisis de sensibilidad sobre la duración de las actividades del proyecto.

Analizamos la variación que sufren los parámetros de duración total del proyecto (duración esperada media y varianza) así como los indicadores Criticidad y Crucialidad, cuando se modifican los parámetros de cada una de las actividades que forman el proyecto. En todos estos apartados hemos utilizado simulación de Monte Carlo que nos permite crear modelos de simulados de proyectos para obtener como resultado una distribución de probabilidad de la duración total del proyecto a partir de las duraciones de las actividades, que han sido previamente modeladas mediante funciones de distribución de probabilidad.

El capítulo finaliza con un análisis de sensibilidad sobre el coste del proyecto. Para ello proponemos unos nuevos indicadores que nos permitirán realizar este análisis y, a la vez, tendremos más herramientas para priorizar en importancia las actividades del proyecto en cuanto a su contribución en coste al mismo.

En el **capítulo 6** la investigación avanza hacia el desarrollo de una nueva metodología, que denominaremos “Triad”, para el control estadístico del proyecto en entornos con incertidumbre, representando para cada periodo de tiempo, los distintos percentiles en los que puede oscilar el proyecto, teniendo en cuenta la incertidumbre de las actividades que lo componen. El control estadístico de los procesos se basa en observaciones periódicas de una medida durante la ejecución del proyecto que se representan junto con un límite superior de control y un límite inferior de control. En nuestro estudio representaremos la evolución del proyecto integrado en las curvas percentiles obtenidas utilizando simulación de Monte Carlo.

Durante el progreso de la investigación hemos constatado la naturaleza optimista de la metodología PERT. Con los resultados obtenidos, se ha

subrayado lo que la literatura de investigación de operaciones y en la Gestión de Proyectos ya se había demostrado muchas veces, como por ejemplo en Klingel (1966), MacCrimmon & Ryavec (1964) y Schonberger (1981). Igualmente, Mummolo (1994) trató de solucionar este problema desarrollando una nueva técnica que denominó *Pert-Path Network Technique* (PPNT) y que utilizó para la planificación y control de las actividades del proyecto.

Concluimos el capítulo realizando una comparativa entre tres metodologías de seguimiento y control de proyectos. Por un lado la metodología EVM, frente a las metodologías SCoI/CCoI y a la metodología Triad. Será esta última metodología la que nos proporcionará los resultados más precisos, completos y valiosos respecto de las otras dos.

En el **capítulo 7** se exponen las conclusiones finales de nuestra investigación, acompañadas de las posibles líneas futuras de investigación.

Con esta investigación proponemos facilitar al Director de Proyecto la tarea de monitorizar y controlar aquellos proyectos que transcurran en entornos con incertidumbre previamente modelada.

1.4 El Grupo INSISOC

Esta tesis se enmarca en el contexto de las líneas de investigación y los proyectos del grupo INSISOC, y las tesis doctorales desarrolladas anteriormente.

*INSISOC*¹ (*IN*geniería de los *SI*stemas *SOC*iales) es un Grupo de Investigación de Excelencia de la Junta de Castilla y León compuesto por investigadores de la Universidad de Valladolid y de la Universidad de Burgos. Su objetivo es promocionar la investigación y el modelado del comportamiento de los sistemas sociales complejos desde la conducta de los agentes que lo componen, explorar y desarrollar metodologías en el campo del pensamiento sistémico y construir herramientas que faciliten su aplicación al estudio de los problemas complejos.

INSISOC surge como resultado del trabajo desempeñado por el profesor Dr. Cesáreo Hernández dirigiendo la tesis doctoral “*Análisis e Ingeniería de las*

¹ <http://www.insisoc.org>

Instituciones Económicas. Una metodología basada en agentes”, realizada por el Dr. Adolfo López-Paredes (López-Paredes, 2001) . Se considera como hito inicial del grupo la presentación del artículo “*The Social Dimension of Economics and Multiagent Systems*” por el Dr. López-Paredes y el Dr. del Olmo (López-Paredes & del Olmo, 1998).

El apoyo y asistencia de los profesores del *Centre for Policy Modelling* de la *Manchester Metropolitan University*, y, en particular, de su director, el profesor Scott Moss, fueron claves en los primeros pasos de INSISOC. Los resultados del grupo dirigido por el profesor Hernández se materializaron en las primeras tesis doctorales en nuestro país que incluyen el modelado basado en agentes en las ciencias sociales en general, y en la ciencia económica en particular, como una tercera vía en la investigación científica: López-Paredes (2001), Pajares (2001), Pascual (2006), Posada (2005b).

El grupo INSISOC fue pionero en la publicación de los primeros manuales sobre modelado basado en agentes escritos en español. Entre ellos destaca el libro “*Ingeniería de Sistemas Sociales. Diseño, Modelado y Simulación de Sociedades Artificiales de Agentes*” (López-Paredes, 2004), del que toma el nombre del grupo de investigación. Otros volúmenes publicados en castellano que han contribuido a la difusión de las actividades del grupo y a la internacionalización de sus actividades han sido: López-Paredes (2001), Aguilera Ontiveros & López-Paredes (2001), Aguilera Ontiveros (2002), Aguilera Ontiveros & López-Paredes (2004), López-Paredes & Hernández (2008), en el que se recogen trabajos diversos que van desde la metodología general de modelado basado en agentes a aplicaciones en la gestión de recursos naturales en los más diversos ámbitos.

En la Figura 1-1 se muestran las principales líneas de investigación en INSISOC, y se sitúa en ellas dónde se ubica el trabajo realizado en esta tesis.

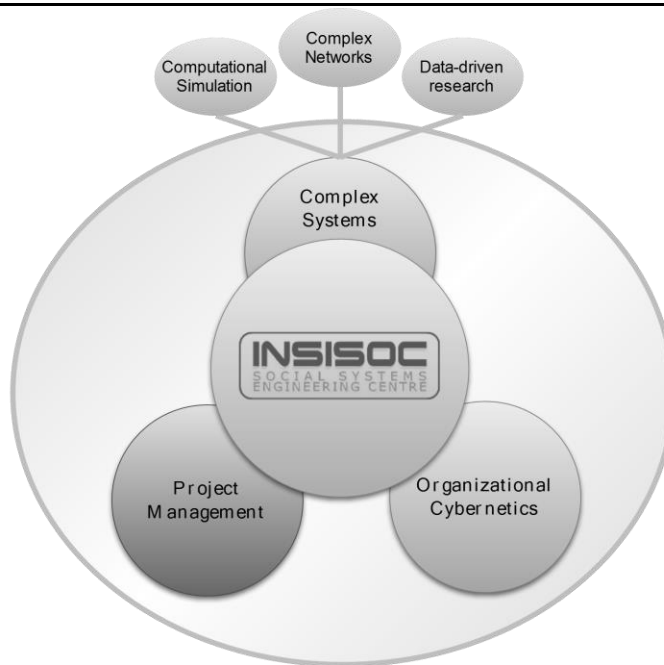


Figura 1-1 Líneas de investigación del grupo INSISOC.

1.4.1 Simulación Computacional

Se ha empleado simulación computacional en diversos campos, tales como la teoría de juegos y la evolución de la cooperación (Galán & Izquierdo, 2005; Galán, López-Paredes, & del Olmo, 2005; L. R. Izquierdo & Izquierdo, 2008; S. S. Izquierdo, Izquierdo, Galán, & Hernández, 2006; S. S. Izquierdo, Izquierdo, & Gotts, 2008; S. S. Izquierdo & Izquierdo, 2007, 2011; Pascual et al., 2009; Poza, Galán, Santos, & López-Paredes, 2010; Poza, Villafáñez, & Pajares, 2009); el estudio de los mercados artificiales (Hernández, López-Paredes, Pajares, & Posada, 2008; Lavios, Galán, Santos, & del Olmo, 2006; López-Paredes & Hernández, 2008; Pajares, Pascual, Hernández, & López-Paredes, 2003; Pascual, López-Paredes, Pajares, & Hernández, 2003; Pascual, Pajares, & López-Paredes, 2006; Pascual & Pajares, 2007); imperfecciones de mercado (S. S. Izquierdo & Izquierdo, 2006, 2007)(S. S. Izquierdo et al., 2006; S. S. Izquierdo & Izquierdo, 2007). Dentro del ámbito económico, se procedió al estudio del comportamiento y la reproducción de agentes artificiales en los mercados regulados mediante subastas (Fuentes-Fernández, Galán, Hassan, & Villafáñez, 2011; Lavios, del Olmo, Araúzo, & Galán, 2010b; Posada, Hernández, & López-Paredes, 2004, 2006, 2007, 2008; Posada & López-Paredes, 2008; Posada, 2005a, 2006; Villafáñez & Poza, 2010); la caracterización de los problemas de negociación

bilateral (Hernández & López-Paredes, 1999; López-Paredes, Hernández, & Pajares, 2002; López-Paredes, 2001) y la caracterización de comportamientos en dinámica industrial (López-Paredes & Hernández, 2008; Pajares, Hernández, & López-Paredes, 2004; Pajares, López-Paredes, & Hernández, 2003).

1.4.2 Redes Complejas

Algunas publicaciones destacadas son las siguientes: Galán, Latek, & Rizi, (2011); S. S. Izquierdo & Izquierdo (2007); McAllister, Izquierdo, Janssen, & Stafford Smith (2009); Poza et al. (2010); Poza, Santos, Galán, & López-Paredes (2011); Santos, del Olmo, & Pajares (2005, 2007); Santos, Galán, & del Olmo (2006); Santos, Poza, Galán, & López-Paredes (2012); Ruiz-Martin, Ramirez-Ferrero, Gonzalez-Alvarez, & López-Paredes (2015).

1.4.3 Data-Driven Research

Con la tesis del Dr. Galán (Galán, 2007), el grupo INSISOC comenzó a aplicar el modelado basado en agentes a la gestión de recursos naturales, concretamente para tratar la complejidad de los de los múltiples factores que influyen en la gestión del agua doméstica en zonas metropolitanas emergentes. Posteriores trabajos en esta línea de investigación son: Fuentes-Fernández et al. (2011); Galán, del Olmo, & López-paredes (2008); Galán, López-Paredes, & del Olmo (2009); Galán (2007); L. R. Izquierdo, Galán, Santos, & del Olmo (2008); L. R. Izquierdo, Izquierdo, Galán, & Santos (2009).

1.4.4 Dirección de Proyectos

La investigación del grupo INSISOC en el campo de la Dirección de Proyectos o Project Management se centra en el desarrollo de nuevas metodologías y técnicas para monitorizar y evaluar el desempeño en las Organizaciones Orientadas a Proyectos. En particular en campos como:

- *Business Administration. Value. Stakeholders. Governance. Project Management Office.*
- *Portfolio and Program Management. Control and monitoring. Program Management Office. Multiproject Management.*
- *Risk Management.*
- *Training and education in Project Management.*

Algunas publicaciones destacadas del Grupo en estos campos son las siguientes: Acebes, Pajares, Galán, & López-Paredes (2014a); Araúzo, de Benito, Sanz Angulo, & del Olmo (2006); Araúzo, Galán, Pajares, & López-Paredes (2009); Araúzo, López-Paredes, & Pajares (2010); Araúzo, Pajares, & López-

Paredes (2010); Galán et al. (2007); Lavios, del Olmo, Araúzo, & Galán (2010a); Lavios et al. (2010b); López-Paredes, Pajares, & Galán (2010); Pajares & López-Paredes (2011).

1.4.5 Proyectos de Investigación

En la Figura 1-2 se muestran los proyectos en los que ha participado y participa en la actualidad el grupo INSISOC. Esta investigación ha sido financiada con el proyecto “Herramientas Basadas en Agentes para el Modelado y Simulación de Sistemas Sociales Complejos”, por la Junta de Castilla y León, mediante el proyecto "Métodos Computacionales para la Gestión de Entornos Multiproyecto"; así como el proyecto “Computational Models for Strategic Project Portfolio Management”.

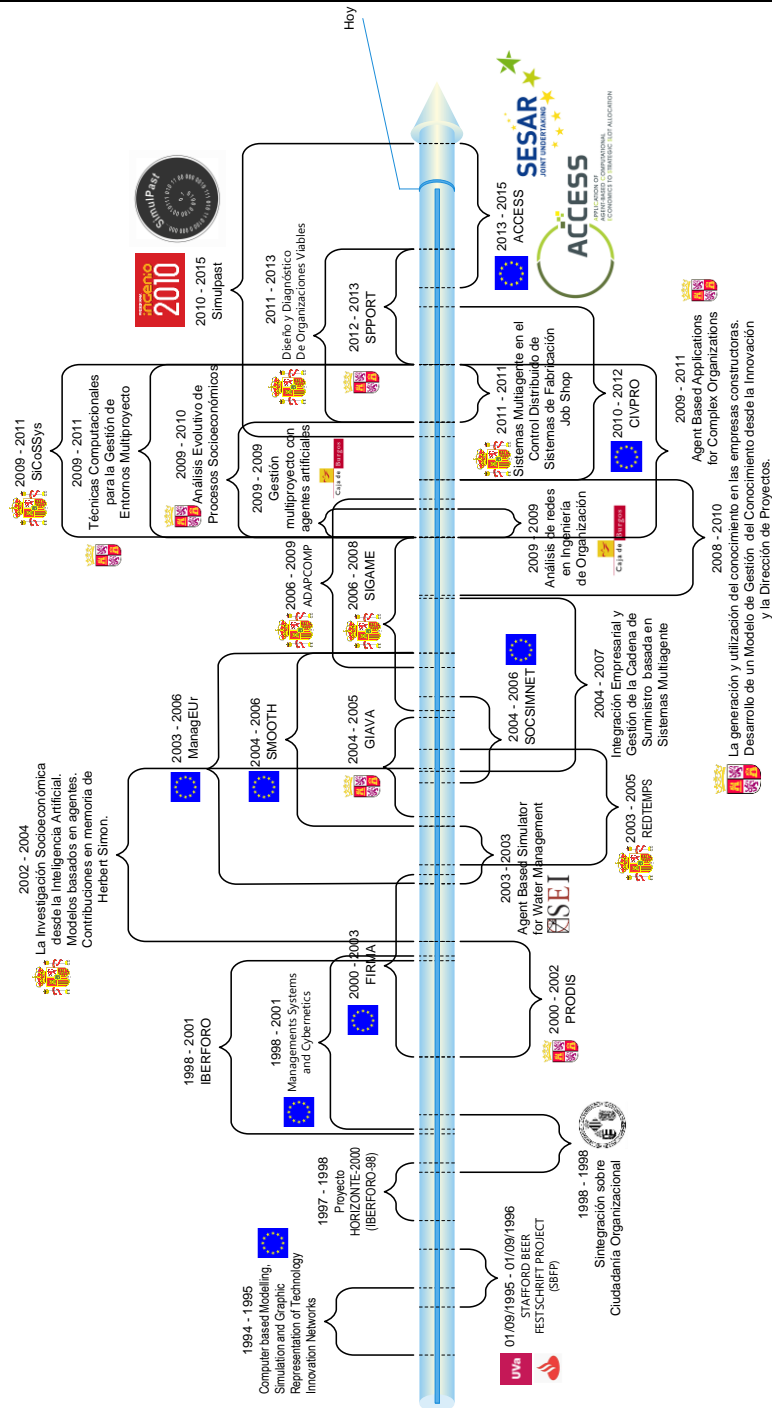


Figura 1-2 Proyectos en los que ha participado y participa en la actualidad el grupo INSISOC. Adaptado de (Galán Ordax, 2007).



2

Gestión de Proyectos



2 Gestión de Proyectos

El objetivo de este capítulo es realizar una breve introducción a la Gestión de Proyectos, comenzando con un recorrido bibliográfico acerca de las investigaciones llevadas a cabo sobre la materia. Se pretende analizar la importancia que se ha prestado a la Dirección de Proyectos a lo largo de los últimos años, así como la tendencia de los estudios analizados.

En la segunda parte del capítulo analizamos los enfoques más reconocidos sobre Dirección de Proyectos, sin detenernos en exceso en ellos. Centramos el foco de atención en el proceso de gestión propuesto por el *Project Management Institute* (PMBok). Esta metodología de Gestión de Proyectos es ampliamente utilizada por investigadores, empresas, académicos y usuarios, llegando a convertirse en estándar internacional. Por este motivo se describen los Grupos de Procesos que identifica esta guía para la gestión de proyectos así como también se relacionan las Áreas de Conocimiento donde se aplican metodologías y herramientas que tratan de organizar y orientar las actividades del proyecto.

En este capítulo incidimos en la Gestión del Tiempo y Gestión del Coste del proyecto por ser estas, junto con la Gestión del Riesgo del Proyecto, las áreas en las que centramos nuestra investigación.

2.1 Evolución histórica de la Dirección de Proyectos

Algunos autores establecen que la Gestión de Proyectos actual surgió durante la Segunda Guerra Mundial, cuando se dedicó a los grandes proyectos militares y de construcción. Otros, sin embargo, lo asocian al desarrollo del misil Polaris, en los años 60. A partir de este contexto, la Gestión de Proyectos ha crecido y se ha extendido por todo el mundo, se ha formalizado y estructurado, para convertirse en un conjunto de principios, metodologías y prácticas, tal como lo conocemos hoy en día.

Dentro de la bibliografía específica sobre Dirección de Proyectos se observa que existen muchos estudios con el objetivo de identificar las tendencias en las publicaciones e investigaciones sobre la materia.

Las investigaciones en Dirección de Proyectos han desempeñado un papel importante en el crecimiento previo de la profesión y debería tener un rol significativo en el crecimiento futuro.

Kloppenborg & Opder (2002) investigaron la incidencia del término Gestión de Proyectos en artículos, revistas, tesis doctorales y estudios gubernamentales, desde 1960. Los autores observan que la Dirección de Proyectos está siendo usada como una clave estratégica de cambio en las empresas. Por tal motivo, es reconocido por las organizaciones, gobernantes, corporaciones e instituciones académicas, que la profesión está teniendo un enorme crecimiento en todo el mundo.

La conclusión de esta investigación fue que el interés en la Gestión de Proyectos ha pasado del desarrollo y uso de software y de herramientas para la gestión del proyecto, a los aspectos humanos de gestión.

En otra investigación posterior, llevada a cabo por Crawford, Pollack, & England (2006), identifican las tendencias en la Gestión de Proyectos y centran la investigación analizando artículos de dos revistas especializadas durante el período entre 1994 y 2003: *IJPM (International Journal of Project Management)* y *PMJ (Project Management Journal)*. Este trabajo ha identificado la reducción de publicaciones sobre los problemas interpersonales y de gestión de calidad en los proyectos, prestándose una mayor atención a cuestiones tales como la evaluación, optimización y alineamiento estratégico de los proyectos.

El campo de la Gestión de Proyectos, como una profesión y área de investigación, continúa creciendo y desarrollándose en respuesta a los cambios de interés de gestión en la sociedad y a las exigencias de las nuevas áreas de aplicación. Las demandas en este campo siguen cambiando, en respuesta a nuevos modelos de gestión que se aplican en las industrias, en distintos países y en nuevos ámbitos de aplicación. Estos cambios alteran la forma en la que se percibe la gestión del proyecto, modificando las opiniones comúnmente aceptadas de lo que es la práctica de la Gestión de Proyectos, y por tanto, la

forma en que el campo se representa en la literatura, utilizando enfoques diferentes, encontrando resultados y aplicaciones diversas y a veces contradictorias.

Es difícil establecer una conclusión sobre la distribución por tamaño de proyecto o sobre sectores industriales. Después de una revisión bibliográfica, la influencia de los distintos sectores industriales es identificada por Evaristo & van Fenema (1999), quienes afirman que el conocimiento actual basado en la Dirección de Proyectos emerge de los grandes proyectos de construcción. Este tipo de proyectos representa únicamente el 10% del total de los proyectos. Por otra parte, Betts & Lansley (1995) también encontraron que el sector abordado con mayor frecuencia en la Gestión de Proyectos fue el sector de la construcción, seguido de artículos relacionados con el sector de la información y servicios y las industrias de proceso.

En una encuesta realizada por Pinto & Slevin (1988), se constató que la industria de la construcción constituye el 44% de la muestra. Los dos principales sectores de la industria identificados en el estudio realizado por Themistocleous & Wearne (2000) fueron la construcción (46%) y los servicios (30%). En la encuesta realizada por Zobel & Wearne (2000) se encontró que los dos sectores principales de la industria eran el sector servicios (41%) y el sector de la construcción (23%). Por el contrario, en la investigación llevada a cabo por White & Fortune (2002) encontró que más del 25% de los encuestados eran del sector IT, el 8% era de la ingeniería y el 2% de la construcción.

A pesar de que la Gestión de Proyectos ha sido utilizada ampliamente en los distintos sectores industriales, es claro que la práctica del PM está fuertemente influenciada por las investigaciones que surgen del sector de la construcción, a pesar de que, como dicen Evaristo & van Fenema (1999), sólo representan un pequeño porcentaje del número total de proyectos ejecutados.

A fin de comprender el campo de la Gestión de Proyectos, tal como existe en la actualidad, puede ser útil repasar y entender cómo ha cambiado a lo largo del tiempo. La Gestión de Proyectos se enfrenta regularmente a nuevos retos y cambios, revisando las herramientas, métodos y enfoques de gestión que integran la disciplina y que se aplican en diferentes áreas, para diferentes fines y en diferentes culturas. Como una profesión emergente, la Dirección de Proyectos

sigue creciendo y adaptándose, y puede decirse que ha recorrido un largo camino desde sus orígenes en la década de 1950.

Durante la década de 1950, el análisis de redes y técnicas de planificación, como el PERT y CPM, formaron el centro del desarrollo en la Gestión de Proyectos. En la década de 1960, estas técnicas siguen siendo populares en la industria de la construcción, pero los criterios del Sistema de Control de Costes/Programación (C/SCSC) ganaron popularidad dentro de las industrias de defensa y aeroespacial. Los avances en el campo de la Gestión de Proyectos en la década de 1960 también incluyeron la formación de dos grandes asociaciones profesionales (*International Project Management Association* - IPMA y *Project Management Institute* - PMI).

En la década de 1970, Shenhar (1996) observa un enfoque en el trabajo en equipo como una característica definitoria de la Gestión de Proyectos, mientras Stretton (1994) observa un énfasis en las estructuras de desglose del trabajo y en los conceptos de sistemas.

La década de 1980 se caracteriza por un enfoque en la organización del proyecto, los riesgos, las influencias externas y el trabajo inicial en el desarrollo de estándares de Gestión de Proyectos.

En el trabajo de investigación llevado a cabo por Kwak & Anbari (2009) observan un notable crecimiento de la popularidad y del interés de la investigación en el campo de la Gestión de Proyectos a partir de la década de 1980 y la tendencia es que va a aumentar aún más en el futuro. Observan que la gestión del proyecto ya no es una simple práctica de planificar, programar y ejecutar proyectos orientados a la eficiencia y eficacia, sino también constatan que se está convirtiendo en un área académica y es una de las disciplinas clave de gestión, que consiste en la investigación teórica y empírica sobre la base de sólidos fundamentos académicos.

El trabajo de Kwak & Anbari (2009) consistió en el análisis de 50 años de investigación, de 1950 a 2007, revisando 18 revistas, dividiendo el trabajo en ocho disciplinas, siendo una de ellas la gestión del desempeño/EVM, concluyendo que esta disciplina fue una de las cuatro con el mayor crecimiento que se produjo en las publicaciones, lo que representa una de las principales áreas de enfoque de interés y con gran potencial para la investigación futura.

Uno de los objetivos de la investigación llevada a cabo por Kwak & Anbari (2009) fue comprender mejor la Gestión de Proyectos desde la perspectiva del mundo de la gestión académica, para mejorar nuestra comprensión como una disciplina académica, basada en la investigación. Esto ayudaría a los investigadores a centrar sus esfuerzos en áreas de alto impacto y relevancia, para contribuir al avance del conocimiento en este campo. A su vez, esto favorecería el aprendizaje, la educación y los programas de capacitación, y en última instancia, conduciría hacia un mejor desempeño en los proyectos y en las organizaciones.

El análisis de esta investigación revela una explosión de popularidad y un gran interés en la investigación de la Gestión de Proyectos. Ha habido un largo debate en la comunidad educativa en cuanto a si se puede considerar como una práctica o como una disciplina académica. En el campo de la I+D, las herramientas y técnicas de Gestión de Proyectos se aplican y ejecutan para completar proyectos complejos con éxito. En la disciplina del sector de la construcción, las personas aprenden y aplican la planificación, gestión y control de proyectos de construcción para cumplir con el tiempo, el presupuesto y las especificaciones. En el campo de la ingeniería, la planificación de la producción, la programación y los métodos cuantitativos se aplican a los sistemas de fabricación para lograr una mayor productividad. Sin embargo, cuando se trata del campo de los negocios, los investigadores suelen mostrarse más indecisos y sin estar convencidos de la idea de la Gestión de Proyectos.

Si particularizamos para el área concreta de los Riesgos del Proyecto, Williams (1995) realiza un estudio bibliográfico sobre investigaciones relacionadas con la gestión de Riesgos del proyecto. Considera cómo se puede definir el éxito o el fracaso de un proyecto (más que el simple logro de objetivos de tiempo/costo/técnicos). Pone en evidencia, a través de datos históricos, la imposibilidad en algunos casos de lograr los objetivos, revisa las definiciones de riesgo, qué implican los riesgos para un proyecto y cómo un equipo de proyecto puede percibir, identificar y cuantificar el riesgo; se discuten las técnicas para el análisis de riesgos, para programación, para el coste y para los aspectos técnicos. Finalmente, se discuten las estructuras y procedimientos de gestión necesarias para gestionar el riesgo.

El impacto que los riesgos/incertidumbres causan sobre los objetivos del proyecto es importante y comúnmente aceptado por los directores de proyecto, lo que hace que la gestión de riesgos sea una cuestión importante a valorar en cada uno de los proyectos y podría evitar posteriores desastres.

Cada vez más, las empresas necesitan técnicas de gestión eficaces que les ayuden a liderar proyectos complejos, ganar cuota de mercado y satisfacer las necesidades del cliente. Dado este contexto, la Gestión de Proyectos y sus herramientas son la manera más completa y moderna para satisfacer la demanda de dichas empresas (Kerzner, 2009). Aunque se pueden aplicar distintos modelos de gestión en las empresas, la Gestión de Proyectos es el modelo de gestión más implantado, independientemente del tamaño de la empresa o del sector de actividad.

Hoy en día la Gestión de Proyectos se ha convertido en una profesión, con prácticas aceptadas, con colegios profesionales y con normas establecidas por organismos internacionales, como el *Project Management Institute* (PMI), la *International Project Management Association* (IPMA) o *The Association for Project Management* (APM).

Se puede observar en los últimos años, una tendencia clara de las compañías más grandes del mundo en adoptar la Gestión de Proyectos no solo como una simple metodología o un conjunto de herramientas, sino más bien como una filosofía de trabajo (Eve, 2007).

Debido a que la mayoría de los trabajos en la actualidad se desarrollan a través de proyectos, obtener una mayor eficiencia permitirá a la organización encarar con menores dificultades los distintos retos estratégicos y operativos que puedan surgir en su camino (Longman & Mullins, 2004).

Cicmil (2000) señala como posibles beneficios para introducir y llevar a cabo satisfactoriamente una gestión sistemática del proyecto lograr una mayor rentabilidad mediante el uso óptimo de los recursos, lograr una mayor atención a los objetivos de desarrollo de productos, la consiguiente expansión del mercado (la Gestión de Proyectos proporciona un enfoque disciplinado para asegurar que se pone en el mercado el producto adecuado en el momento adecuado), y el soporte para una mayor eficiencia de la gestión del conocimiento mediante la organización de equipos

Sin embargo, existen numerosas publicaciones que muestran que los proyectos a menudo no cumplen con los objetivos del cronograma y el presupuesto (Williams, 1995).

Con el fin de entender la Gestión de Proyectos, es importante definir primero qué es proyecto. Para Kerzner (2009), los proyectos son empresas únicas, con objetivos bien definidos, que consumen recursos y operan sobre la base de tiempo, costo y calidad.

Habiendo entendido el término de Proyecto, se puede definir el significado de Gestión de Proyectos que, de acuerdo con Project Management Institute (2013), es la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto con el fin de cumplir o exceder las necesidades y las expectativas del cliente. La gestión del proyecto se divide en etapas (procesos) con el fin de ayudar a los administradores en la aplicación de esos conocimientos, habilidades y herramientas.

2.2 Enfoques en Dirección de Proyectos

Existen otras metodologías para la Gestión de Proyectos ampliamente utilizadas, algunas de ellas en función del sector y otras generalistas, como es el PMBoK.

Dos metodologías muy comunes en el ámbito de la Gestión de Proyectos son Prince2 e Itil

2.2.1 Prince2

PRINCE (*Projects In Controlled Environments*) es un modelo de Gestión de Proyectos que cubre la administración, control y organización de un proyecto. Es un estándar utilizado por el gobierno del Reino Unido y es ampliamente utilizado en Europa.

Fue establecido en 1989 por la CCTA (*Central Computer and Telecommunications Agency*). En 1996 se presentó PRINCE2. Si bien el primer estándar estaba orientado a proyectos TIC, PRINCE2 es más generalista.

Es un método de Gestión de Proyectos diseñado para proveer un marco de trabajo que cubra todas las disciplinas y actividades requeridas dentro de un proyecto. Se centra en lo que se conoce como “*Business Case*” (Caso de Negocio) para guiar todos los procesos de la gestión del proyecto. El “*Business Case*” describe, entre otras cosas, la justificación, necesidad y objetivos del proyecto a distintos niveles. Cubre los procesos en la gestión del proyecto pero no las técnicas usadas en la creación de productos. PRINCE2 tiene un conjunto de procesos que se consideran los justos y necesarios para gestionar y ejecutar un proyecto de una forma apropiada. La forma de aplicar todos los conceptos expuestos en PRINCE2 dependerá de la naturaleza y características de cada proyecto, usando algunos componentes y descartando otros.

2.2.2 ITIL

ITIL (*Information Technology Infrastructure Library*) es un *framework* para la gestión de servicios IT (*Information Technology*) no propietario, independiente de proveedores y de la tecnología utilizada, basado en “*best practices*”. Propone una terminología estándar estableciendo cómo se aplica la gestión de Servicios en una organización. Está centrado en la medición y mejora continua de la calidad de los servicios prestados, siempre desde el punto de vista del negocio y del cliente.

Se creó entre 1989 y 1995 por la HMSO (*Her Majesty's Stationery Office*) del Gobierno Británico. Sus comienzos fueron una guía para el desarrollo de servicios informáticos para el gobierno Británico, aunque pronto se extendió su uso por otros países. Hoy en día ITIL se ha convertido en el estándar mundial en la Gestión de Servicios Informáticos.

Fue creado al comprobar que las organizaciones dependen cada vez más de las aplicaciones informáticas para alcanzar sus objetivos de negocio. Esta dependencia ha ido en aumento y da como resultado la necesidad de servicios informáticos de calidad que se correspondan con los objetivos de negocio y que satisfagan los requisitos y las expectativas de los clientes.

En la actualidad, ITIL ha pasado de estar centrada en el desarrollo de aplicaciones IT a estar centrada en la gestión de los servicios IT.

2.2.3 ICB / IPMA

El modelo de competencias de IPMA está integrado en la ICB (*International Competence Baseline*), desarrollado a partir de las NCB (*National Competence Baseline*). En España le corresponde a AEIPRO, como Asociación Española de Dirección e Ingeniería de Proyectos, adaptar las competencias a nivel nacional. La NCB trata sobre las competencias que debe desarrollar un Director de Proyecto (competencias técnicas, de comportamiento y contextuales). Además comienza a hablar del valor de la experiencia y de las habilidades de los gestores.

En el modelo IPMA y en la NCB se definen tres ámbitos de competencia que contienen los elementos de competencia relacionados:

- 20 elementos de competencia técnica que tratan el asunto de la dirección del proyecto en que los profesionales trabajan.
- 15 elementos de competencia de comportamiento que tratan las relaciones personales entre los individuos y los grupos dirigidos en proyectos, programas o carteras.
- 11 elementos de competencia contextual que tratan la interacción del equipo de dirección dentro del contexto del proyecto y con la organización permanente.

La NCB no es un cuerpo de conocimientos en sí, sino un compendio de competencias que les sirven a los Directores de Proyecto como guía de las habilidades que debe abarcar en cada uno de los tres ámbitos que engloba. El objetivo de IPMA es el desarrollo de las competencias profesionales en la dirección de proyectos.

Se entiende por Competencia al compendio de conocimiento, actitud personal, destrezas y experiencia relevante, necesario para tener éxito en una determinada función (AEIPRO, 2009).

2.2.4 ISO 21500

La Norma ISO 21500, publicada en español como norma UNE-ISO 21500 Directrices para la dirección y Gestión de Proyectos, pretende servir como orientación al dirigir proyectos, proporcionando un lenguaje común, fomentando buenas prácticas dentro de esta disciplina y, en definitiva, estableciendo un marco de actuación que cualquier tipo de organización pueda aplicar a cualquier

tipo de proyecto. La ISO 21500 puede ser aplicada a nivel internacional en cualquier tipo de organización pública o privada, independientemente de su sector, tipo, tamaño, etc.

Esta norma establece un lenguaje común dentro de los proyectos, por lo que se dirige tanto a directores de proyecto como a miembros del equipo de proyecto, directores y gerentes de la organización, Alta Dirección, promotores de proyectos, etc.

Su estructura puede ser comparada con el PMBoK, el estándar de PMI, pero la ISO 21500 va más allá, incluyendo otros enfoques como el de las competencias de la ICB de IPMA.

La norma describe 39 procesos de Dirección de Proyectos agrupados en 10 materias, pero da libertad para escoger cuales implementar exactamente al dirigir un determinado proyecto, y cómo desarrollar los procesos seleccionados. Los proyectos tienen su razón de ser en su unicidad, no hay dos proyectos iguales, así que no tendría sentido establecer que todos los procesos incluidos en la ISO 21500 se deben aplicar a todo tipo de proyectos.

Así, evitando descripciones rígidas sobre qué tiene o qué no tiene que incluir cada proceso, la ISO 21500 consigue poder ser aplicada de manera genérica a casi cualquier tipo de proyecto y no choca con las metodologías ya existentes en el ámbito de la Dirección de Proyectos.

2.2.5 PMBoK / PMI

La corriente ortodoxa dentro de la Gestión de Proyectos está representada por el (Project Management Institute, 2013). En este trabajo se define el conjunto de temas, áreas de conocimiento y procesos que se deben usar conjuntamente con los principios sólidos de la Gestión de Proyectos para realizar un proyecto. El PMBoK del Project Management Institute ha emprendido exitosamente el camino para convertirse en un estándar [ANSI 2001] [IEEE 2004].

Project Management Institute (2013) apunta como característica básica de los proyectos el desarrollo progresivo, lo que significa que el proyecto se desarrolla paso a paso y, conforme va avanzando, se incrementa el conocimiento que el equipo va adquiriendo del proyecto, logrando una mejor comprensión de los objetivos.

Con el fin de facilitar el desarrollo progresivo y la gestión, se acostumbra a dividir el proyecto en fases. Para cada fase, se debe definir sus objetivos y resultados (conocidos como paquetes de trabajo), de modo que puedan ser planificados y controlados, realizando en cada etapa la aprobación de los resultados obtenidos, pudiendo éstos ser utilizados en la siguiente fase.

Project Management Institute (2013) indica que los ciclos de vida en general, definen el trabajo técnico que se requiere en cada fase y qué partes o sectores de la misma deben actuar, cuando se deben realizar las entregas y la forma en que deben revisarse, verificarse y validarse, y también como revisar y aprobar cada fase. También indica que, al principio del proyecto, los riesgos de no alcanzar los objetivos son más altos que en las etapas finales, debido a la existencia de un mayor nivel de incertidumbre, que va decreciendo conforme avanza el proyecto.

Los costes del personal y los materiales son bajos al principio, pasando por un aumento en las etapas intermedias, disminuyendo rápidamente en las aproximaciones del fin del proyecto. Es necesario, entonces, controlar los costes durante el transcurso del proyecto, evitando problemas y desvíos de los objetivos originales que afecten al rendimiento de las siguientes etapas.

2.2.5.1 Grupos de Procesos

Con el fin de orientar a los gerentes para que apliquen los conocimientos, las habilidades y las herramientas apropiadas para la ejecución del proyecto, se definen los llamados procesos de gestión. No hay que confundir estos procesos con las etapas que deben seguirse e implementarse estrictamente en todos los tipos de proyectos. Corresponde al director y su equipo de trabajo identificar las necesidades en relación con las características particulares de cada proyecto y luego proponer la aplicación de los procesos correspondientes.

Project Management Institute (2013) plantea cinco grupos de procesos que son necesarios para cualquier proyecto, independientemente de las áreas de aplicación o enfoque del sector. Además, pueden interactuar entre sí y son ejecutados siempre en la misma secuencia, pudiendo haber superposición entre ellos.

Según Project Management Institute (2013), los grupos de procesos se pueden describir de la siguiente manera:

- Fase de inicio: es el reconocimiento de que se iniciará un proyecto o una fase del mismo.

- Fase de Planificación: Esta es la fase en la que se definen los objetivos, el alcance y las actividades necesarias para alcanzar los objetivos. Algunos de los procesos que tienen lugar en esta fase son: secuencia de las actividades, las estimaciones de los recursos que se asignarán a cada actividad, las estimaciones de los plazos para la finalización de cada actividad y análisis de riesgo. Para Vanhoucke (2011) los cronogramas, los análisis de riesgos y el seguimiento son parámetros clave para el éxito o el fracaso de un proyecto. La importancia de la planificación también se puede evidenciar por la obra de Zwikael & Globerson (2006), que establece que existe una correlación entre la calidad de la planificación y el éxito del resultado final del proyecto. Porque, una vez que se tienen los procesos bien definidos en la fase de planificación, el director del proyecto puede llevar más fácilmente las otras fases del proyecto a su conclusión con el mismo nivel de calidad, con el éxito esperado.

- Fase de ejecución: esta fase se relaciona con la asignación de recursos humanos y materiales para lograr lo que se había planeado.

- Fase de seguimiento y control: se refiere a la actividad para asegurar que los objetivos del proyecto se están cumpliendo a través de la medición de los avances del proyecto y la aplicación de acciones correctivas cuando sea necesario. Algunas de las actividades de esta fase son: controlar la programación, controlar los costes, monitorizar los riesgos y elaborar informes de desempeño. Según Crawford et al. (2006), las investigaciones que abordan el seguimiento y control de los proyectos son cada vez más comunes en revistas científicas. Los informes de desempeño tienen como objetivo proporcionar a los directores de proyecto información sobre los recursos que se están utilizando para cumplir con los objetivos, describir la situación actual e indicar las predicciones de los resultados del proyecto.

- Fase de Cierre: formalización de la aceptación del proyecto.

2.2.5.2 Áreas de Conocimiento

En los procesos mencionados anteriormente, se aplican metodologías y herramientas que tratan de organizar y orientar sus actividades. Éstos se agrupan en las llamadas áreas de conocimiento.

Las diez áreas de conocimiento propuestas por Project Management Institute (2013) se pueden describir de la siguiente manera:

- Integración: la integración es el área responsable de la organización y realización del proyecto y cuenta con actividades como la gestión de las expectativas y conflictos, gestión de la relación entre las partes involucradas, unificación del equipo del proyecto y gestión de la distribución de recursos.

- Alcance: el alcance es la manera de asegurar que el proyecto cumple con las especificaciones previamente definidas. Una de las principales herramientas del alcance es la estructura de desglose del trabajo (EDT), que es un diagrama en el que las actividades se dividen y organizan jerárquicamente. Para Kerzner (2009), a través de la EDT se pueden planear, realizar la integración entre el costo, el cronograma y el desempeño, asignar los recursos de acuerdo a las necesidades y monitorizar e informar sobre el estado del proyecto.

- Tiempo: o gestión del tiempo se inicia con la elaboración de la EDT y tiene como objetivo hacer que el proyecto se complete dentro del plazo fijado. El cronograma es una de sus principales herramientas, que debe contener las actividades con sus fechas de inicio y fin, considerando sus restricciones de precedencia y los recursos necesarios. El programa debe controlarse constantemente, ya que tanto los plazos como la secuencia de las actividades pueden cambiar a medida que el proyecto avanza. Por lo tanto, se puede predecir los cambios y tomar acciones apropiadas en el momento oportuno.

- Coste: a través de la planificación, estimaciones, presupuestos y controles, la gestión de costes es responsable de hacer que el proyecto se complete dentro del presupuesto previsto. Durante el transcurso del proyecto, los valores estimados y presupuestados sufren alteraciones. Por lo tanto, es necesario desarrollar métodos de monitorización de costes para el seguimiento del progreso del proyecto con el fin de identificar los problemas en los costes en el momento de tomar las acciones correctivas necesarias. Por lo tanto, para realizar el seguimiento de los costes es importante recoger datos durante todo el proyecto,

formando una base de datos para la comparación de los valores reales y previstos, permitiendo también una predicción de valores futuros basados en valores pasados.

- Calidad: o Gestión de la Calidad tiene como objetivo asegurar que el proyecto se termine dentro de los estándares deseados de calidad, lo que garantiza la satisfacción de los usuarios finales y otros interesados.

- Recursos humanos: para lograr el éxito en un proyecto, el equipo del proyecto debe estar compuesto por profesionales motivados y cualificados. La gestión de recursos humanos es responsable de la asignación de los recursos humanos necesarios, buscando el mejor uso posible de los profesionales y el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

- Comunicaciones: tiene como objetivo recopilar y distribuir las informaciones entre las partes interesadas de forma rápida, evitando las distorsiones, los costes, los problemas de calidad y retrasos.

- Adquisiciones: gestión de las adquisiciones debe ocuparse de la compra y contratos de recursos (bienes y servicios) necesarios para la realización del proyecto.

- Riesgo: tiene como objetivo maximizar la probabilidad y el impacto de los eventos positivos y reducir al mínimo la probabilidad y el impacto de los eventos negativos. Está relacionado con la identificación, análisis y acciones en relación con los riesgos del proyecto.

- Partes Interesadas (*Stakeholders*): tiene como objetivo identificar a las personas, grupos u organizaciones que pueden afectar o ser afectados por el proyecto, para analizar las expectativas de los interesados y su impacto en el proyecto, y para desarrollar estrategias de gestión adecuadas a fin de lograr la participación eficaz de los interesados en las decisiones y en la ejecución del proyecto. La gestión de los interesados también se centra en la comunicación continua con los interesados para comprender sus necesidades y expectativas, abordando los incidentes en el momento en que ocurren, gestionando conflictos de intereses y fomentando una adecuada participación de los interesados en las decisiones y actividades del proyecto. La satisfacción de los interesados debe gestionarse como uno de los objetivos clave del proyecto.

Este trabajo de investigación está centrado en los grupos de procesos de planificación, seguimiento y control de proyectos. En la fase de planificación por cuanto es en esta fase donde se realiza la estimación de las duraciones y costes de las actividades del proyecto, incluyendo la posible incertidumbre asociada a cada una de ellas. Y en la fase de seguimiento y control por cuanto es en esta fase donde se realiza el seguimiento de la evolución del proyecto conforme a su planificación inicial.

En cuanto a las áreas de conocimiento propuestas por el PMI, el trabajo de investigación se enmarca dentro de la gestión del tiempo, gestión del coste y gestión de los riesgos del proyecto.

En los puntos siguientes del capítulo analizamos más detalladamente los planes de gestión del Tiempo y del Coste. Por ser el tema principal de estudio de este trabajo, se dedicará el capítulo siguiente por completo al estudio del plan de Gestión de Riesgos del Proyecto.

2.2.5.3 Gestión del Tiempo del Proyecto

La gestión del tiempo tiene que ver con hacer que el proyecto sea completado en el período preestablecido (Project Management Institute, 2013).

Williams (1995) indica que el área de riesgos del proyecto más estudiada es el riesgo del tiempo del proyecto. Cuando se utiliza un enfoque determinista, es habitual utilizar herramientas analíticas basadas en conceptos de redes PERT o CPM, pero el problema surge con análisis donde aparece la incertidumbre en la red. Dentro de su investigación aporta referencias bibliográficas donde ya se comienzan a ofrecer soluciones para redes estocásticas ((Adlakha & Kulkarni, 1989), (Ritchie, 1985)). La mayor parte de su análisis se centró en el análisis de la duración del proyecto. En la práctica, el director del proyecto se interesa por dos cuestiones: la duración total, y las actividades que son críticas para determinar esa duración.

Esta es un área que está ganando creciente interés dentro de la Gestión de Proyectos, debido a la prioridad dada al cumplimiento de los plazos. Una gestión eficaz del tiempo presenta vital importancia para evitar el incumplimiento de los plazos y otras dificultades durante la ejecución del proyecto. No son raros los proyectos que terminan con los objetivos de tiempo

no cumplidos. Tal y como apuntan Assaf & Al-Hejji (2006), el desarrollo de planificaciones y cronogramas ineficaces son causas importantes de las demoras de los proyectos.

La gestión del tiempo se inicia con el desarrollo de la WBS (*Work Breakdown Structure*), asignando fechas de inicio y de las entregas a cada actividad teniendo en cuenta las restricciones de precedencia y recursos (Bidot, Vidal, Laborie, & Beck, 2009).

El siguiente paso es el desarrollo de un cronograma donde se establece una lógica de precedencia de las actividades, es decir, su interconexión en secuencia.

Una revisión histórica de la investigación sobre programación de proyectos ha sido llevada a cabo por Villafañez (2013). El autor hace un recorrido temporal repasando profundamente las distintas metodologías existentes sobre programación de proyectos, desde los métodos inicialmente establecidos (CPM, PERT,...) hasta las más modernas metodologías basadas en programación multiproyecto.

Dada la importancia del factor tiempo en la Gestión de Proyectos, se ha discutido mucho acerca de los riesgos e incertidumbres en el proceso de esta área de conocimiento (Zafra-Cabeza, Ridaou, & Camacho, 2008). Estos riesgos se pueden presentar en diferentes formas y se originan a partir de diferentes fuentes.

Las técnicas de programación que se basan en algún tipo de WBS (entre los cuales se encuentran el CPM y PERT) tienen incertidumbres más grandes a medida que aumenta la complejidad del proyecto. Como la estimación del error total es la suma de los errores de cada actividad, se espera que la incertidumbre sea mayor cuantas más actividades haya.

Las incertidumbres están presentes también en la determinación de las fechas de inicio y finalización de las actividades.

En el momento en que el plan del proyecto es elaborado, las especificaciones de los métodos y los recursos implicados en la realización de las actividades a menudo pueden aún no estar suficientemente detalladas. Incluso si las distribuciones de probabilidad se utilizan para incorporar esta incertidumbre, los errores pueden estar aún presentes.

Cada proyecto se puede ejecutar en instantes y lugares diferentes, lo que hace que los datos de las experiencias pasadas utilizadas en el estudio estadístico no refleje con exactitud las condiciones del nuevo proyecto, que pueden llevar a unas estimaciones inadecuadas de las distribuciones (Fortin, Zielinski, Dubois, & Fargier, 2010).

Pich, Loch, & Meyer (2002) dividen las causas de la falta de información en dos tipos. Una en referencia a un no conocimiento completo de los eventos que se denomina ambigüedad. La otra fuente de incertidumbre se debe a la imposibilidad de estimar en su totalidad las características de las actividades para las que se proponen plazos cuando hay muchas variables que interactúan, que los autores llaman complejidad.

Además de la incertidumbre relativa a las dependencias entre las actividades y a las estimaciones de los plazos de las actividades, McLain (2009) detecta la presencia de otro tipo impactos que pueden afectar a los cronogramas. El primer tipo, que denomina familiaridad, se refiere a los proyectos cuyas actividades los empleados no conocen a fondo por no haber trabajado previamente en condiciones similares, lo que disminuye su capacidad para anticiparse a los problemas que requieren experiencia. El segundo tipo de incertidumbre lo denomina variedad, y se refiere a la diversidad de actividades, recursos, requisitos o cualquier otro parámetro relevante, lo que implica una mayor complejidad e incertidumbre en el proyecto.

Herroelen & Leus (2002) sugieren algunas posibles causas de alteraciones en el cronograma durante la ejecución del proyecto: la escasez de recursos, los retrasos en la llegada de los materiales, la necesidad de la inclusión de nuevas actividades o la exclusión de otras, debido a los cambios en el alcance del proyecto o el retraso de la realización de diversas tareas debido a las condiciones meteorológicas.

2.2.5.4 Gestión del Coste del Proyecto

Sobre esta área de conocimiento recae la responsabilidad de asegurarse que el proyecto concluya dentro del presupuesto, realizando para ello, procesos de planificación, estimación del presupuesto y control de los costes. Es el proceso

en el que se evalúan los costes relativos a cada tipo de recurso aplicado en el proyecto (Project Management Institute, 2013).

La estimación de costes se hace necesaria en las etapas iniciales de todo tipo de proyecto, ya que la toma de decisiones, presupuestos y estudios de viabilidad económica son llevados a cabo durante dicha evaluación.

Williams (1995) indica que el uso de cantidades probabilísticos para calcular los rangos de estimaciones de costes está bien establecido y no es inusual existiendo métodos sofisticados para llevar a cabo completas evaluaciones financieras probabilísticas de proyectos.

La poca información disponible es a menudo un problema para el proceso de estimación de costes. Para llevar a cabo esta estimación, se puede basar en una lista de las cantidades de recursos necesarios previamente analizados, en la experiencia de los expertos responsables, por analogía con proyectos similares ya desarrollados y gracias a datos históricos registrados ((Shepperd & Schofield, 1997), (Kim, Wells JR, & Duffey, 2003), (Moon, Kim, & Kwon, 2007)).

La precisión de las herramientas de estimación de costes es una cuestión clave en esta etapa del proyecto. En las primeras etapas de un proyecto existe mayor imprecisión en la información que se posee del proyecto. Igualmente, la incertidumbre en los procesos de los que se pretende predecir las condiciones futuras es mayor. Por todo ello, basándose en las dificultades inherentes a este proceso, muchos investigadores buscan perfeccionar la exactitud de los métodos de estimación y han propuesto diferentes formas de estimar los costes del proyecto (Stamelos & Angelis, 2001). Es posible encontrar métodos basados en la regresión lineal, en redes neuronales (NN), o en razonamiento basado en casos (CBR).

El objetivo general de buscar precisión significativa en los costes estimados tiene como fin su posterior uso para elaborar el presupuesto para el proyecto y por el hecho de que las herramientas de la programación y el control del coste se basan en esta estimación. Por lo tanto, las estimaciones que fallan tanto por sobreestimar los valores como por subestimarlos, pueden traer consecuencias no deseadas. Una estimación de los valores por encima de los valores correctos puede llevar a una empresa a perder un contrato, pues los competidores pueden ofrecer valores más bajos. Por otro lado, una estimación demasiado baja puede

dar la impresión de no cumplir con todos los requisitos y que el proyecto no se completará en las condiciones deseadas.

Enshassi, Mohamed, & Madi (2005) también abordan las incertidumbres del proceso de estimación de costes, identificando en su revisión de la literatura que los factores que más afectan a la precisión son la complejidad del proyecto, la información disponible, los requisitos tecnológicos, las condiciones de los contratos existentes, la eficiencia del contratista, los requerimientos del mercado y la duración de los riesgos del proyecto.

Presenta cuatro tipos de razones para los casos en que los costes estimados son inferiores a los gastos reales: razones técnicas, económicas, psicológicas y políticas.

Teniendo en cuenta las incertidumbres y los riesgos presentes en las diversas fases y áreas del proyecto, incluidos los procedimientos de estimación y la realización del presupuesto, Picken & Mak (2001) propusieron la realización de un análisis para conocer los riesgos potenciales, para que se puedan incorporar en los costes estimados una cantidad adicional de contingencias, lo que lleva a un presupuesto más realista frente a los costes reales que incurre el proyecto.

Siendo conscientes de que los riesgos e incertidumbres son inherentes al proceso de estimación y de realización del presupuesto, Stamelos & Angelis (2001) afirman que son más seguras las previsiones que producen distribuciones de probabilidad con intervalos de incertidumbre, considerando tres valores para cada actividad: el de valor optimista, más probable o realista y el más pesimista.

Es de esperar que durante el curso del proyecto, los valores que habían sido estimados y presupuestados para los costes puedan someterse a cambios. El riesgo de que estos costes crezcan es aún mayor para los proyectos a largo plazo. Esto se debe al hecho de que, cuanto más duración tiene el proyecto, más está sujeto a la introducción de nuevas tecnologías, los cambios en el alcance, los cambios en las especificaciones o en función del producto final, las fluctuaciones en el mercado local, los cambios en las políticas y cambios en el cronograma.

Al revisar el proyecto en su conjunto, el tiempo y los costes obedecen a una relación de compensación. Cuando se trata de minimizar el tiempo de finalización, es de esperar que los valores estimados de costes se incrementen en

una cierta cantidad, por otra parte, la búsqueda de presupuestos más pequeños puede hacer que los plazos para la terminación se incrementarán.

Las razones de las desviaciones de los costes reales contra presupuesto pueden proceder de múltiples fuentes, dentro de las cuales aparecen: deficiencias en la planificación y en la programación, las deficiencias en la estimación de costes, los procedimientos de control inadecuado, los retrasos en las aprobaciones de trabajo, entre otras.

Los procesos de control tratan de recopilar datos durante el transcurso del proyecto, formando una base para comparar los valores reales con los que se habían previsto, y permiten la predicción de valores futuros en base a los resultados pasados. Los límites de control se establecen para que se pueda evaluar la gravedad de las desviaciones y discrepancias, permitiendo al director del proyecto identificar las causas y tomar medidas correctivas a tiempo para que sean efectivas (Navon, 2005).

La adopción de la metodología del Valor Ganado como un método para controlar los costes en la mayoría de los proyectos se justifica por su capacidad para detectar las desviaciones, incluso en las primeras etapas del proyecto, lo que le permite que sean corregidos desde el primer momento. Aunque tales desviaciones sólo se evidencian en las etapas posteriores, la ventaja de este método es predecir acontecimientos antes de que finalice el proyecto, lo que permite a los directores tomar medidas que minimicen los impactos negativos cuando se complete el proyecto.



3

Gestión de Riesgos del Proyecto



3 Gestión de Riesgos del Proyecto

La Gestión de Riesgos del Proyecto es el tema central de nuestra investigación. En este capítulo pretendemos realizar una revisión acerca del propio concepto de “riesgo” utilizado a lo largo de los años por diferentes autores.

En la primera parte del capítulo se analiza la evolución del significado así como de la utilidad dada al concepto “riesgo”, comenzando por una visión tradicional, entendida como una consecuencia con resultados negativos.

Posteriormente el concepto se amplía recogiendo, no solo la opción de consecuencias negativas en los proyectos, sino también la posibilidad de ocurrencia de oportunidades o consecuencias con resultados favorables.

A pesar de este avance significativo, el concepto de “riesgo” se mezcla con el concepto de “incertidumbre”, llegando incluso a confundirse entre sí, y sin llegar a existir una definición claramente adoptada por los investigadores para cada uno de los dos conceptos.

Finalmente, la tendencia de los investigadores es hacia una gestión integral de la incertidumbre, abarcando no solo la gestión de las amenazas y/o de las oportunidades, sino el estudio de todas las posibles fuentes de incertidumbre que rodean y afectan al proyecto y pueden provocar consecuencias sobre el mismo.

En este capítulo analizamos las distintas metodologías de Gestión del Riesgo del Proyecto que han sido utilizadas por los investigadores, así como por los estándares profesionales. Dedicamos uno de los puntos a comparar estas metodologías existentes, reflejando los puntos en común y las diferencias existentes entre dichas metodologías.

Por último, el capítulo finaliza con un estudio de la complejidad en los proyectos. Este puede considerarse bien una fuente de incertidumbre, o bien, el último peldaño en cuanto al análisis de la incertidumbre en los proyectos, donde se observa que no sólo hay que tener en cuenta las incertidumbres de forma aislada que pueden impactar en el proyecto, sino que hay que considerar el proyecto como sistémico.

3.1 De la Gestión de Riesgos a la Gestión de la Incertidumbre

3.1.1 Definición de Riesgo

Un tema de especial interés y reciente debate en la comunidad de gestión de riesgos ha sido la cuestión de la definición del término "riesgo", y en particular si se debe incluir el término oportunidad al igual que se atribuye la definición de amenaza.

Williams (1995) realiza una revisión bibliográfica sobre la definición de riesgo en el proyecto y cómo el equipo de proyecto lo percibe, identifica, cuantifica y lo considera.

En su investigación se recoge cómo los autores habían utilizado la palabra "riesgo" con **connotaciones negativas** o refiriéndose a resultados adversos (Ansell & Wharton, 1992; Fishburn, 1984; Statman & Tyebjee, 1984).

Este concepto de "riesgo", utilizado para referirse a cualquier tipo de incertidumbre que se ve desde el punto de vista de la contingencia desfavorable, aparece con anterioridad en la obra de Knight (1964), quien asocia a "riesgo" al concepto de pérdida.

Incluso, con el paso del tiempo, el concepto negativo del "riesgo" se sigue utilizando por otros autores (Hillson, 2002; Jaafari, 2006; Mark, Cohen, & Glen, 2004).

La mayoría de las investigaciones se han centrado en la identificación y en la propuesta de caminos para que los directores de proyecto puedan absorber o reducir las consecuencias negativas de la incertidumbre, las cuales han sido reconocidas como una variable importante en la explicación del rendimiento y la estabilidad de la organización.

El riesgo se entiende como la posibilidad de que se produzcan complicaciones y aparezcan problemas con respecto a la realización de una tarea del proyecto y con respecto a la consecución de un logro sobre algún objetivo del proyecto. El riesgo es inherente a todas las empresas del proyecto, como tal, nunca puede ser totalmente eliminado, aunque se puede gestionar con eficacia para mitigar los impactos a la consecución de los objetivos del proyecto.

Esta acepción tradicional del término "riesgo" es también la utilizada en el Diccionario Oxford, cuyo significado es: "*peligro, posibilidad de consecuencias*

negativas, pérdida, exposición a la posibilidad de lesión o pérdida” (S. Ward & Chapman, 2003). Los autores detectan que con el uso de este término, según la definición del propio diccionario, surge un problema en la gestión del riesgo.

Dowie (1999) ya había detectado la restricción que somete esta definición tan rígida del concepto “riesgo” y argumenta que se debe abandonar por completo el uso del concepto en dichos términos. El autor mantiene la idea que este término es un obstáculo para la mejora en la toma de decisiones, y que contamina toda discusión de probabilidad.

Otras definiciones de riesgo están disponibles en la literatura tales como “*la exposición a la posibilidad de pérdidas o ganancias económicas o financieras, daño físico o lesión, retraso, como consecuencia de la incertidumbre asociada con perseguir a un determinado objetivo*” (Chapman & Ward, 2003a; Perry & Hayes, 1985), “*la probabilidad de pérdidas en un proyecto*” (Jaafari, 2006; Kartam & Kartam, 2001), “*la probabilidad de un evento perjudicial que ocurre con el proyecto*” (Baloi & Price, 2003), “*incalculabilidad y, como resultado, incontrolabilidad*” (Nowotny, Scott, & Gibbons, 2001), o “*una barrera para el éxito*” (Hertz & Thomas, 1994).

A pesar que la visión tradicional de “riesgo” negativa, algunas guías de gestión de riesgo y estándares actuales incluyen la **posibilidad de oportunidad**, es decir, las incertidumbres que podrían tener un efecto beneficioso en la consecución de objetivos (Hillson, 2002). Sin embargo la mayoría de las aplicaciones del proceso de riesgo todavía se concentran en la gestión de amenazas y las aproximaciones a la gestión de oportunidades siguen siendo desiguales y reactivas. Las herramientas y técnicas disponibles para los profesionales de riesgo parecen centrar la atención sólo en el lado negativo del riesgo.

Olsson (2007) afirma que “riesgo” podría ser descrito como el resultado negativo de la incertidumbre. Lo contrario de riesgo sería entonces la oportunidad.

La relación parece estar a favor de riesgo en comparación con las oportunidades. En otras palabras, el resultado negativo de una incertidumbre tiene la mayor atención en comparación con el resultado positivo.

Por lo tanto, es importante encontrar qué factores, tanto internos en un proyecto como externos en la organización, afectan la capacidad para manejar o administrar las oportunidades en un proyecto.

Si el problema de la asociación del término "riesgo" con la adversidad lo trasladamos a los procesos de gestión de riesgos, observamos que es un gran inconveniente para la mejora de la gestión del riesgo. Con esta asociación, los procesos de gestión de riesgos se centran en la identificación y la gestión de las amenazas para el desempeño del proyecto. Esta visión es restrictiva, ya que no tiene en cuenta la gestión de oportunidades, en el sentido de posibles efectos beneficiosos sobre el desempeño del proyecto.

En cualquier situación de decisión dada, las amenazas y las oportunidades están a menudo involucradas, y ambas deberían ser tratados por igual, es decir, se debe intentar neutralizar potenciales amenazas y, al mismo tiempo, ofrecer oportunidades para realizar mejoras positivas en el rendimiento.

Las guías publicadas por el *Project Management Institute* (Project Management Institute, 2013) y por la *Association for Project Management* (P. Simon, Hillson, & Newland, 1997), han adoptado una visión amplia en sus definiciones, siendo ambas definiciones muy similares:

Definición según **Guía PMBoK (PMI)**: “*an uncertain event or condition that, if it occurs, has a positive or negative effect on a project objective*” (Un evento incierto o condición que, si ocurre, tiene un efecto positivo o negativo sobre un objetivo del Proyecto).

Definición según **Project Risk Analysis and Management (PRAM) (APM)**: “*an uncertain event or set of circumstances that, should it occur, will have an effect on the achievement of the project's objectives*” (Un evento incierto o conjunto de circunstancias que, si ocurriera, tendrá un efecto en el logro de los objetivos del Proyecto).

A pesar de esto, hay una tendencia por parte de los profesionales en pensar en el riesgo, en gran medida, por el lado del término de amenaza y en enfocar la gestión del riesgo como la gestión de amenazas.

Si bien el riesgo se ha definido de varias formas, se pueden encontrar algunas características comunes en todas las acepciones, según recoge Chia (2006):

- Un riesgo es un evento futuro que puede o no puede ocurrir;

- Un riesgo también debe ser un evento incierto o condición que, si ocurre, tiene un efecto sobre, al menos, uno de los objetivos del proyecto, tales como el alcance, cronograma, costes o calidad;
- La probabilidad de que el evento futuro se produzca debe ser mayor que 0% pero inferior al 100%; acontecimientos futuros que tienen una oportunidad de cero o 100% de ocurrencia no son riesgos;
- El impacto o consecuencia del evento futuro debe ser inesperado o no planificado.

El concepto de riesgo para Zhang (2011) no es un concepto consistente. Diferentes investigadores pueden tener diferente significado de “riesgo” y diferente percepción del riesgo. La definición de riesgo ha estado siempre en disputa en la historia de la investigación del riesgo. La cuestión importante en la disputa es si el fenómeno riesgo es esencialmente objetivo o subjetivo. Entre las dos escuelas de riesgo que el autor ha diferenciado (“Riesgo como un hecho objetivo” y “Riesgo como una construcción subjetiva”), ambas escuelas tienen diferentes definiciones de riesgo, diferentes dimensiones epistemológicas y diferentes métodos analíticos y tienden a recomendar diferentes políticas para gestionar los riesgos.

En relación con la discusión sobre las definiciones de “riesgo” hay un debate paralelo sobre los **procesos de gestión de riesgo**. Algunos investigadores argumentan la necesidad de mejorar los procesos de gestión de riesgos para incorporar las oportunidades. Los procesos no son suficientes para manejar y gestionar oportunidades y se necesitan herramientas y técnicas que no forman parte de los procesos existentes.

Aquellos que definen “riesgo” como algo totalmente negativo y quienes ven “oportunidad” como algo distinto, defienden procesos separados para la gestión de riesgos y la gestión de oportunidades. Por el contrario aquellos que consideran “riesgo” como un término común, que abarca tanto las oportunidades como las amenazas, aceptan la posibilidad de gestionar ambos de manera integrada a través de un proceso común.

Así, el PMBoK define la gestión del riesgo como “*el proceso sistemático de identificar, analizar y responder al riesgo del proyecto*”, incluye maximizar la probabilidad y consecuencias de los eventos positivos y minimizar la

probabilidad y las consecuencias de los acontecimientos negativos que afecten a los objetivos del proyecto'.

Según Hillson (2012b) la gente frecuentemente entiende cosas muy diferentes cuando utiliza la palabra “riesgo”. Este problema podría resolverse si todos los participantes utilizaran las definiciones que se encuentran disponibles en los estándares de riesgo así como en las directrices específicas. Estas definiciones han sido desarrolladas por grupos de trabajo de expertos que pretenden clarificar los conceptos, para decir lo que se quiere dar a entender y para querer dar a entender lo que se dice. Desafortunadamente la mayoría de las personas ignoran las definiciones estas definiciones oficiales cuando se realiza la gestión del riesgo en la práctica. En lugar de eso se fían de sus propias ideas sobre el riesgo, que a menudo son limitadas o son engañosas.

Según el **Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua**, la definición de “riesgo” es “contingencia o proximidad de un daño”. Esta definición se aproxima bastante a la adoptada por el Diccionario Oxford. Comprobamos que se centra únicamente en la parte negativa de la incertidumbre sin considerar posibles consecuencias positivas o favorables para el proyecto.

Los procesos de gestión de riesgos más reconocidos sí han adecuado sus definiciones para recoger las dos opciones: amenazas y oportunidades.

La primera conclusión que sacamos de este primer apartado es que debemos aprovechar la definición completa de riesgo y tratar de encontrar todas las amenazas que pueden interponerse en el logro de los objetivos del Proyecto a la vez que debemos analizar las posibles oportunidades que nos brinda la ejecución del mismo, de tal manera que los objetivos se vean amplificados.

3.1.2 Concepto de incertidumbre

Es evidente que existe incertidumbre en la vida cotidiana, en las organizaciones y en los proyectos. Dado que las variables del proyecto son a menudo de naturaleza estocástica y dinámica (es decir, que presentan diversos grados de incertidumbre en el tiempo) es muy natural que las funciones objetivo también exhiban incertidumbre. La **incertidumbre del proyecto** es la

probabilidad de que la función objetivo no alcanzará su valor objetivo planificado.

Describir la incertidumbre en términos de probabilidad no es nuevo para los estudiosos de gestión de la incertidumbre del proyecto. La clásica distinción entre riesgo e incertidumbre proviene de la **economía financiera**. Knight (1964) afirma que los riesgos son eventos sujetos a probabilidad conocida o cognoscible, mientras que la incertidumbre se refiere a los eventos de los que es imposible especificar probabilidades numéricas. Algunos estudiosos sostienen que esta definición no es válida.

La **teoría de la decisión** apunta como definición de incertidumbre "*una condición del estado del tomador de decisiones que le resulta imposible asignar probabilidades a los resultados posibles de un evento*". En otras palabras, la incertidumbre hace referencia a todas las situaciones en las que una sola acción puede conducir a varias consecuencias.

En la misma obra anterior, se definió incertidumbre como un estado en el que a los actores individuales les resulta imposible atribuir una probabilidad razonablemente definitiva al resultado esperado de su elección. La incertidumbre es entendida como aquella situación en la que no es posible calcular el riesgo.

Otra definición importante de incertidumbre procede de la **psicología**, donde se describe como un estado de ánimo caracterizado por la falta consciente de conocimiento sobre los resultados de un evento. El entorno externo no es la única fuente de incertidumbre. Existe incertidumbre en la mente de la persona que duda. En cambio, Wittgenstein (1986) indica que la incertidumbre presupone la certeza.

A lo largo de los años ha habido varios intentos de clasificar la incertidumbre. Knight (1964) define el riesgo como forma de conocimiento incompleto en el que el futuro se puede predecir a través de las leyes de probabilidad. Ahí es donde las distribuciones de probabilidad de acontecimientos futuros se pueden construir. La incertidumbre se puede definir como la variabilidad de los resultados futuros, en donde las distribuciones de probabilidad no se pueden construir. Usando estas definiciones, el riesgo se aplica cuando hay repetición y replicabilidad, en contraposición de incertidumbre, que se aplica cuando no hay

conocimiento previo de replicabilidad y futuras ocurrencias desafían la categorización.

Elms (2004), Frank (1999) y Schafer (1976) describen dos tipos de incertidumbre: aleatoria y epistémica. **Incetidumbre aleatoria** es la incertidumbre que no puede ser prevista con antelación (que tiene que ver con el azar). **Incetidumbre epistémica** se describe como la incertidumbre derivada de la falta de conocimiento (se podía haber previsto si hubiese existido mayor conocimiento). A la incertidumbre asociada a los acontecimientos desconocidos y futuro inesperado se denominó incertidumbre ontológica.

Ampliando este pensamiento, Hillson (2012b) razona que se deberían considerar tres tipos principales de incertidumbre como parte del proceso de riesgo: el primero es la **variabilidad**, donde hay incertidumbre sobre algunas características clave de un evento planificado o de una actividad o de una decisión. Los especialistas de Riesgo llaman a esto incertidumbre aleatoria, donde es posible un rango de resultados pero no estamos seguros de lo que realmente podría ocurrir.

En segundo lugar la **ambigüedad** existe cuando tenemos incertidumbre sobre lo que podría ocurrir, si ocurre. Otro nombre para la ambigüedad es la incertidumbre epistémica, que surge del conocimiento imperfecto.

Un tercer tipo se llama normalmente lo que no conocemos de lo desconocido (“*unknown-unknowns*”), aunque un nombre mejor sería lo que no podemos saber de lo que no sabemos (y su nombre propio es **incertidumbre ontológica**), a veces llamados “Cisnes Negros” o riesgos emergentes. Estos surgen de las limitaciones en nuestros marcos conceptuales o de nuestra visión del mundo. Ellos son los riesgos que no vemos porque no sabemos que deberíamos estar buscándolos.

Anteriormente Hillson (2004b) intentó relacionar el riesgo con la incertidumbre sobre la base de la distinción entre incertidumbre aleatoria y la incertidumbre epistémica utilizando la siguiente frase: “*el riesgo es la incertidumbre medible; la incertidumbre es el riesgo inmensurable*”. Esto implica que, cuando se pueden medir, una incertidumbre pasa a ser considerada un riesgo.

Por su parte Pender (2001) argumenta que la incertidumbre se aplica cuando no hay conocimiento previo por repetición (es decir, la incertidumbre aleatoria). En el **modelado de decisión**, la incertidumbre se define como la cantidad de falta de información (que pueden ser de conocimiento), es decir, la incertidumbre epistémica. A partir de esto, no es posible ver la relación entre la incertidumbre, el riesgo y la oportunidad. La incertidumbre e ignorancia son parte de la Gestión de Proyectos y el Director de Proyectos necesita algo más que herramientas y teoría de probabilidad para poder manejarlas.

Así se desprende también en Lefley (1997), quien sostiene que, aunque el riesgo resulta de la incertidumbre, el riesgo y la incertidumbre no son teóricamente sinónimos. Riesgo implica situaciones donde la probabilidad de los resultados es conocida, mientras que la incertidumbre es lo contrario (es decir, cuando no se conoce la probabilidad de los resultados). Es obvio que existen diferentes opiniones con respecto a lo que se debe considerar como incertidumbre, riesgo y oportunidad.

Howell, Windahl, & Seidel (2010) utilizan el término Incertidumbre en su forma más amplia, como “*la falta de certeza*”. Por lo tanto, abarca no sólo los resultados indefinidos o probabilísticos, sino también la ambigüedad y la falta de claridad sobre los parámetros que caracterizan el proyecto.

Chapman & Ward (2004) buscan una definición más completa de incertidumbre y llegan a la conclusión que la “**incertidumbre que importa**” (*Uncertainty which matters*) es fundamental para todos los proyectos. No es sólo una cuestión de cuánto tiempo tardará un proyecto, o cuánto costará. La Incertidumbre incluye las partes que deben ser tenidas en cuenta, el alineamiento de sus motivos, el alineamiento de los objetivos del proyecto con los objetivos estratégicos corporativos, la conformación de los requisitos de diseño y de recursos, la elección y gestión de procesos adecuados y las implicaciones de riesgo asociado.

McLain (2009) dice que la incertidumbre es un importante reto para los gestores de proyectos pero que es difícil de cuantificar. A pesar de ello, algunas características del proyecto asociados con la incertidumbre son cuantificables y pueden proporcionar a los administradores de proyectos pistas sobre el grado de incertidumbre de un proyecto.

La incertidumbre implica una falta de información, por lo que es difícil de entender, y mucho más medir. Sin embargo, mientras que la incertidumbre no se puede medir directamente, se conocen las fuentes de incertidumbre de algunas características de la estructura de un proyecto y pueden ser identificadas, medidas y comparadas con las medidas de esas características en otros proyectos. Tal comparación permitiría una indicación relativa de la incertidumbre y ayudaría a planificar la gestión de los problemas asociados.

Otros autores se refieren a la incertidumbre como: un evento o situación que no se espera que ocurra (Perminova, Gustafsson, & Wikström, 2008); una generalidad ((Liu & Yetton, 2007), (Pich et al., 2002), (Ratbe, King, & Kim, 1999), (Wadeson, 2005), (Williams, 2005)); algunos autores piensan que está asociada a los objetivos o métodos del proyecto ((Crawford & Pollack, 2004), (Millington & Stapleton, 2005), (Pearson, 1990), (Turner & Cochrane, 1993)); otros que pudiera estar asociada al mercado o a la tecnología ((Jordan, Hage, Mote, & Hepler, 2005), (Shenhar & Dvir, 2007)); o bien que estuviera relacionada con el cambio ((Little, 2005)); o debida a las influencias externas ((Crawford & Pollack, 2004), (Little, 2005), (Ratbe et al., 1999)).

Si en el apartado anterior comprobábamos como los autores no han llegado a un consenso en la definición del concepto “riesgo”, lo mismo observamos con la definición de “incertidumbre”. Lo que parece claro es que todo proyecto presenta muchos tipos de incertidumbre que pueden proceder de las partes implicadas en el proyecto, de los objetivos estratégicos del proyecto, de los requisitos, recursos y de la gestión de los procesos,..., entre otras muchas fuentes. El Director de Proyecto deberá aplicar un proceso de Gestión adecuado para cada incertidumbre identificada, con objeto de evitar que pueda tener un impacto negativo en los objetivos del proyecto y/o con objeto de poder obtener un beneficio en el caso de incertidumbres que aporten oportunidades al proyecto.

Nos parece muy apropiada la clasificación de los distintos tipos de incertidumbre en: Incertidumbre aleatoria, epistémica y ontológica. Es necesario ser conscientes de que estos tipos de incertidumbre existen y pueden ser relevantes para el logro de los objetivos del proyecto.

Sabiendo que la incertidumbre no puede ser eliminada completamente, a través de procesos de aprendizaje, conocimiento e información compartida puede manejarse, y se puede conseguir reducirla significativamente.

3.1.3 Del concepto de Riesgo al concepto de Incertidumbre

Una vez realizado un recorrido por los distintos significados de los conceptos riesgo e incertidumbre que adoptan diversos autores, parece surgir una tendencia hacia la gestión de la incertidumbre de los proyectos, abarcando una perspectiva más amplia de lo que supondría centrarse únicamente en la gestión del riesgo.

S. Ward & Chapman (2003), y más tarde Perminova et al. (2008), sugieren que los procesos de gestión de riesgos del proyecto han tenido un enfoque limitado que restringe la contribución a la mejora de las prácticas de gestión de proyectos y, por tanto, del rendimiento del proyecto.

Los autores defienden la transformación de los procesos de gestión de riesgos existentes en procesos de gestión de la incertidumbre del proyecto.

Para hacer hincapié en la conveniencia de un enfoque equilibrado entre gestión de oportunidades y amenazas, el término “**gestión de la incertidumbre**” se utiliza cada vez más en lugar de los términos más establecidos de “gestión del riesgo” y “gestión de oportunidades”. Sin embargo, la gestión de la incertidumbre implica bastante más que la combinación de dichos procesos de gestión.

Gestión de la incertidumbre no sólo se trata acerca de la gestión de las amenazas percibidas, de las oportunidades y sus implicaciones. Se trata de identificar y gestionar todas las fuentes de incertidumbre que provocan y dan forma a nuestras percepciones de amenazas y oportunidades. Implica explorar y comprender los orígenes de la incertidumbre del proyecto antes de buscarlos para su gestión, sin ideas preconcebidas sobre lo que es deseable o indeseable.

El alcance de la incertidumbre en cualquier proyecto es considerable, y la mayoría de las actividades de Gestión de Proyectos se ocupan de la gestión de la incertidumbre desde la etapa más temprana a la fase final del ciclo de vida del proyecto, aclarando lo que puede ser hecho, decidir lo que hay que hacer, y asegurar que se hace.

La gestión eficiente y eficaz de los proyectos requiere de un manejo adecuado de todas las fuentes de incertidumbre. Los procesos de gestión de riesgos que adoptan un enfoque centrado en las amenazas no abordan muchas de estas fuentes de incertidumbre. Un proceso de gestión integral, preocupado por las amenazas y las oportunidades, lo hará mejor, pero todavía tiende a estar centrado en los acontecimientos o circunstancias inciertas. Un primer paso obvio sería modificar la terminología utilizada para la gestión del riesgo y sustituirla por otra orientada a la gestión de la incertidumbre, tal como proponen los autores, ampliando significativamente los procesos de pensamiento en la “identificación del riesgo”, que se conviertan en la “identificación de incertidumbre”. Un paso adicional sería modificar la redacción de las guías de gestión de riesgos, siempre que estas asocien el riesgo (incertidumbre) con amenaza.

La gestión de riesgos es un subproducto de la gestión de la incertidumbre. También son subproductos la obtención de mejoras en la comunicación, un mayor enfoque en los objetivos del proyecto, o prestar más atención a las cuestiones de análisis de valor.

Una de las tareas centrales en el proceso de gestión de la incertidumbre en los proyectos es la estimación y evaluación de dicha incertidumbre. Chapman & Ward (2000) describen un nuevo enfoque para la estimación y la evaluación de la incertidumbre diseñado para su facilidad de uso por los usuarios.

Interpretar la incertidumbre necesita ir más allá del cálculo de la variabilidad y de la explicación de los datos disponibles. Es necesario dirigir la ambigüedad e incorporar estructuras y conocimientos con un foco en la toma de las mejores decisiones posibles utilizando los datos disponibles, la información, el conocimiento y la definición de la estructura del proyecto.

Un aspecto importante de la estructura de dicha metodología es la necesidad de entender la incertidumbre en términos de fuentes de incertidumbre. Se trata de distinguir entre qué es útil cuantificar y cuál es el mejor tratamiento, como una condición o asunción en términos de toma de decisiones efectivas.

De la misma opinión son otros autores. Por ejemplo Atkinson, Crawford, & Ward (2006) quienes afirman que se requiere un enfoque más explícito sobre la gestión de la incertidumbre en el marco de la Gestión de Proyectos. Esto

implica que es necesario prestar especial atención a las partes involucradas en un proyecto y sus respectivos objetivos.

Por otra parte, Jaafari (2006) considera que la gestión de los riesgos e incertidumbre se debe considerar como una operación continua en tiempo real, integrado con otras operaciones de Gestión de Proyectos, para facilitar la consecución de los objetivos estratégicos en que se basa el proyecto. El proceso de gestión de la incertidumbre debe ser continuo, integral y llevado a cabo en tiempo real para ser de valor a los gestores de proyectos. La situación ideal del proyecto sería disponer de una medida que represente la incertidumbre del mismo. Esto podría ser evaluado frente a las variables del proyecto y usado como un elemento de decisión para la reducción del riesgo a través del ciclo de vida del proyecto.

Finalmente, Chapman & Ward (2003b) y Chapman & Ward (2004) insisten en la importancia de la incertidumbre en los proyectos focalizando su atención en todas las posibles fuentes de incertidumbre que rodean al proyecto. No es una cuestión sobre cuanto debería costar un proyecto o cuanto debería durar. Debería incluir las partes involucradas en el proyecto, la motivación de las mismas, la alineación de los objetivos del proyecto con los objetivos estratégicos corporativos, determinar los requisitos de diseño y de los recursos, la elección y la gestión de los procesos adecuados,...

Las mejores prácticas en la gestión del riesgo del proyecto se ocupan de la gestión de la incertidumbre de una manera eficaz y eficiente. Para ello tenemos que entender dónde es importante la incertidumbre, por qué es importante, qué se podría hacer con ella, y quién debería tomar la responsabilidad de gestión y financiera de la misma.

3.1.4 Fuentes de Riesgo. Causas de Incertidumbre

El alcance de la incertidumbre en cualquier proyecto es considerable, y la mayoría de las actividades de Gestión de Proyectos se ocupan de la gestión de la incertidumbre desde la etapa más temprana del ciclo de vida del proyecto, a la fase final, aclarando lo que puede ser hecho, decidir lo que hay que hacer, y asegurar que se hace (S. Ward & Chapman, 2003). La incertidumbre en el puro sentido inglés de “falta de certeza” se refiere a “**variabilidad**”, en relación con

las medidas de desempeño, como el coste, la duración, o la calidad. También se trata de “ambigüedad” asociado a la falta de claridad debido al comportamiento de los participantes relevantes del proyecto, a la falta de datos, a la falta de detalle, a las fuentes de preocupaciones conocidas y desconocidas, y a la ignorancia acerca de la cantidad de esfuerzo que vale la pena gastar para aclarar la situación.

En el contexto del proyecto, esos aspectos de incertidumbre contribuyen a la incertidumbre en cinco áreas: variabilidad asociada con las estimaciones de los parámetros del proyecto, variabilidad asociada con la base de las estimaciones de los parámetros del proyecto, asociada al diseño y la logística, asociada a los objetivos y prioridades, y variabilidad asociada a las relaciones entre los interesados (S. Ward & Chapman, 2003). Todas estas áreas de incertidumbre son importantes pero, en general, los elementos se vuelven fundamentalmente más importantes para la ejecución del proyecto a medida que se avanza en la lista.

- Fuentes de incertidumbre relacionadas con la **variabilidad en las estimaciones** son la magnitud de los parámetros del proyecto como tiempo, coste y calidad relativa a las actividades particulares. Las causas de esta incertidumbre pueden estar debidas a falta de especificaciones claras de lo que se requiere; novedad, falta de experiencia de esta actividad en particular; complejidad en términos de la cantidad de factores que influyen e interdependencias entre estos factores; análisis limitado de los procesos implicados en la actividad; posible aparición de acontecimientos o condiciones particulares que pudieran tener algún efecto (incertidumbre) sobre la actividad.
- Fuentes de incertidumbre relacionadas con la **variabilidad en la base de los estimados**, se producen por las partes que intervienen en el proyecto. Por ejemplo, a menudo es necesario utilizar estimaciones subjetivas de probabilidades en ausencia de datos estadísticos relevantes suficientes para determinar probabilidades objetivamente. La incertidumbre sobre la base de los estimados debe depender de quién los produce, en qué forma se producen, por qué, cómo y cuándo fueron producidos, desde qué recursos y experiencias base y la extensión de cualquier desviación en los estimados. El problema de

la incertidumbre acerca de las condiciones que sustentan las estimaciones es aún mayor en relación con las estimaciones de la probabilidad o de la ocurrencia de un evento. Un gran porcentaje de aquellos que utilizan el análisis probabilístico en proyectos, a menudo, no logran llegar a enfrentarse con la naturaleza condicional de las probabilidades y medidas asociadas utilizadas para la toma de decisiones y el control.

- Fuentes de incertidumbre relacionadas con la **variabilidad sobre el diseño y la logística** se producen, principalmente, en la fase de concepción del ciclo de vida del proyecto, donde la naturaleza de los entregables del proyecto y el proceso para su producción son incertidumbres fundamentales. En principio, gran parte de esta incertidumbre se elimina en las etapas previas a la ejecución proyecto.
- Las implicaciones de la incertidumbre relacionadas con la **naturaleza de los objetivos y las prioridades relativas** necesitan ser manejada al igual que la incertidumbre acerca de lo que es alcanzable. Un objetivo para la mejora del rendimiento del proyecto presupone claridad acerca de los objetivos del proyecto y de las prioridades relativas entre los objetivos y los compromisos aceptables. Morris & Hough (1987) abogan por la importancia de fijar objetivos claros y criterios de actuación que reflejan los requisitos de todas las partes, incluidos los *stakeholders* que no siempre son reconocidos como participantes (por ejemplo autoridades reguladoras, clientes futuros).
- Finalmente, una fuente omnipresente de incertidumbre, relacionada con las dependencias fundamentales entre las partes del proyecto, es la multiplicidad de personas, unidades de negocio y organizaciones que participan en un proyecto. La participación de múltiples partes en un proyecto introduce incertidumbre derivada de la ambigüedad con respecto a especificación de las responsabilidades; percepciones de los roles y responsabilidades; comunicación a través de las interfaces; la capacidad de las partes; las condiciones contractuales y de sus efectos, y debido a los mecanismos de coordinación y control.

Por otra parte, algunos riesgos clave del proyecto están asociados con el **proceso de gestión del proyecto** en sí. S. Ward & Chapman (1995) observan que al considerar los riesgos asociados a un proyecto, la atención se centra a

menudo en los riesgos específicos de naturaleza física del proyecto. Estos procesos de riesgos genéricos se presentan en todos los proyectos, a pesar de su naturaleza física, y así ellos merecen una atención especial. Una gestión de riesgos más efectiva podría ser posible si esos riesgos fueran identificados y considerados de un modo más completo y sistemático. Para ello, los autores desarrollan una estructura suficientemente detallada para resaltar las áreas importantes del proceso de riesgo. Debería ayudar a asegurar que el proceso de gestión de riesgos está direccionado completamente sobre el ciclo de vida del proyecto, y que las interdependencias y la relevancia de los riesgos son más rápidamente reconocidas.

Durante la identificación de los riesgos hay una tendencia natural a omitir simplemente la identificación de algunos riesgos debido a que sus impactos se consideran de carácter leve. Esto tiene peligros obvios, ya que los problemas aparentemente menores, que no tienen una respuesta efectiva, pueden pasar desapercibidos; el efecto combinado de un gran número de riesgos aparentemente menores pueden ser subestimados. S. C. Ward (1999) afirma que, a menudo, los riesgos reales en cualquier proyecto son los que no se logran identificar.

Cuando el riesgo se identifica por primera vez, al menos debe asignarse una respuesta con el objetivo de describir el impacto del riesgo identificado, la respuesta por defecto sería “no hacer nada y aceptar el riesgo” (que podría no ser viable).

En la fase de evaluación del riesgo, una apreciación de qué riesgos son importantes puede ayudar al Director de Proyecto a explorar riesgos particulares con más o menos detalle, a saber cuánto tiempo emplear en el desarrollo de respuestas a los riesgos particulares y en saber la cantidad de recursos que merece la pena invertir en respuestas a dichos riesgos particulares.

La fase de gestión se centra principalmente en el seguimiento de los cambios en la exposición al riesgo y la implementación de respuestas planificadas.

Un aspecto importante de la priorización de los riesgos en la fase de gestión consiste en seguir la evolución de los riesgos y los avances en la implementación de las respuestas implementadas. La importancia relativa de los riesgos cambia

inevitablemente con el progreso del proyecto, y estos cambios necesitan ser monitorizados.

Los **registros de riesgos** son, sin duda, una herramienta de gestión útil, pero se deben tratar con cuidado si van a ser la base principal para determinar las prioridades en el proceso de gestión de riesgos. Se requiere la consideración de algo más que una simple caracterización de probabilidad de ocurrencia e impacto.

En relación con el punto anterior, Hillson (2003) opina que la **identificación de riesgos**, a menudo, no produce más que una larga lista de riesgos, que no pueden ser entendidos ni manejados. La lista puede ser priorizada para determinar qué riesgos deberían ser manejados primero, pero esto no proporciona una visión de la estructura del riesgo dentro del proyecto.

El mejor camino para manejar una larga lista de datos es estructurar la información para ayudar en la comprensión. Para la gestión de riesgos, esto se puede lograr mediante la **Estructura de Desagregación de Riesgos** (RBS – *Risk Breakdown Structure*).

Al implementar el desglose de riesgos, observamos que todo proyecto está sujeto a incertidumbres que surgen desde múltiples fuentes, incluidas técnicas, de gestión, medioambientales, comerciales,... Fuentes de riesgo que pueden ser externas al proyecto u organización (como los riesgos del mercado, acciones de los competidores, reguladores) o internas (que surgen de la gente, los procesos, los procedimientos, cultura organizacional,..).

Los Directores reconocen la presencia de incertidumbre en las estimaciones de varios parámetros de sus proyectos, pero generalmente eluden el análisis requerido (que puede ser exigente) mediante la sustitución de las variables aleatorias por sus promedios, lo que conlleva frecuentemente a un error en dicha estimación. Elmaghraby (2005) nos resalta el error que se comete al utilizar el **valor medio de las variables aleatorias** en la estimación de los parámetros del proyecto. No hay nada práctico sobre la sustitución de la aleatoriedad con un equivalente cierto en forma de media si la incertidumbre está inherentemente presente en las estimaciones realizadas. Trabajar con los promedios (o cualquier otra estadística, como la moda o la mediana) erramos en dos aspectos: primero, se ignora por completo la incertidumbre que subyace en el proceso, y en segundo

lugar, ofrece una visión estática de la materia que no tiene en cuenta la flexibilidad administrativa.

Barber (2005) identifica una clase de riesgo que es común, importante y sin embargo, mal gestionada en los proyectos: los riesgos generados internamente. Surgen dentro de un equipo de Gestión de Proyectos o de su organización, de sus sistemas de gestión, su cultura y de las decisiones adoptadas. Incluso cuando un proyecto aplica procesos de gestión de riesgos reconocidos, y los riesgos parecen ser bien gestionados, la investigación demuestra que los **riesgos generados internamente** son un asunto completamente diferente.

Cuando un equipo de proyecto tiene menos personal de lo que necesita para funcionar de manera efectiva, se esfuerza por hacer frente a las limitaciones burocráticas financieras, o no está respaldado por la alta dirección, el proyecto puede tener menos éxito del esperado e incluso puede fallar. Estas son fuentes de riesgo para el proyecto, pero no se puede culpar al mundo exterior, ni a la naturaleza de la tarea. Surgen de la forma en que el proyecto y su organización se configuran y operan. Los riesgos generados internamente son aquellos que tienen su origen dentro de la propia organización, que surgen de sus normas, políticas, procesos, estructuras, acciones, decisiones, comportamientos o culturas.

Los riesgos generados internamente pueden adoptar muchas formas, pero a partir de la definición parece probable que muchos surjan o se refieran a la conducta humana. Incluso cuando la fuente directa de un riesgo generado internamente parece residir en la operación de un proceso o de una estructura, es probable que la gente participe de alguna manera, porque es la gente la que diseña, posee y opera las estructuras y procesos. Si, con frecuencia, el comportamiento humano está involucrado, también podríamos esperar que muchos riesgos generados internamente sean difíciles de cuantificar en términos de probabilidad e impacto.

Chapman (2006) opina que la “**ignorancia deliberada**” sobre aspectos de la incertidumbre está extendida en la práctica común de la gestión de riesgos, posiblemente porque la mayoría de las personas no se sienten cómodas con los conceptos o herramientas para hacer frente a la incertidumbre, y ellos no están

preparados para hacer frente a cualquier cosa que pueden evitar cuando no tienen los conceptos o herramientas para hacerle frente.

Las fuentes de incertidumbre para Atkinson et al. (2006) son muy amplias y tienen un efecto fundamental en los proyectos y la Gestión de Proyectos. Estas fuentes no se limitan a los eventos potenciales, sino que también incluyen la falta de información, la ambigüedad, las características de las partes del proyecto, las compensaciones entre mecanismos de confianza y de control y los diversos programas en diferentes etapas del ciclo de vida del proyecto.

Destacan tres áreas clave de incertidumbre: la incertidumbre asociada con la estimación, la incertidumbre asociada con las partes del proyecto, y la incertidumbre asociada con las etapas del ciclo de vida del proyecto.

Un aspecto evidente de la incertidumbre en cualquier proyecto se refiere a las **estimaciones de la potencial variabilidad** en relación con las medidas de desempeño como el coste, la duración, o la calidad, relacionados con las actividades planificadas.

La incertidumbre resulta, entre otros, de la imprecisión, la ambigüedad y las contradicciones asociadas a la falta de claridad por la falta de datos, detalles incompletos e inexactos, la falta de estructura para examinar las cuestiones, fuentes de preocupaciones conocidas y desconocidas, control limitado de participantes relevantes del proyecto, y la ignorancia acerca de la cantidad de esfuerzo que vale la pena gastar para aclarar la situación.

Con respecto a la **incertidumbre asociada con los participantes**, en muchos proyectos, especialmente en los grandes, las cuestiones clave de rendimiento están a menudo menos relacionadas con la tecnología y más con la incertidumbre introducida por la existencia de múltiples partes involucradas y de la infraestructura de Gestión de Proyectos asociados.

Los empleados y otros agentes del propio proyecto son esenciales en la consecución de los objetivos pero a menudo contribuyen a aumentar la incertidumbre sobre el rendimiento futuro.

En cualquier contexto organizacional, en el que se incluyen los proyectos, la introducción de agentes es propenso a la aparición de los siguientes problemas: la selección adversa, riesgo moral y la asignación de riesgos. La incertidumbre introducida por estos tres factores, puede ser importante.

En una organización, es probable que los diferentes participantes que intervienen tengan diferentes objetivos de rendimiento, o diferentes prioridades y percepciones de los objetivos. Una consecuencia de esto es que los diferentes participantes tendrán diferente percepción del riesgo asociado con esos objetivos y, por tanto, adoptarán diferentes estrategias para manejar la incertidumbre relativa a ellos.

La literatura en gestión de riesgos y las denominadas “**mejores prácticas**” tienden a suponer los procesos de análisis y gestión de riesgo como actividades separadas, para alertar a los directores de las probables fuentes de riesgo e incertidumbres (Jaafari, 2006). En proyectos de gran envergadura, las fuentes de riesgo están típicamente identificadas: riesgo de promoción, mercado, política, técnica, financiación, medio ambiente, estimación de coste, programación, operación, organización, integración y riesgos de fuerza mayor.

Los proyectos actuales están sujetos a incertidumbre debido a tres principales fuentes: factores externos, cambios en los objetivos de negocio y métodos pobremente definidos para la realización de los proyectos. Este último factor no es solo debido al escaso conocimiento y falta de experiencia del equipo de proyecto sino debido también a la complejidad y falta de repetición de los proyectos (los proyectos son, por definición, únicos e irrepetibles). Ejemplos de factores externos contienen presiones competitivas y comerciales, choque social, normas y reglas políticas e institucionales con proyectos financieros y objetivos técnicos, cambios de requerimientos por parte de los *stakeholders* del proyecto,...

McLain (2009) diferencia distintos tipos de incertidumbre y asocia cada tipo con estructuras de proyecto específicas, comportamientos o resultados. Identifica el tipo de incertidumbre evaluando la calidad de la información disponible del proyecto.

Incetidumbre predecible ocurre cuando hay influencias o comportamientos identificables y comprensibles, a pesar de la incertidumbre sobre el futuro estado del proyecto. **Incetidumbre impredecible** describe un proyecto con desconocidos de lo que no se conoce (“*unknown-unknowns*”) y falta de información sobre posibles estados futuros del proyecto. Para formas menos extremas de incertidumbre como la variabilidad o la incertidumbre predecible, se pueden describir y cuantificar algunas características estructurales de los

proyectos o de las organizaciones de los proyectos (falta de familiaridad y complejidad), haciendo esas características poderosas para la incertidumbre de los proyectos.

La **falta de familiaridad**, también llamada novedad, es otra fuente de incertidumbre y se asocia a menudo con los métodos y tecnologías de proyectos mal definidos.

La falta de familiaridad se refiere al grado en el que la tecnología o el trabajo que se hará en un proyecto no han sido previamente detectados o no se ha encontrado en la forma en la que aparece en el proyecto. Los cambios en los factores internos y externos al proyecto, tales como cambios en la tecnología de producción, personal, métodos de proyecto, los clientes, las políticas de la organización, o los competidores, todos ellos contribuyen a la falta de familiaridad.

Existen dos fuentes básicas de incertidumbre en la estructura del proyecto que son el número de actividades del proyecto y la duración total del proyecto. El primero es una indicación de la complejidad, y el segundo determina la oportunidad para cambios y eventos imprevistos.

Otras tres fuentes adicionales de incertidumbre son: la información compleja de dependencias entre las actividades, la falta de conocimiento acerca de la duración de la actividad, y el trabajo del proyecto novedoso.

La **complejidad** y la incertidumbre son a menudo considerados como independientes ((Ratbe et al., 1999), (Shenhar & Dvir, 2007)). Sin embargo autores como Pich et al. (2002) y Williams (1999) consideran que la complejidad y la incertidumbre son aspectos de una misma variable. Como señala Williams, (2005), los problemas de Gestión de Proyectos alrededor de la complejidad centran la capacidad de comprender lo que está pasando, y por lo tanto de predecir la relación entre las entradas y las salidas. La falta de previsibilidad es sinónimo de incertidumbre, y por lo tanto la complejidad se convierte en un factor de incertidumbre.

La **urgencia** impulsa la incertidumbre de una manera similar a la complejidad, limitando el recurso disponible (en este caso el tiempo). Las decisiones se toman con la información más limitada. La incertidumbre puede ser pensada como la probabilidad de que ocurran acontecimientos inesperados.

En el extremo de la incertidumbre (el caos) nada se puede predecir: la probabilidad de los eventos inesperados que ocurren es 100%. La criticidad mide el efecto o consecuencias de esos eventos inesperados, que pueden ser pérdidas si algo indeseado e inimaginable sucede. A diferencia de la complejidad y la urgencia, la criticidad es independiente de la incertidumbre.

Kutsch & Hall (2010) investigan cómo la **irrelevancia** (la ignorancia deliberada de la información relacionada con los riesgos) se manifiesta en el contexto de la gestión de riesgos del proyecto y cómo se limita la eficacia percibida de la gestión del riesgo del proyecto. Los investigadores se han concentrado cada vez más en la persecución de la certeza y como superar la ignorancia, la cual es citada a menudo como la falta de conocimiento verdadero. La **ignorancia** es un concepto multidimensional con varias facetas. Una distinción útil se puede hacer entre la ignorancia deliberada, impulsada por factores sociales, y la ignorancia como un impulso afectivo, lo que significa que está más allá de nuestro control, tanto sistémicamente como cognitivamente.

El concepto de error incluyendo sus diferentes sub-conceptos, como la distorsión, se relaciona con la connotación pasiva del conocimiento incompleto (ignorando). El conocimiento perfecto sobre el estado futuro de un entorno no es posible y el error siempre se producirá, a pesar de los intentos de corrección a través de la clarificación y exactitud. Por el contrario, la ignorancia deliberada se define como la irrelevancia que puede ser gestionada a través de la aplicación de los mecanismos de defensa específicos. Un sub-concepto adicional es tabú. Tabúes reflejan una restricción moral y/o de precaución puesta en acción basada en lo que se considera inapropiado.

Hillson (2012c) aporta su visión sobre las distintas fuentes de riesgo y como prepararse para los distintos riesgos que puedan aparecer. Basándose en el informe **IRGC (The International Risk Governance Council)**, identifica doce factores que pueden convertir los riesgos desconocidos en riesgos imprevistos. Sugiere que direccionando los factores causales, nos podemos preparar mejor para los riesgos que se presenten, reduciendo su efecto si aparecen.

Los doce factores son: riesgos científicamente desconocidos, márgenes reducidos, círculo vicioso, vulnerabilidad variable, conflicto de intereses,

dinámicas sociales, avances tecnológicos, incidencias basadas en tiempo, comunicación inadecuada, información desbalanceada, motivadores que no son de ayuda y comportamiento malintencionado.

Entender estas causas genéricas nos puede ayudar a diseñar respuestas de riesgo proactivas y preventivas.

Por otra parte Hillson (2012a) nos aporta otro punto de vista acerca de los posibles factores de riesgo, en este caso después de haber definido “riesgo estratégico” como cualquier incertidumbre que si ocurre afectará al alcance de los objetivos estratégicos.

3.1.5 Categorías de Riesgo

En muchas organizaciones de ingeniería, la evaluación de riesgos se centra inevitablemente en riesgos de ingeniería (técnicos) con la posibilidad de que se consideren también los riesgos financieros si, según figure en el contrato, las opciones de financiación aumentan la probabilidad de éxito (Ackermann, Eden, Williams, & Howick, 2007). Como tal, un registro de riesgos tradicionales se desarrollará mediante la identificación de los elementos de riesgo técnico y la evaluación o estimación de la probabilidad de que ocurra el evento y el impacto esperado.

Aun así, a menudo existen problemas con esta forma de trabajar. En primer lugar, los registros de riesgos se convierten en un trámite burocrático en lugar de ser tratado como un ejercicio valioso. En segundo lugar, y posiblemente como resultado de este comportamiento y el enfoque en riesgos de ingeniería (técnicos), los riesgos identificados en el registro tienden a abordar sólo una pequeña proporción de todos los tipos de riesgo.

Los autores de este trabajo han sido capaces de identificar y analizar un conjunto mucho más amplio de riesgos que ocasionaron excesos de costes significativos en los proyectos analizados. Otras categorías de riesgo identificadas son:

- Política (gobierno, los mecanismos de planificación, mecanismos de seguridad).
- Cliente (los cambios de orientación estratégica).

- Socio y proveedor (dificultades de la colaboración y la transferencia de riesgo).
- Personas (suposiciones sobre la disponibilidad y competencias).
- Reputación (respuesta a las coaliciones de actores inesperados).
- Mercado (cambiando la naturaleza de los competidores, y por lo tanto, las expectativas del cliente).
- Financieros (tipos de cambio, etc.).

Estas categorías de riesgo a menudo no están consideradas dentro del contexto de riesgos técnicos o, al menos, no son considerados formalmente.

Podría ser argumentado que esto es debido a la inherente naturaleza “suave”, donde el registro de riesgos no tiene lugar para ellos, y la cultura de la organización (a menudo predominantemente enfocada en la dimensión ingenieril) no provee un foro de debate para el tratamiento de estos riesgos. Sin embargo, esas categorías “suaves”, y su interacción entre ellas, pueden tener un impacto mayor en el proyecto que las categorías tradicionales.

Se demuestra que la interacción entre los diferentes tipos de riesgo es lo que puede causar el mayor daño a un proyecto. De hecho, una simple categorización de los riesgos puede ser muy inútil porque las categorías pueden ser vistas como independientes entre sí. Además de considerar una amplia gama de categorías de riesgo, es importante también considerar más que los propios riesgos, también su impacto en los otros.

Khedr (2006) analiza las categorías de riesgos en construcción, concluyendo que las principales son los riesgos físicos, riesgos relatados con el medio ambiente, riesgos legales y contractuales, riesgos de rendimiento, riesgos financieros y económicos y riesgos políticos y públicos.

Hillson (2003) opina que la identificación de riesgos, a menudo, no produce más que una larga lista de riesgos, que no pueden ser entendidos ni manejados. La lista puede ser priorizada para determinar qué riesgos deberían ser manejados primero, pero esto no proporciona una visión de la estructura del riesgo dentro del proyecto.

El mejor camino para manejar una larga lista de datos es estructurar la información para ayudar en la comprensión. Para la gestión de riesgos, esto puede ser logrado mediante la **Estructura de Desagregación de Riesgos**

(RBS – *Risk Breakdown Structure*), una estructura jerárquica de riesgos en el proyecto. La *RBS* puede ser usada para estructurar y dirigir el proceso de gestión del riesgo.

El *Project Management Institute* define la Estructura de Desagregación del Trabajo (WBS - *Work Breakdown Structure*) como un entregable orientado al agrupamiento de elementos del proyecto que organizan y definen el trabajo total del alcance del proyecto.

La Estructura de Desagregación de Riesgos (RBS) ha sido definida como una fuente orientada a la agrupación de riesgos que organizan y definen el riesgo total expuesto de un proyecto o negocio. Cada nivel inferior representa un incremento de la definición detallada de la fuente de riesgo. La RBS puede ser de ayuda inestimable para el entendimiento de las caras del riesgo o negocio. Puede ser usada como una lista de mensajes para asegurar la completa cobertura durante la fase de identificación del riesgo.

Por último, Hillson (2013a) analiza varias categorías de riesgo, enfocadas a la realización de negocios internacionales, aunque aplicables a cualquier otro tipo de operaciones, donde la empresa desarrolla actividades en este marco global.

La clasificación que el autor desarrolla es la siguiente:

- Riesgos financieros y económicos: identificando varios factores como precios y fluctuaciones; madurez de los sistemas bancarios,
- Riesgos ambientales: cuyos factores podrían ser los desastres naturales o producidos por el hombre.
- Riesgos geopolíticos relativos a la política, diplomacia, conflictos, delitos y gobierno.
- Riesgos societarios: relativos a la dinámica de la población, estabilidad social y supervivencia humana.
- Riesgos tecnológicos: dependen de la naturaleza específica del negocio.

3.1.6 Herramientas para la gestión del Riesgo

La gestión de riesgos es uno de los procesos clave de Gestión de Proyectos (Raz & Michael, 2001), por lo que existen numerosas herramientas disponibles para apoyar las diversas fases del proceso. Cualquier proceso de gestión de riesgos requiere herramientas para su implementación.

La adopción de herramientas de análisis, planificación, control o administración implica una cierta inversión, que en algunos casos puede ser bastante significativa.

Este coste representa el esfuerzo necesario, tanto a nivel personal como a nivel organizacional, para entender y para aprender a utilizar la herramienta, y para la adquisición de la infraestructura necesaria (conocimientos técnicos, el cálculo de las ayudas, las bases de datos, procedimientos de operación, etc.). Es una cuestión de gran relevancia para cualquier individuo u organización teniendo en cuenta la adopción o mejoramiento de un proceso de gestión de riesgos sería conocer qué herramientas pueden proporcionar los mayores beneficios a la organización.

Es interesante notar que ciertas herramientas que normalmente están asociados con la gestión de riesgos, tales como árboles de decisión, análisis de árbol de fallos y diagramas de influencia, se han utilizado rara vez o no se han utilizado en absoluto por los gestores de riesgos del proyecto.

Raz & Hillson (2005) exponen un amplio listado de herramientas y técnicas utilizadas para la identificación de riesgos. La mayoría de las herramientas y técnicas son descriptivas y cualitativas en su naturaleza, y hay muy pocas herramientas basadas en técnicas estadísticas o matemáticas.

3.2 Escuelas de Gestión de Riesgos

Zhang (2011) realiza una revisión bibliográfica sobre las distintas concepciones que han tenido los investigadores sobre el riesgo. La investigación de riesgos, en general, se puede clasificar en dos escuelas: el riesgo como un hecho objetivo y el riesgo como una construcción subjetiva. Ambas escuelas tienen diferentes definiciones de riesgo, diferentes dimensiones epistemológicas, diferentes métodos de análisis, y tienden a recomendar diferentes políticas de gestión de riesgos.

Además de las dos escuelas de riesgo, Zhang (*op.cit*) clasifica las investigaciones en cuatro grupos: sistema de Gestión de Proyectos, apreciación subjetiva, comportamiento irracional en la gestión del riesgo, y de construcción subjetiva. El autor describe y analiza los supuestos básicos, puntos de vista y

tendencias, generalmente en poder de cada grupo, indicando la posición en la que se encuentra ubicado cada grupo dentro de las dos escuelas.

La escuela de **riesgo como un hecho objetivo** considera que el riesgo existe objetivamente y es probabilístico epistemológicamente. Los análisis de riesgos son objetivos, técnicos, las actividades neutrales y las políticas de gestión, realizadas sobre la base de los conocimientos producidos a partir de un análisis de riesgo objetivo, son el resultado de la toma de decisiones racional.

Las consecuencias del riesgo involucran impactos negativos en un sentido físico, como la mortandad, salud, seguridad y el medio ambiente, los cuales generan pérdidas (resultados negativos). Los riesgos se consideran epistemológicamente probabilístico, y algunos partidarios de esta escuela consideran que la probabilidad es la dimensión epistemológica única y la más esencial del riesgo.

La objetividad del análisis de riesgos también se puede mostrar en la comparación de los diferentes riesgos. Esta escuela suele aplicar el producto de la probabilidad e impacto, o sus variantes, como la base para la evaluación de riesgos. Esto ofrece un criterio de medida común y objetivo y hace posible la comparación de los diferentes tipos de riesgo.

La escuela de **riesgo como una construcción subjetiva** considera que el riesgo no es un fenómeno objetivo, sino una construcción mental subjetiva de las personas que están preocupadas por el desarrollo en el futuro. Es una reacción emocional, moral o política, a su experiencia o a las circunstancias. La interacción y la interconexión entre los eventos, las circunstancias y las reacciones de la gente contribuyen a la ocurrencia de riesgos.

La coexistencia de múltiples dimensiones epistemológicas de riesgo significa que la probabilidad no es la única herramienta para analizar el riesgo. Esta escuela considera que el análisis de riesgo no puede ignorar la influencia de factores como la experiencia, la organización, la sociedad o la cultura. Los partidarios de esta escuela consideran que la epistemología de riesgo no se limita a la probabilidad. En realidad, los conceptos de riesgo adoptado por los tomadores de decisiones o los observadores pueden ser muy diferentes de los de un sentido probabilístico bajo algunos contextos de toma de decisiones.

Por otra parte, el autor determina cuatro grupos de estudios de riesgo en Dirección de Proyectos.

Sistema de Gestión de Proyectos. Consideran el proyecto como un sistema temporal con ciertos objetivos predefinidos (que están libres de valores de las personas y por lo tanto existen objetivamente). Este grupo considera que el riesgo es epistemológicamente probabilístico. En general, utilizan el producto de la consecuencia del riesgo y la probabilidad o sus variantes para evaluar la importancia de los riesgos, lo que refleja la universalidad de la epistemología de probabilidad en los estudios de riesgos de los proyectos.

Percepción subjetiva. El grupo de la percepción subjetiva se ve en un proyecto como un sistema y observa los riesgos desde el punto de vista del Director del Proyecto. Sin embargo, incorpora los factores psicológicos y los intereses de la organización en el análisis de riesgo. Este grupo considera que la percepción del riesgo es subjetiva aunque el riesgo en sí, es objetivo. La probabilidad se considera como la principal dimensión epistemológica de riesgo. La percepción subjetiva se refleja en la valoración y evaluación de los riesgos del proyecto.

Comportamiento irracional en la Gestión de Riesgos. Existen aspectos "irracionales" de análisis y gestión de riesgos en el mundo real. Esto lleva a nuevas reflexiones sobre la idoneidad de la forma de pensar de la gestión racional de los riesgos en el contexto de la gestión de proyectos. Existen Directores de Proyectos que, a veces, no gestionan "racionalmente" los riesgos, a pesar de que los han identificado. Más bien, con o sin intención (impulsado por la cultura), impiden, evitan, retrasan, e ignoran los riesgos.

Construcción subjetiva. Debido a que la definición y la existencia de un fenómeno de riesgo dependen de los observadores y las perspectivas que ellos elijan, la evaluación del riesgo no es objetiva, sino subjetiva.

Tanto el sistema de Gestión de Proyectos como el de percepción subjetiva tienen la intención de analizar los riesgos desde la perspectiva del gestor de un proyecto. Los resultados producidos a partir de ellos (por ejemplo, modelos, métodos y procedimientos) pueden dirigir a los directivos sobre cómo analizar y gestionar los riesgos de forma más racional y eficiente. Son importantes para el

desarrollo y la difusión de las mejores prácticas de gestión del riesgo del proyecto.

También es importante reconocer la existencia de construcciones subjetivas del riesgo en la Gestión de Proyectos. El análisis y la gestión de riesgos se llevan a cabo por las personas, y puede ocurrir que no se comporten de acuerdo a las prácticas habituales de gestión de riesgos, cuando tienen juicios alternativos sobre qué riesgos son. Igualmente, el éxito del proyecto depende del tiempo y de los diferentes grupos de interés que, por lo general, tienen puntos de vista diferentes sobre el mismo, en cada una de las diferentes fases.

3.3 Metodologías de Gestión de Riesgos

Chapman & Ward (2003b) nos muestran una perspectiva histórica sobre los distintos procesos de gestión de riesgos, desde los años 50 hasta los 90.

La Técnica de Revisión y Evaluación de Programas, comúnmente abreviada como **PERT** (*Program Evaluation and Review Technique*) fue creada originalmente a finales de los años 50, para el proyecto del misil Polaris, siendo la primera técnica de planificación de proyectos formales para abordar los riesgos del proyecto y la incertidumbre en un marco de planificación basado en las actividades. La "técnica" PERT implica un modelo que consiste en una red de actividades donde se asume que las distribuciones de probabilidad de duración de las actividades son definidas por una aproximación a una función de distribución. En el uso de este modelo, en su forma original, la duración prevista del proyecto se define por una ruta crítica esperada, utilizando un algoritmo estándar **CPA** (*Critical Path Analysis*) con duraciones esperadas para cada actividad. Como resultado se obtiene la duración del proyecto que se supone que muestra una distribución de probabilidad normal, con una varianza asociada definida por la suma de las varianzas de las actividades en la ruta crítica esperada. La "técnica" PERT también implica un proceso (o método) que incluye los siguientes pasos: descomponer el proyecto en las actividades, definir las relaciones de precedencia, diagramar las actividades y estimar las distribuciones de probabilidad de duración de cada actividad.

En la década de 1960, a parte del método PERT, se utiliza software de simulación de Monte Carlo para evitar el supuesto de que sólo un camino puede ser crítico y que la duración de distribución de probabilidad del proyecto debe ser normal. Este tipo de software también permite la utilización de distintos tipos de funciones de distribución de probabilidad para la duración de la actividad.

No obstante y a pesar de la inclusión de esta modificación, el método PERT todavía es utilizado por muchas organizaciones, aunque es una aproximación primitiva para la planificación del proyecto.

A principios de la década de 1960, muchos autores estaban discutiendo por el uso de árboles de decisión incorporados en ambos modelos determinísticos CPA/CPM y modelos probabilísticos PERT. Las ramas de decisión en los modelos deterministas CPA reflejan formas alternativas de actividades que se aproximan y actividades fijas, incluso cuando la duración de la variabilidad no es un problema. **GERT** (*Graphical Evaluation and Review Technique*) es una etiqueta que se utiliza para describir este tipo de modelo. GERT permite que las actividades sean abordadas período por período de tiempo, mejorando en gran medida la capacidad para comprender los procesos repetitivos simples y complejos, para dar cabida a las respuestas de contingencia que no esperan hasta que se haya completado una actividad, y hacer frente a las dependencias de tiempo.

A partir de 1975, C.B. Chapman, durante sus trabajos en *BP International*, desarrolló modelos probabilísticos para la planificación y asignación de costes en proyectos, que integraba en los modelos GERT, los conceptos de árboles de fallos y árbol eventos, utilizados para análisis de seguridad (Nureg, 1975). **SCERT** (*Synergistic Contingency Planning and Review Technique*) fue una etiqueta que se utilizó para describir este modelo en la tradición PERT y GERT

El enfoque SCERT proporcionaba una comprensión detallada de donde provenían la incertidumbre y el riesgo asociado. Permitió dar respuestas específicas para una determinada fuente de incertidumbre o, generales, en el sentido de lidiar con el efecto residual de las combinaciones de las fuentes de incertidumbre tras las respuestas específicas.

El proceso SCERT tenía cuatro fases: ámbito de aplicación, estructura, parámetros y manipulación.

A mediados de la década de los 90 la *Association for Project Management* Británica (APM) comenzó a desarrollar la *Project Risk Analysis and Management (PRAM) Guide* (P. Simon et al., 1997). Esta metodología es una síntesis que recoge la experiencia adquirida a lo largo de los años en gestión de riesgos del proyecto por un gran número de organizaciones del Reino Unido y que habían utilizado con éxito durante años.

El proceso PRAM se basa en una síntesis de los procesos diseñados y evolucionados que utilizan una estructura de nueve fases. La razón clave de que esta estructura en nueve fases fuera adecuada en términos operativos fue la separabilidad (pero no la independencia) de las fases en función de diferentes objetivos, entregables y tareas. Esto sugería que cada fase podría ser pensada como un proyecto en sí mismo, y todas las nueve fases podrían ser consideradas como un programa (cartera de nueve proyectos). Esto a su vez sugiere que todo lo que sabemos acerca de la buena gestión de programas y proyectos se podría aplicar a la gestión del riesgo del proyecto. Existían otras estructuras alternativas, en cuanto a programa o proyecto que parecían viables, pero esta estructura de nueve fases resultó ser sólida y eficaz a nivel genérico en ese momento, posteriormente confirmado desde la experiencia de su aplicación. Gran parte de la estructura fue probada operacionalmente antes de la síntesis de la PRAM, en un contexto SCERT y en el contexto de otros sistemas de gestión que contribuyeron a su creación.

Esta perspectiva histórica también incluye una consideración particular de tres marcos establecidos de gestión de Riesgos del Proyecto: los señalados en la guía PRAM (P. Simon et al., 1997), la Guía del PMBOK (Project Management Institute, 2013), y la **Guía de RAMP** ((O. Simon, 1998); ver también (Lewin, 2002)).

Según afirma Agirre Pérez (2007), la corriente ortodoxa dentro de la Gestión de Proyectos está representada por el **PMBOK** (Project Management Institute, 2013). En esta metodología se define el conjunto de temas, áreas de conocimiento y procesos que se deben usar conjuntamente con los principios sólidos de la Gestión de Proyectos para realizar un proyecto. El PMBOK del

Project Management Institute ha emprendido exitosamente el camino para convertirse en un estándar (IEEE, 2001).

La guía del PMBoK identifica el conjunto de conocimientos, procesos, habilidades, herramientas y técnicas que pueden tener un impacto en el éxito del proyecto y lo reconoce como buenas prácticas. Los conocimientos y prácticas descritos en la guía son aplicables a la mayoría de los proyectos, la mayor parte de las veces, existiendo un consenso entre los profesionales sobre su valor y utilidad. La aplicación de dichos fundamentos puede hacer aumentar las posibilidades de éxito del proyecto.

El *Project Management Institute* desarrolla una guía práctica específica para la gestión del riesgo que denomina ***Practice Standard for Project Risk Management*** (Project Management Institute, 2009). El objetivo de esta guía práctica es proporcionar un estándar para los gestores de proyectos y otros *stakeholders* que defina los aspectos de la gestión de riesgos del proyecto para que sean reconocidos como buenas prácticas en la mayoría de los proyectos. Y, a la vez, proveer un estándar que sea globalmente aplicable y que sea consistente en su aplicación.

Chapman (1997) ofrece una visión general del proceso de gestión de riesgos del proyecto desarrollado por un grupo de trabajo de la *Association for Project Management* (APM), traducido en la metodología *PRAM Guide (Project Risk Analysis and Management)*. Un proceso formal de gestión de riesgos debe aplicarse en todas las fases del ciclo de vida del proyecto, por parte de clientes (propietarios de proyectos) y contratistas (otras partes asociadas a un proyecto).

Los procesos de gestión de riesgos más específicos se describen en términos de fases (etapas) que se descomponen en una variedad de maneras, algunas relacionadas con tareas (actividades), algunos relacionados con los entregables (resultados / productos).

Las nueve etapas que integran el proceso PRAM se discuten en una secuencia de prioridad de comienzo a comienzo. Una vez iniciadas las fases avanzan en paralelo, con ráfagas intermitentes de cada actividad definidos por un proceso iterativo que interconecta las fases. Cada fase está asociada con resultados definidos. Cada entregable se analiza en cuanto a su objeto y las tareas necesarias para producirlo.

El autor explica detalladamente la metodología, cada una de las fases que la componen y la secuenciación de las mismas.

La implementación de una gestión de riesgos en el inicio del ciclo de vida del proyecto generalmente es más difícil, ya que el proyecto está menos definido y es más fluido. Un proyecto más fluido significa que tiene más grados de libertad, más alternativas a considerar, incluyendo las alternativas que pueden ser eliminadas. En un proyecto que no está correctamente definido, la documentación adecuada es más difícil de conseguir, y las interpretaciones alternativas de lo que implica, pueden no ser resolubles.

La implementación de proceso de gestión de riesgos, antes en el ciclo de vida del proyecto es, en general, mucho más útil si se hace de forma efectiva. Los aspectos de oportunidad del proceso de gestión de riesgos pueden ser particularmente importantes para la correcta y efectiva implementación de dicho proceso.

del Caño & de la Cruz (2000) presentan una nueva metodología que denominan **PUMA** (*Project Uncertainty Management* - gestión de la incertidumbre del proyecto), una metodología integrada basada en un proceso de gestión de riesgos flexible y genérico, estructurado jerárquicamente. Lo particularizan a los proyectos de construcción, desde el punto de vista del propietario y del consultor. Como reflejan los autores, PUMA está completamente integrado en la función de planificación de proyectos. Esta metodología es esencialmente consistente con, entre otros, PMBoK, RAMP y PRAM. En la metodología, lo ideal sería desarrollar procesos adaptados a las necesidades individuales de cada organización e incluso de cada proyecto. Y el mejor camino para definir cómo un modelo de proceso puede ser simplificado es a través de métodos empíricos. El proceso genérico y sus posibles simplificaciones servirán para definir un proceso específico acorde a la organización y a las circunstancias del proyecto. Esas simplificaciones serán o no seguidas en cada caso particular, después de un análisis previo.

Por otra parte, Chapman & Ward (2003b) introducen un particular Proceso de Gestión de Riesgos, que denominan **SHAMPU** (*Shape, Harness, And Manage Project Uncertainty*), explicando las principales características de dicha metodología. Esta metodología ha surgido a partir de una síntesis de los

anteriores procesos de gestión de riesgos. Los autores también exponen la evolución de las ideas clave que son esenciales para todos los procesos de gestión de riesgos eficaces. SHAMPU se recomienda como un marco operativo genérico para uso directo o para la síntesis con otros marcos de procesos de gestión de riesgos.

El proceso SHAMPU y su contenido no es nuevo, ha emergido de la síntesis de previos procesos de gestión y modelos previos. Estos procesos y modelos han evolucionado ellos mismos durante un periodo de tiempo considerable, ya que la variedad de temas tratados fue muy extensa. Los autores realizan una comparación entre esta metodología de gestión de riesgos con respecto a los otros procesos importantes: PMBoK, PRAM y RAMP, incluyendo la comparación directa entre las distintas fases que los componen, y añadiendo aquellos factores que son favorables a cada una de las metodologías contrastadas.

Por otra parte, Nieto-Morote & Ruz-Vila (2011) diseñan un modelo de evaluación del riesgo, basado en el razonamiento difuso. El modelo consta de tres pasos:

- paso preliminar, donde se establece un grupo de evaluación de riesgos
- paso de definición de la función del factor de riesgo y la medición de las variables
- paso de inferencia difusa.

Los autores presentan una nueva metodología para el análisis de riesgos de los proyectos de construcción para hacer frente a los riesgos asociados a las situaciones complicadas en las que la información para evaluar los riesgos es imposible de cuantificar, es incompleta o no se puede obtener. El enfoque permite a los miembros del grupo de evaluación de riesgos hacer sus juicios a través de términos lingüísticos en lugar de números reales. Dado que los términos lingüísticos no son matemáticamente operables, para hacer frente a estas dificultades, cada término lingüístico se asocia con un número difuso trapezoidal, que representa el significado de cada término verbal. Con el fin de facilitar la aplicación de esta metodología a los problemas con un gran número de riesgos, se ha desarrollado un método de ponderación jerárquica para evaluar el peso de los riesgos utilizando comparaciones por pares.

Recogemos la opinión de Hillson (2011), que indica que demasiadas organizaciones utilizan un proceso de gestión de riesgos sin entender los principios que sustenta una gestión de riesgos efectiva. El estándar internacional de riesgos **ISO 31000:2009 Risk Management – Principles and Guidelines**, incluye un conjunto de principios, cada uno de los cuales nos aporta información importante sobre la gestión de riesgos, y nos ayuda a determinar un objetivo desafiante para las organizaciones que desean gestionar bien el riesgo.

La norma ISO 31000:2009 se resume en once principios sobre la gestión del riesgo. Estos principios son:

- La Gestión de Riesgo crea y protege el valor. El Valor es creado cuando alcanzamos nuestros objetivos, y la gestión del riesgo nos ayuda a optimizar nuestro desempeño. También protege el valor evitando la pérdida de tiempo y el re-trabajo.
- La Gestión de Riesgo es una parte integral de todos los procesos organizativos. La Gestión del Riesgo no es una actividad autónoma. Todo lo que hacemos debería tener en cuenta el riesgo.
- La Gestión del Riesgo es parte del proceso de toma de decisión. Cuando nos enfrentamos a situaciones importantes que implican una incertidumbre significativa, nuestras decisiones necesitan tener en cuenta el riesgo.
- La Gestión del riesgo direcciona de forma explícita la incertidumbre. Necesitan considerarse todas las formas y fuentes de incertidumbre, no solamente los “eventos de riesgo”. Esto incluye la ambigüedad, la variabilidad, la complejidad, el cambio, etc.
- La Gestión del Riesgo es sistemática, estructurada y oportuna. El proceso de riesgo debería conducirse de forma disciplinada para maximizar su efectividad y eficiencia.
- La Gestión de Riesgo está basada en la mejor información disponible. Nunca tendremos la información perfecta, pero siempre deberíamos estar seguros de utilizar cada fuente, siendo consciente de sus limitaciones.
- La Gestión de Riesgo está personalizada. Necesitamos ajustar el proceso para hacer juego con el reto específico al que nos enfrentamos.

- La Gestión de Riesgo tiene en cuenta factores humanos y culturales. El riesgo lo gestionan las personas no los procesos o las técnicas. Necesitamos reconocer la existencia de diferentes percepciones del riesgo y las actitudes ante el riesgo.
- La Gestión del riesgo es transparente y global. Debemos comunicar honestamente sobre el riesgo a nuestros interesados y tomadores de decisión, incluso si el mensaje no es bienvenido para algunos.
- La Gestión del Riesgo es dinámica, iterativa y sensible al cambio. El riesgo cambia constantemente, y el proceso del riesgo necesita mantenerse actualizado, revisando los riesgos existentes e identificando los nuevos.
- La Gestión del Riesgo facilita la mejora continua de la organización. Nuestra gestión del riesgo debería mejorar con el tiempo cuando aprendemos lecciones del pasado para beneficiarnos en el futuro.

Cada uno de estos principios puede hacer que nuestra gestión del riesgo sea mejor y más efectiva, si los traducimos a la forma en que realmente hacemos las cosas en la práctica.

Finalmente Hillson & Simon (2012) desarrollan una nueva metodología de gestión de riesgos, a la que denominan *Active Threat and Opportunity Management (ATOM)*. Aplicable a cualquier tipo de proyecto, de cualquier tamaño, en cualquier industria. El proceso de gestión del riesgo se presenta con suficiente detalle para que la aplicación sea lo más fácil posible de implementar, sin simplificar demasiado. Las técnicas son explicadas paso a paso, con la teoría subyacente, donde se incluyen las plantillas útiles, adecuadas y pertinentes. Por supuesto, no todos los proyectos son típicos, por lo tanto, ATOM es escalable para adaptarse tanto al proyecto más simple y al más complejo. También se explica cómo adaptar el proceso de riesgo genérico para pequeños y grandes proyectos, para garantizar que el proceso se encuentra con el desafío de riesgo específico, así como discutir cómo ATOM para proyectos de interfaces con el contexto de un programa más amplio.

3.4 Comparación de distintas metodologías de Gestión de Riesgos

Una vez realizada una revisión a los procesos de gestión de riesgos más importantes que aparecen en la bibliografía, algunos autores han realizado comparaciones entre estos procesos y metodologías, analizando las limitaciones que cada una pudiera presentar con respecto al resto.

Raz & Hillson (2005) realizan una revisión sobre los estándares específicos en gestión del riesgo del proyecto. Presentan y comparan las que a su juicio son las nueve principales metodologías para la gestión del riesgo, en función de su alcance, de los pasos del proceso y de su importancia específica. Dentro de las normas y metodologías estudiadas se encuentran seis estándares nacionales e internacionales y tres estándares profesionales (*PMBok - Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBok®): Chapter 11 Project Risk Management, 3rd edition; PRAM - Project Risk Analysis & Management (PRAM) Guide, 2nd edition; RMS - Risk Management Standard*).

Durante las últimas décadas ha resurgido el interés en mejorar la capacidad para trabajar con incertidumbre, y especialmente con el impacto negativo en los niveles de la organización. Esto conduce al desarrollo y aplicación de herramientas, técnicas, procesos y metodologías las cuales son típicamente clasificadas como Gestión de Riesgos. Es importante distinguir entre la gestión de los riesgos de los negocios (una rama del campo de las finanzas, preocupados principalmente con las ganancias y pérdidas monetarias) y la gestión de los riesgos operacionales, que tiene que ver con la incertidumbre inherente a la ejecución de la actividades que las organizaciones realizan con el fin de cumplir con sus metas y objetivos.

La gestión de riesgos moderna ha evolucionado sustancialmente, debido a una serie de factores, que incluyen:

- la creciente importancia de los proyectos como el marco para la planificación y ejecución del trabajo en las organizaciones
- la cada vez mayor presión de la competencia para acortar los plazos de entrega, lo que obliga a las organizaciones a comenzar a programar y ejecutar sus actividades con información incompleta

- el rápido aumento en el grado de complejidad que incorporan los proyectos
- el aumento de la carga de la regulación con la que las empresas deben cumplir
- etc.

De la revisión de las distintas metodologías, se distingue entre dos niveles de alcance estándar: el centrado en el proyecto y el dirigido hacia la organización. La distinción se basa en si la norma establece que el proceso, los pasos y procedimientos que contiene están destinados a ser implementados a nivel de proyecto, o por toda la organización, lo que incluye a las organizaciones que no se dedican específicamente en el trabajo del proyecto.

El enfoque del análisis comparativo realizado por los autores era determinar el grado en que los procesos y pasos descritos por las diversas normas son similares entre sí, concluyendo que existe un alto grado de similitud y consistencia a través de los estándares, que indica la aparición de un consenso mundial respecto a la forma de gestión del riesgo que debe ser llevado a cabo. Una revisión de las etapas del proceso descritas por los estándares seleccionados identificó los siguientes pasos principales: planificación, identificación, análisis, tratamiento y control. Aunque la terminología difiere entre las distintas normas, la estructura del proceso en cada caso es similar.

La etapa de **planificación** es la que exhibe la variabilidad más amplia en términos de alcance y nivel de detalle. En la etapa de **identificación**, el análisis y el tratamiento de los riesgos es objeto de una utilización básicamente similar en las distintas normas. La etapa de **control** puede referirse a dos niveles de control: de los riesgos residuales que permanecen después de la implementación de las acciones de tratamiento seleccionados, o de la eficacia del proceso de gestión de riesgos.

En la etapa de **análisis**, parece que hay una distinción dominante entre las siguientes dos actividades principales: la estimación del riesgo, que se refiere a la valoración de la probabilidad de ocurrencia y de las posibles consecuencias de los eventos de riesgo identificados, y la evaluación de riesgos, realizada mediante la comparación con los criterios y umbrales del fabricante, con el fin de determinar la prioridad para el tratamiento.

En la etapa de **tratamiento de riesgos**, el conjunto de posibles acciones recomendados por la mayoría de las normas era bastante limitado, e incluye:

- evitación del riesgo
- reducción de la probabilidad
- limitación significativa del riesgo (incluyendo planes de contingencia)
- transferencia de riesgos (incluida la subcontratación).

Las excepciones principales son PRAM y PMBoK®, en donde se le da la misma importancia a las amenazas y las oportunidades a lo largo del proceso. En consecuencia, en estas dos normas equivalentes, la etapa de tratamiento del riesgo incluye estrategias para hacer frente a las oportunidades:

- la explotación del riesgo
- mejora de la probabilidad
- mejora de las consecuencias, incluida la planificación de contingencia
- la distribución de riesgos, incluidas a empresas asociadas.

El proceso PRAM distingue entre dos niveles de riesgo en los proyectos: "eventos de riesgo" y "riesgo del proyecto". Divide la etapa de tratamiento de riesgos para hacer frente a estos de manera diferente. El plan de respuesta a los eventos de riesgo tiene como objetivo hacer frente a los riesgos individuales, mientras que el plan de respuesta a los riesgos del proyecto quiere hacer frente a la exposición global al riesgo del proyecto.

Para Chapman & Ward (2003b) una característica clave de la estructura del proceso RAMP es que posee visión estratégica de los proyectos dentro de una perspectiva de los modelos financieros. Opera a un nivel más estratégico que el PRAM y PMBoK, con un mayor énfasis en las cuestiones financieras. Una segunda característica clave de la estructura del proceso RAMP es un enfoque de múltiples niveles que combina los ocho escenarios del ciclo de vida del proyecto y las fases de la estructura PRAM en cuatro actividades.

Cualquier otro marco de procesos de interés podría ser caracterizado en relación con estos tres para obtener algunas ideas acerca de las relaciones existentes entre ellos. Aunque algunas de las alternativas pueden requerir un enfoque bastante nuevo en la comparación, las cuestiones básicas serán similares. Algunos ejemplos que pueden ser de interés son: Godfrey (1996), CAN/CSA-Q850-97 (1997), ICAEW (1999), AS/NZS 4360 (1999), BS6079-3

(2000), AIRMIC/ALARM/IRM (2002), y la Oficina de Comercio Gubernamental (OGC, 2002).

El proceso de gestión de riesgos desarrollado y promovido por las organizaciones profesionales, como la PRAM, RAMP y PMBoK, tienen un papel importante que desempeñar en el desarrollo de las mejores prácticas. Sin embargo, tienen limitaciones impuestas por la necesidad de consenso del grupo. Al igual que todos los puntos de vista, diferentes procesos de gestión de riesgos deberán someterse a la crítica constructiva de perspectivas alternativas, y se sirven a nuestros mejores intereses colectivos si estos procesos se apoyan entre sí y se mueven hacia conceptos básicos comunes.

Chapman (2006) realiza una comparación entre los procesos de gestión de riesgos propuestos por el PMBoK, la guía PRAM y RAMP. Define los términos “práctica común” (*Common Practice*) y “mejores prácticas” (*Best Practice*). Analiza los conceptos de probabilidad, incertidumbre, riesgo y optimización en cada uno de los procesos. Para cada uno de estos conceptos, según sean utilizados en las distintas metodologías, les asigna un valor de referencia y trata de encuadrarlos dentro de los dos términos indicados.

Tras una simple lectura del PMBoK, el autor encuadra este proceso dentro de la práctica común (“*Common Practice*”), mientras que los procesos PRAM y RAMP son calificados por el autor como “*Best Practice*” por su aproximación, si bien no consiguen alcanzar ese objetivo completamente.

Según Nieto-Morote & Ruz-Vila (2011) el creciente tamaño y complejidad de los proyectos de construcción han añadido nuevos riesgos a su ejecución. Con la necesidad de mejorar el rendimiento en el proyecto de construcción y el aumento de las obligaciones contractuales, la exigencia de un enfoque de gestión de riesgos efectiva nunca ha sido más necesaria. Sobre el tema del proceso de gestión de riesgos, recientemente se han producido un gran número de investigadores que han propuesto diferentes procesos. Algunos de los enfoques más importantes son: la guía PRAM (Chapman & Ward, 2003b), la guía RAMP (O. Simon, 1998), la guía del PMBOK (Project Management Institute, 2013) o la guía RMS (AIRMIC/ALARM/IRM, 2002). Casi todos estos enfoques tienen una estructura similar, con diferencias en los pasos establecidos para

conseguir el control de los riesgos. La gestión eficaz del riesgo implica un proceso de cuatro fases:

- **Identificación de riesgos:** El proceso de determinar qué riesgos pueden afectar al proyecto y documentar sus características.
- **Evaluación del riesgo:** El proceso de priorización de los riesgos para su posterior análisis mediante la evaluación combinando su probabilidad de ocurrencia y el impacto.
- **Respuesta del riesgo:** El proceso de desarrollar acciones para mejorar las oportunidades y reducir las amenazas que afecten a los objetivos del proyecto.
- **Seguimiento y control de riesgos:** El proceso de implementación de un plan de respuesta a los riesgos, el seguimiento de los riesgos identificados, monitorear los riesgos residuales, identificar nuevos riesgos, y evaluar la eficacia de los procesos de riesgo durante todo el proyecto.

La gestión de riesgos del proyecto es beneficiosa si se aplica de manera sistemática, desde la etapa de planificación hasta la finalización del proyecto. La gestión del riesgo no sistemático y arbitrario puede poner en peligro el éxito del proyecto ya que la mayoría de los riesgos son muy dinámicos durante toda su vida.

3.5 Complejidad del Proyecto

Howell et al. (2010) revisan la literatura sobre enfoques alternativos en la Dirección de Proyectos, en el contexto de la teoría de la contingencia del proyecto. Identifican cinco factores de selección, entre ellos y considerado uno de los más importantes figura la complejidad, entendida como el grado de diferenciación e interdependencia entre los elementos del proyecto.

Los registros de riesgos del proyecto, según Ackermann et al. (2007), se han utilizado ampliamente durante muchos años. Sin embargo, no tienen en cuenta la interacción entre los riesgos, por ejemplo, la ocurrencia de un riesgo de exacerbar otros riesgos o carteras de riesgos es más importante que la suma de

los riesgos individuales. Esto lleva a la necesidad de considerar “sistimicidad” del riesgo como parte del análisis de riesgos, donde los riesgos pueden ser vistos como una red de posibles eventos relacionados entre sí.

Por otra parte, debido a que uno de los riesgos puede producirse al mismo tiempo que otros, pueden formar una cartera de riesgos, donde el impacto del conjunto es mayor que la suma de las partes. Además, cuando se produce un riesgo, puede tener las consecuencias de reforzar la probabilidad de otros riesgos que ocurran, y así sucesivamente, causando una cadena compleja de resultados.

Entonces, es importante considerar el riesgo como **sistémico**. Al hacerlo también se permite la investigación de las interacciones entre riesgos, y así impulsa la gestión de la causalidad de las relaciones entre los riesgos, en lugar de sólo los riesgos. Se centra la atención en esos riesgos y la causalidad que crean las ramificaciones más peligrosas y en grupos de riesgo, como un sistema, en lugar de los elementos individuales.

Dentro de este contexto podríamos poner como ejemplo el accidente nuclear ocurrido en Fukushima. Los estudios de riesgo que se llevaron a cabo para la construcción de la central nuclear tuvieron presente que la central estuviese preparada para afrontar un terremoto. También consideraron que estuviera preparada para un tsunami. Pero no se consideró la necesidad de que estuviera preparada para ambas cosas. Y nótese como las causas están relacionadas, ya que el tsunami fue consecuencia de un terremoto.

Jaafari (2006) afirma que los proyectos son **sistemas dinámicos complejos**, y la ciencia de los sistemas (en su definición más amplia) debería ser la principal disciplina para el diseño de marcos específicos de proyectos para satisfacer los objetivos. La complejidad se crea no sólo debido a las interdependencias entre las partes duras y blandas del proyecto, sino que es creado por el entorno y la influencia de grupos de interés. El manejo exitoso de la complejidad del proyecto, por tanto, depende de la gestión en tiempo real de una amplia gama de variables e influencias conjuntamente con los objetivos estratégicos.

Williams & Samset (2010) hacen hincapié en la primera fase del proyecto, cuando existe sólo conceptualmente, y antes de que se planifique y ejecute. Esta fase incluye todas las actividades desde el momento en que se concibe la idea hasta que se toma la decisión final para financiar el proyecto.

En esta etapa, las consecuencias de las decisiones serán más altas, mientras que la información disponible se encuentra en su nivel más bajo. El coste infligido por hacer cambios importantes también se encuentra en su nivel más bajo. Sin embargo, pueden surgir muchos problemas que puedan complicar este período de toma de decisiones.

Existe la necesidad de identificar las metas y objetivos de la empresa y de alinear los proyectos, a pesar de la dificultad de llevarlo a cabo en la práctica.

En esta fase se describe la gestión de toma de decisiones en el mundo complejo real, clasificando los problemas como **complejidad dinámica**, definida como la complejidad subyacente de la situación del problema en sí, y la **complejidad del comportamiento**, entendida como la complejidad de los efectos del grupo.

La complejidad dinámica se superpone, y a veces queda empequeñecida por cuestiones relativas a los diferentes participantes que tienen diferentes percepciones de la realidad, distintas concepciones del problema, diferentes supuestos, valores y objetivos, etcétera.

Existe una necesidad de una alineación entre la estrategia organizativa y el concepto del proyecto. Pero incluso cuando esto se logra, aún es necesario hacer frente a la complejidad, en particular a la sistimicidad y la interrelación dentro de las decisiones del proyecto, así como a la ambigüedad implícita en todos los grandes proyectos. Ni el establecimiento de la estrategia ni las decisiones importantes se toman generalmente por individuos de forma aislada, por lo que existe la necesidad de considerar la geografía social y política dentro de los grupos de toma de decisiones y de las asociaciones de la organización.

Baccarini (1996) propone una definición de complejidad del proyecto como "*aquel que consta de muchas partes diversas interrelacionadas*". Esta definición la ha utilizado en términos de **diferenciación** (número de elementos variados) y de **interdependencia** o conectividad (grado de interrelación entre estos elementos). Las medidas están para ser aplicadas en relación con las distintas dimensiones del proyecto, y discute dos de ellas: en términos de complejidad organizativa, por diferenciación significaría el número de niveles jerárquicos, número de unidades de organización, división de tareas, número de especializaciones, etc., y por interdependencia, significaría el grado de interdependencias entre los elementos de la organización.

En términos de complejidad tecnológica, diferenciación significaría el número de entradas distintas, salidas, tareas o especialidades; interdependencia significaría la interdependencia entre tareas, equipos, tecnologías, entradas,...

Jones & Deckro (1993) definen complejidad técnica en la discusión de la psicología social de conflicto, dentro de la gestión del proyecto, como un concepto de tres partes: la variedad de tareas, el grado de interdependencia dentro de estas tareas, y la inestabilidad de los supuestos en que son basadas las tareas.

Turner & Cochrane (1993) clasifican los proyectos en base a dos parámetros: lo bien definidos que están los objetivos, y lo bien definidos que están los métodos para lograr los objetivos. La incertidumbre presente en los métodos para llevar a cabo un proyecto añade complejidad al mismo.

Los autores señalan que, si los métodos son inciertos, no se conocerán los bloques de construcción fundamental para la Gestión de Proyectos (la EDT), las tareas necesarias para completar el trabajo y su secuencia, la estructura de desglose de organización, etc.; e incluso cuando se han previsto, el plan estará sujeto a cambios. La incertidumbre en los métodos es bien conocida por estar relacionado con la complejidad.

Williams (1999) define un elemento importante de la complejidad del proyecto, que tiene que ver con su estructura y lo denomina complejidad estructural.

La práctica de Gestión de Proyectos contemporánea se caracteriza por entregas tardías, que superan los presupuestos, con funcionalidad reducida y cuya calidad es cuestionada a medida que la complejidad de los proyectos aumenta, y por tanto, la capacidad de llevar estos proyectos a la finalización con éxito disminuye drásticamente.

Thamhain (2013) explica que tratar eficazmente con los riesgos en proyectos complejos es difícil y requiere intervenciones de gestión que van más allá de los enfoques analíticos sencillos.

La gestión eficaz de los riesgos del proyecto consiste en un conjunto de variables estrechamente vinculadas, relacionadas con procesos, con el ambiente organizacional del trabajo, y con las personas. Algunos de los mejores escenarios de éxito apuntan a la importancia crítica de reconocer y hacer frente a los

riesgos de manera temprana en su desarrollo. Esto requiere de una amplia participación y colaboración en todas las partes del equipo de proyecto y su entorno, y de la utilización de métodos sofisticados para la evaluación de la viabilidad durante el ciclo de vida del proyecto.

En un entorno empresarial cada vez más complejo y dinámico, los riesgos se esconden en muchas áreas, no sólo en las relacionadas con la parte técnica, sino que también incluyen dimensiones sociales, culturales, organizativas y tecnológicas.

La participación de muchas personas, procesos y tecnologías englobando diferentes organizaciones, grupos de apoyo, subcontratistas, proveedores, organizaciones gubernamentales y comunidades de clientes aumenta el nivel de incertidumbre y complejidad y el riesgo se distribuye entre todas las áreas de la empresa, a menudo creando sorpresas con posibles consecuencias indeseables.

Algunas personas dicen que los proyectos complejos no son lo mismo que otros proyectos normales, y necesitan manejarse de forma diferente. Cuando lo consideramos bajo el ángulo del riesgo, Hillson (2013b) propone tres preguntas a responder:

1. La primera cuestión a responder es si los proyectos complejos son **intrínsecamente diferentes** de otros proyectos.

Es difícil decidir si un proyecto es complejo o no. La complejidad no se mide exclusivamente en función del tamaño del proyecto. Un proyecto puede ser grande pero sencillo, o pequeño y complejo. Sin embargo la complejidad surge de la estructura del proyecto y de la forma en que se interrelacionan sus elementos. Eso implica imprevisibilidad, donde no siempre está claro cómo un cambio en una parte podría influenciar en otras partes. Es difícil observar cómo las variaciones en las entradas pueden afectar al resultado final de un proyecto complejo, debido al número de interconexiones e interdependencias que existen entre los elementos del proyecto. El comportamiento de los proyectos complejos es a menudo ambiguo, lo que significa que los proyectos complejos son siempre arriesgados.

2. La siguiente cuestión a responder es si los proyectos complejos están **expuestos a diferentes tipos de riesgos**.

En principio, los proyectos complejos tienen las mismas clasificaciones de riesgo que podemos encontrar en otro tipo de proyecto. Sin embargo la naturaleza impredecible de los proyectos complejos también provoca la aparición de riesgos específicos imprevisibles. Estos se denominan con varios nombres como los Cisnes Negros, riesgos ontológicos o también riesgos emergentes. Estos riesgos son difíciles de identificar prematuramente y son difíciles de evaluar con exactitud. Además, las estrategias de respuesta tipo para estos riesgos no son, normalmente, efectivas al aplicarlas.

3. Por último, la cuestión que surge es si estos tipos de riesgo emergentes requieren **modelos de respuesta diferentes**.

Ya que algunos riesgos se presentan de forma imprevisible, implica que no podemos utilizar el proceso estándar preventivo de respuesta al riesgo, porque no hemos podido predecirlos. Para suplir esta carencia, aplicaremos dos estrategias que tratan de direccionar los riesgos emergentes:

- a. **Flexibilidad** – la cualidad de ser flexible, para adaptarse fácilmente.
- b. **Elasticidad** – la capacidad de mantener el propósito esencial y llevarlo a cabo con integridad.

Ambas estrategias pueden aplicarse a múltiples niveles para direccionar retos de complejidad, incluyendo a la organización entera, a nivel de proyecto / programa / portafolio, en áreas técnicas y contractuales, y en las actitudes personales de las personas clave. A cada uno de estos niveles, pueden tomarse acciones específicas para desarrollar la flexibilidad apropiada y la elasticidad para enfrentarse a los riesgos emergentes que pueden surgir. Por ejemplo, un proyecto complejo específico debería tener un presupuesto de riesgo para los riesgos conocidos, así como el nivel adecuado de contingencia incluido en su presupuesto y su programación para los riesgos emergentes. Los procesos del proyecto deberían ser suficientemente flexibles para hacer frente a los cambios mientras se mantiene una dirección global hacia los objetivos del proyecto. Y al equipo de proyecto deberían dársele poderes para hacer el

trabajo según los límites establecidos, sin necesidad de la aprobación de cada pequeña desviación del plan original.

La respuesta para las tres preguntas es afirmativa. Algunos proyectos pueden describirse claramente como complejos, si su estructura conlleva a un comportamiento intrínsecamente impredecible. Esta imprevisibilidad produce un tipo particular de riesgo emergente que no puede direccionarse utilizando el proceso de gestión de riesgo de proyectos tradicional. En lugar de eso necesitamos desarrollar flexibilidad y elasticidad a todos los niveles para enfrentarnos a los retos de los riesgos especiales asociados a la complejidad. Solo entonces seremos capaces de asumir proyectos verdaderamente complejos con la confianza de que podemos tener éxito.

3.6 Conclusiones

Para ser eficaz en el tratamiento de una amplia variedad de factores de riesgo, los directores del proyecto deben ir más allá del simple análisis del propio proyecto y de sus restricciones principales, tales como el coste, cronograma y los resultados finales. Además de lo anterior, se deben examinar y entender todas las fuentes de incertidumbre que rodean al proyecto antes de intentar gestionarlas. Esto requiere un enfoque sistémico con integración de recursos y una visión completa de la gestión de riesgos.

En la actualidad, realizamos una correcta identificación y análisis de riesgos conocidos, pero fallamos en el tratamiento de los aspectos ocultos, en los aspectos menos obvios de la incertidumbre, y en manejar de forma proactiva los riesgos en sus etapas iniciales.

Con la ayuda de potentes aplicaciones informáticas y el avance en la tecnología de la información, hemos llegado a ser eficaces en el control de los riesgos que se pueden identificar y describir analíticamente, pero aún fallamos con los riesgos desconocidos. Los riesgos desconocidos son incertidumbres, ambigüedades y factores de riesgo que a menudo están conectados complejamente. Lo más probable es que sigan procesos no lineales, que se convierten en problemas que finalmente afectan a la ejecución del proyecto.

Por definición, el riesgo es una condición que ocurre cuando las incertidumbres surgen con el potencial de afectar adversamente a uno o más de los objetivos del proyecto dentro del sistema de la empresa. El riesgo se deriva de la incertidumbre y puede ocurrir de muchas formas diferentes, tales como conocido o desconocido, de forma cuantitativa o cualitativa, e incluso real o imaginario. Se compone de un conjunto complejo de variables, parámetros y condiciones que tienen el potencial de afectar negativamente a una actividad o evento particular, tal como un proyecto.

El grado de incertidumbre, la complejidad del proyecto y el impacto son tres conjuntos de variables interrelacionadas que afectan la capacidad general de tratar con riesgo. La comprensión de estas variables es importante para la selección de un método apropiado de gestión del riesgo, y para involucrar a las personas adecuadas y a las organizaciones necesarias para hacer frente eficazmente a una situación de riesgo específico.

A pesar de los desafíos y las incertidumbres inevitables asociados con proyectos complejos, el éxito no ocurre al azar. Los riesgos pueden ser manejados. El reconocimiento temprano de los eventos indeseables es una condición previa fundamental para la gestión del riesgo. Las contingencias no identificadas tienden a actuar en cascada y penetrar en otras áreas del proyecto (efecto dominó) y, eventualmente, afectar al desempeño general del proyecto.

La participación activa de todos los interesados, incluyendo miembros del equipo, contratistas externos, clientes y otros participantes, en el proceso de planificación del proyecto, conduce a una mejor y más detallada comprensión de los objetivos del proyecto, y una mejor sensibilidad colectiva por donde acechan los riesgos y cómo hacer frente a los problemas con eficacia. La colaboración es especialmente esencial para los proyectos complejos y dispersos geográficamente.

La alta dirección, que tiene un papel fundamental en el acondicionamiento del entorno de la organización para la gestión eficaz del riesgo. Las personas son una de las mayores fuentes de incertidumbre en los proyectos, pero también uno de los recursos más importantes para la reducción del riesgo.

Los líderes del proyecto deben tener la autoridad para adaptar sus planes a las condiciones cambiantes. Los proyectos se llevan a cabo en un entorno cambiante

de la incertidumbre y el riesgo. La reducción de la complejidad del trabajo y la simplificación de los procesos de trabajo contribuirán a reducir el riesgo.



4

Control de Proyectos. Integración de la Incertidumbre



4 Control de Proyectos. Integración de la Incertidumbre

El objetivo último de nuestra investigación es proponer unos indicadores de control que integren los aspectos relativos al plazo, coste y riesgos del proyecto, de manera que puedan ser representados dentro de un marco gráfico de control. Los indicadores a proponer tendrán que tener en cuenta la posible presencia de incertidumbre en las tareas que forman parte del proyecto.

En capítulos anteriores hemos desarrollado brevemente los conceptos clave de la gestión del plazo y del coste, según se recoge en la Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBoK®). También hemos realizado un exhaustivo análisis documental relativo a la gestión del riesgo, centrándonos en los conceptos de riesgo e incertidumbre, así como en las distintas metodologías utilizadas para llevar a cabo los procesos de gestión de la incertidumbre en los proyectos.

Este capítulo comienza describiendo el proceso de control más utilizado por los profesionales y académicos en dirección de proyectos, la metodología del Valor Ganado.

A continuación describimos la primera aproximación metodológica que integra el control de los proyectos en presencia de incertidumbre, la Metodología SCoI / CCoI Pajares & López-Paredes (2011). Esta metodología nos sirve de punto de partida en nuestra investigación y tratamos de mejorarla, para lo cual utilizamos herramientas de simulación de Monte Carlo.

Una de las primeras actividades que llevamos a cabo es dotar a la anterior metodología de un entorno gráfico más intuitivo para representar los índices propuestos por Pajares y López-Paredes. Más adelante, conforme avanzamos en el estudio, el entorno gráfico se modifica para adaptarlo a la situación real que presentan las variables estadísticas de salida de los proyectos (tiempo y coste).

En este capítulo también se realiza un análisis de robustez de dicha metodología, para contrastar si los indicadores propuestos (SCoI / CCoI) responden adecuadamente a las distintas situaciones en las que se puede encontrar un proyecto.

4.1 Metodología de Valor Ganado

4.1.1 Introducción

Los proyectos son uno de los componentes más importantes de las organizaciones hoy en día. En organizaciones de cualquier tipo y tamaño, es común organizar las tareas como proyectos. Esto puede ser percibido como una consecuencia de las prácticas de gestión contemporáneas que han transformado las organizaciones desde una estructura jerárquica a otras más planas.

Además, la creciente presión competitiva que afecta a las empresas les lleva a buscar la excelencia en el cumplimiento de las tareas. Para este fin, la organización de las tareas como proyectos y el establecimiento de sistemas con el objetivo de controlar el desempeño de actividades relacionadas con el programa, el costo y la calidad, han ganado importancia para la realización de los objetivos de la organización (Shtub, Bard, & Globerson, 2004). El desarrollo de sistemas de control eficaces se convierte en un aspecto crucial en la organización, para garantizar el cumplimiento de los objetivos del proyecto, bajo la amenaza de las diversas fuentes de incertidumbre ((Aytug, Lawley, McKay, Mohan, & Uzsoy, 2005); (Herroelen & Leus, 2002)).

El proceso de control de proyectos tiene como fin minimizar las desviaciones de los planes del proyecto y consiste en determinar el estado del proyecto, comparándolo con la planificación establecida, analizando las desviaciones e implementando las acciones correctivas apropiadas. De ahí que un sistema de control incluye el conjunto de estrategias, métodos y herramientas que aseguren la consecución de los objetivos del proyecto.

Según la Guía del PMBoK (Project Management Institute, 2013), monitorizar y controlar el proyecto es el proceso de dar seguimiento, revisar e informar del

avance del proyecto a fin de cumplir los objetivos de desempeño definidos en la etapa de planificación.

El Grupo del Proceso de Seguimiento y Control está compuesto por aquellos procesos requeridos para monitorear, analizar y regular el progreso y el desempeño del proyecto, para identificar áreas en las que el plan requiera cambios y para iniciar los cambios correspondientes. Esta tarea, que se realiza a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto, permite a los Directores de Proyecto revisar las medidas adoptadas y establecer proyecciones de futuro en cuanto a alcance, plazos y costes.

Un sistema de control del proyecto tiene como objetivo minimizar las desviaciones del plan del proyecto durante la fase de ejecución. Una vez identificadas las áreas que requieren una atención especial, se adoptarán las acciones preventivas o correctivas que se estimen necesarias para resolver los problemas.

Un sistema efectivo de seguimiento y control debe definir claramente las estrategias de monitorización (cuándo y cómo monitorizar) y las estrategias de intervención (cuándo y cómo intervenir).

Las principales variables de decisión en el diseño de un sistema de control del proyecto son la frecuencia y la cantidad de actividades de control del proyecto (Hazir & Schmidt, 2013).

En la literatura de control de proyectos, los modelos analíticos, que se refieren a la determinación de estas variables de decisión, son limitados. Para determinar el momento óptimo de las actividades de control del proyecto (Partovi & Burton, 1993), De Falco & Macchiaroli (1998) llevaron a cabo estudios de simulación; Raz & Erel (2000) utilizan la programación dinámica.

Rozenes, Vitner, & Spraggett (2004) han caracterizado un sistema de control del proyecto afirmando que debe indicar la dirección del cambio en las variables preliminares de planificación cuando se compara con los resultados reales. Si hay una brecha inaceptable entre la planificación y la ejecución real, se debe generar una advertencia por parte del sistema, con el fin de tomar medidas correctivas.

Rozenes, Vitner, & Spraggett (2006) realizan una revisión bibliográfica sobre la naturaleza y la importancia del control en los proyectos. A su vez, revisa las

herramientas y técnicas de control de proyectos actuales, aportando un debate sobre las ventajas y desventajas de estos sistemas.

4.1.2 Metodología del Valor Ganado

El control del proyecto consiste en la comparación de un plan o de línea de base con los resultados reales del proyecto para identificar desviaciones y activar acciones correctivas tempranas, si es necesario.

Un sistema de control de proyectos muy conocido y ampliamente utilizado es la metodología del Valor Ganado (EVM), desarrollado originalmente en los años 60 en el Departamento de Defensa de los EE.UU. como un método estándar para medir el rendimiento de un proyecto. Este sistema se basa en un conjunto de métricas sencillas para medir y evaluar la salud general de un proyecto. Estas métricas se utilizan como señales de alerta temprana para detectar a tiempo los problemas del proyecto o para aprovechar las oportunidades del proyecto.

A pesar de ser introducido en el año 2000 en la Guía PMBOK® (Project Management Institute, 2000), la primera guía completa sobre EV apareció en 2005 (Project Management Institute, 2005)

La metodología del Valor Ganado (EVM) es una técnica de Gestión de Proyectos que mide el progreso del proyecto de una manera objetiva y proporciona una alerta temprana de los problemas de rendimiento, si los hubiera. Es una metodología de gestión que integra los tres elementos más importantes de un proyecto en un mismo marco, es decir, costo, cronograma y alcance, ((Abba & Niel, 2010), (Anbari, 2003), (Blanco, 2013), (Burke, 2003), (Cioffi, 2006), (Fleming & Koppelman, 2005), (Henderson, 2003), (Henderson, 2004), (Jacob, 2003), (Jacob & Kane, 2004), (Kim et al., 2003) , (Lipke, 1999), (Lipke, 2004a), (Lipke, 2004b), (McKim, Hegazy, & Attalla, 2000)).

Anbari (2003), Fleming & Koppelman (2005), Shtub, Bard, & Globerson (1996) y Project Management Institute (2005), entre otros, explican las principales características de la metodología y la forma de ponerla en práctica. Varios autores han mejorado la EVM tradicional al optimizar su capacidad en la evaluación y el seguimiento de los avances del proyecto ((Naeni, Shadrokh, & Salehipour, 2011), (Navon, 2005), (Vanhoucke & Vandevoorde, 2007), (Warburton, 2011)). No es de extrañar que EVM se haya aplicado a muchas

disciplinas y proyectos diferentes ((Al-Jibouri, 2003), (Chen & Zhang, 2012), (Gowan, Mathieu, & Hey, 2006), (Hanna, 2012), (Kwak & Anbari, 2012), (Naderpour & Mofid, 2011))

El rendimiento del proyecto debería ser medido a través de la vida del proyecto y, por tanto, requiere un marco de tiempo fijo para el proyecto (línea base de programación). Una programación del proyecto define una fecha de comienzo y fecha de fin para cada actividad, por tanto, un valor planificado para cada actividad, en términos de duración y de coste (Vanhoucke & Vandevorde, 2007).

El valor planificado de duración es igual al total de la duración del proyecto, y, a menudo, es referido como “*Schedule At Completion*” (SAC) (Anbari, 2003) (Figura 4-1). El tiempo actual (*Actual Time* – AT) define el progreso del proyecto y reporta el periodo para la medida del rendimiento. La duración actual (*Actual Duration* – AD) define la duración real de la actividad o proyecto. El presupuesto a la finalización (*Budget At Completion* - BAC) es la suma de todos los costes presupuestados para las actividades individuales.

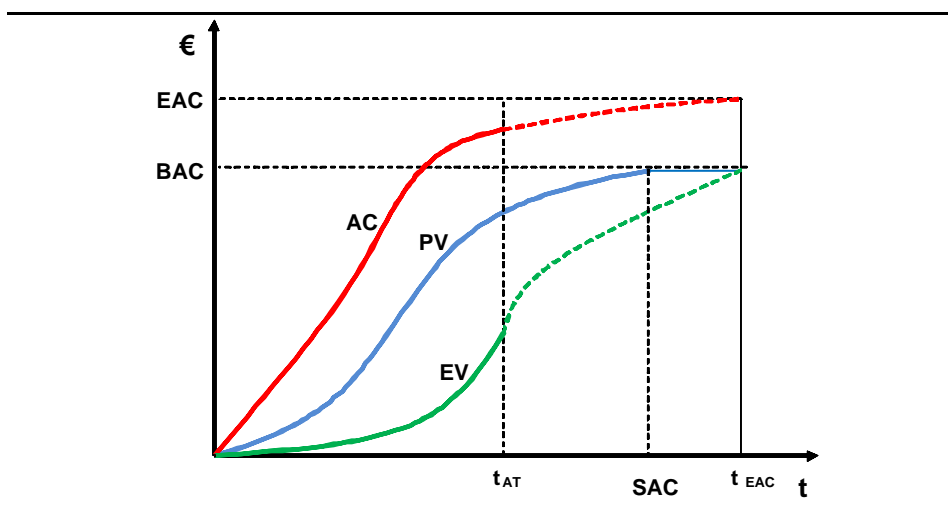


Figura 4-1 Parámetros característicos metodología del Valor Ganado.

4.1.3 EVM. Parámetros característicos

EVM se basa en la representación de tres medidas básicas (Project Management Institute, 2005), (ver Figura 4-2):

- Costo Presupuestado del Trabajo Programado (*Budgeted Cost of Work Scheduled* (BCWS)) también llamado Valor Planificado (PV). Describe el coste presupuestado del proyecto. Refleja el valor numérico del trabajo presupuestado que es programado para ser ejecutado. Con él se establece la línea base de coste, contra la cual se mide el avance de la ejecución del proyecto. El Valor Planificado se representa normalmente como el valor acumulado de recursos programados a lo largo de la programación del proyecto, mostrando una curva en forma de “s” (*S-Curve*).

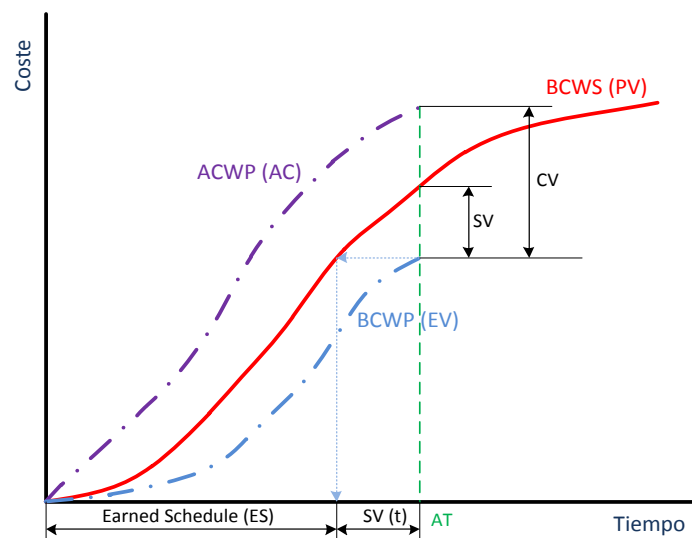


Figura 4-2 Parámetros característicos y varianzas metodología Valor Ganado.

- Costo Real del Trabajo Realizado (*Actual Cost of Work Performed* (ACWP)) también llamado Costo Real (AC). Es una indicación del nivel de recursos que han sido consumidos para lograr el trabajo ejecutado actual. Se corresponde con el coste acumulado gastado hasta la fecha dada por el tiempo actual (AT).
- Costo Presupuestado del Trabajo Realizado (*Budgeted Cost of Work Performed* (BCWP)), o también denominado Valor Ganado (EV). Refleja la cantidad de presupuesto previsto para realizar el trabajo que ha sido realizado hasta la fecha actual (AT).

Cada una de las tres variables anteriores se mide en unidades monetarias, en función del periodo de ejecución del proyecto.

A la finalización del proyecto, cuando todas las tareas han sido ejecutadas, PV y EV, por definición, coinciden, alcanzando el mismo valor ya que ambas magnitudes representan el coste presupuestado del proyecto.

4.1.4 EVM. Índices de rendimiento

La metodología del Valor Ganado (EVM) proporciona dos indicadores de rendimiento para costes y para programación, derivados de los parámetros clave de dicha metodología, y que son utilizados para la medida del progreso del proyecto (Project Management Institute, 2005) (Figura 4-2):

- Varianza de programación (*Schedule Variance*; SV): Determina cuándo la programación de un proyecto está retrasada o adelantada, con respecto a su planificación (Ecuación 4-1).

$$SV=EV-PV \quad \text{[Ecuación 4-1]}$$

- Índice de Rendimiento de programación (*Schedule Performance Index*; SPI): Indica la eficiencia con la que el equipo de proyecto utiliza su tiempo (Ecuación 4-2).

$$SPI=EV/PV \quad \text{[Ecuación 4-2]}$$

- Varianza de costes (*Cost Variance*; CV): Determina si el proyecto se ejecuta por encima o por debajo de su presupuesto planificado (Ecuación 4-3).

$$CV= EV-AC \quad \text{[Ecuación 4-3]}$$

- Índice de Rendimiento de coste (*Cost Performance Index*; CPI): Indica la eficiencia con la que el equipo de proyecto utiliza los recursos (Ecuación 4-4).

$$CPI=EV/AC \quad \text{[Ecuación 4-4]}$$

Si utilizamos la varianza (costes o programación) como indicador para realizar el control del proyecto, una variación positiva indica, en el caso del CV, que el proyecto está dentro del presupuesto y, en el caso de SV, que se ejecuta antes

de lo previsto. Por otra parte, una variación negativa podría ser una advertencia de una situación problemática, mostrando que el proyecto supera el presupuesto previsto ($CV < 0$) o que el proyecto se ha retrasado ($SV < 0$).

Las varianzas (en coste o programación) tienen unidades monetarias. A la finalización del proyecto, dado que EV converge con PV, el indicador SV tiende hacia 0.

Con el fin de comparar los proyectos con diferente tamaño, utilizamos los índices de rendimiento, para el coste o para la programación. En este caso, obtendremos índices de rendimiento superiores a 1 cuando las varianzas son positivas, significando que el coste del proyecto es inferior al presupuestado ($CPI > 1$) o que el proyecto se está ejecutando con antelación a su planificación ($SPI > 1$).

Por el contrario, índices de rendimiento inferiores a 1 (que se corresponde con varianzas negativas) indicarán que el coste del proyecto es superior al presupuestado ($CPI < 1$) o que el proyecto se está ejecutando con retraso según su planificación ($SPI < 1$).

Los índices de rendimiento (en coste o programación) no tienen unidades, son adimensionales. A la finalización del proyecto, dado que EV converge con PV, el indicador SPI tiende hacia 1.

4.1.5 EVM. Estimación de la duración del Proyecto

Las métricas de Valor Ganado han sido ampliamente utilizadas para monitorizar y controlar el estado de un proyecto, pero también para predecir y estimar el desarrollo futuro del proyecto, tanto en términos de tiempo como de coste.

Una de las principales tareas de un director de proyecto es tomar decisiones sobre el futuro. Pronosticar el costo total del proyecto y el tiempo de finalización es crucial para tomar las medidas correctivas necesarias, en caso de que existan problemas o se detecten oportunidades.

Las métricas EVM están diseñadas para pronosticar las dos medidas importantes del rendimiento (tiempo y coste) basadas en el rendimiento real hasta la fecha y en los supuestos sobre el rendimiento futuro.

El uso de los indicadores para pronosticar el coste final del proyecto ha sido recogido por Christensen (1993), que revisa diferentes fórmulas de previsión de costes y examina su exactitud, así como por Zwikael, Globerson, & Raz (2000) que evalúa cinco métodos de predicción.

En el caso de indicadores de predicción de tiempo, estos han sido estudiados ampliamente por Anbari (2003), Jacob (2003), Lipke (2003), Vandevoorde & Vanhoucke (2006) y Vanhoucke & Vandevoorde (2007).

La fórmula general para predecir el coste final del proyecto es la representada en Ecuación 4-5:

$$EAC=AC+PCWR \quad \text{[Ecuación 4-5]}$$

donde: EAC: (*Estimated cost At Completion*) Coste estimado a la finalización del proyecto.

AC: (*Actual Cost*) Coste Actual.

PCWR: (*Planned Cost of Work Remaining*) Coste planificado del trabajo pendiente.

La fórmula general y similar para predecir la duración total de un proyecto es la que se representa en la Ecuación 4-6:

$$EAC(t)=AD+PDWR \quad \text{[Ecuación 4-6]}$$

donde EAC(t): (*Estimated Duration at Completion*) Duración estimada para la terminación

AD: (*Actual Duration*) Duración Actual

PDWR: (*Planned Duration of Work Remaining*) Duración prevista de trabajo restante

4.1.6 EVM. Earned Schedule (ES)

La interpretación y el comportamiento de los indicadores de rendimiento SV y SPI, utilizados en la metodología del Valor Ganado, han sido criticados por diferentes autores a lo largo del tiempo (Christensen, 1993). En primer lugar, el SV se mide en unidades monetarias y no en unidades de tiempo, lo que hace que sea difícil de comprender y provoca, a menudo, errores de interpretación. En

segundo lugar, si $SV = 0$ (o $SPI = 1$) podría significar que se ha completado una tarea, pero también podría significar que la tarea se está ejecutando según lo previsto. En tercer lugar, en la etapa de finalización del proyecto, SV siempre converge a 0 indicando un funcionamiento perfecto (sin retrasos en la programación), incluso si el proyecto realmente se retrasa. Del mismo modo, el valor de SPI siempre converge a 1 hacia el final del proyecto, lo que indica una eficiencia de programación del 100%, incluso en el proyecto se retrasa (Vandevoorde & Vanhoucke, 2006).

Como resultado de ello, a partir de un cierto periodo de tiempo, los valores de SV y SPI se convierten en indicadores poco fiables, y estos indicadores pierden su capacidad de predicción. Por lo general, este efecto se produce en el último tercio del proyecto. Sin embargo, este es, a menudo, el período más crítico en el que las previsiones tienen que ser más exactas.

Para solucionar esta anomalía que aparece con los indicadores de programación del Valor Ganado, Lipke (2003, 2004a) introduce el concepto de Programación Ganada (*Earned Schedule* – ES) que es definida como la fecha en la que el Valor Ganado del tiempo actual, debería haberse alcanzado. ES se calcula proyectando el valor alcanzado en la curva de EV sobre la curva PV (Figura 4-2). Una vez que se ha determinado ES, se pueden calcular los indicadores de programación derivados de esta nueva metodología. Así pues, representamos en Ecuación 4-7 la Varianza e Índice de Rendimiento de Programación Ganada:

$$\begin{aligned} SV(t) &= ES - AT \\ SPI(t) &= ES / AT \end{aligned} \quad \text{[Ecuación 4-7]}$$

donde AT es el tiempo real, definido como el tiempo transcurrido desde el comienzo del proyecto.

Al contrario que ocurría con la Varianza en Programación SV, $SV(t)$ se expresa en unidades de tiempo, lo que hace que sea más fácil de interpretar.

Si $SV(t) < 0$ indica que el proyecto se está retrasando con respecto a su planificación (al contrario, es decir en con un proyecto avanzado en el caso de que $SV(t) > 0$). El dato en valor absoluto de $SV(t)$ nos proporciona exactamente

el tiempo real a la finalización del proyecto del retraso (o adelanto) con respecto a la planificación inicial (mientras que el SV siempre termina en cero).

Lo mismo ocurre con el indicador SPI(t), que tiene un valor final que refleja el desempeño del cronograma del proyecto final (mientras que el SPI es siempre igual a 1).

Utilizando el concepto de ES se pueden definir indicadores de predicción que sirven como alternativa fiable a los indicadores que utilizan los datos procedentes de la metodología EVM, más concretamente los valores de SV y SPI en los instantes finales del proyecto.

Una fórmula genérica utilizada como indicador de predicción que utiliza esta metodología de ES viene dada por la Ecuación 4-8:

$$EAC(t)=AD+PDWR \quad [Ecuación 4-8]$$

donde: EAC(t) (*Estimated Duration at Completion*): duración estimada a la finalización

AD (*Actual Duration*): duración actual

PDWR (*Planned Duration of Work Remaining*): Duración prevista del trabajo pendiente

Vandevoorde & Vanhoucke (2006) y Vanhoucke & Vandevoorde (2007) llevan a cabo distintos trabajos de simulación de proyectos utilizando todos estos indicadores, comprobando su eficacia y contrastándolos con otros utilizados por otros autores. Comparan los indicadores clásicos de la metodología del Valor Ganado, SV y SPI, contrastándolos con los indicadores de rendimiento de programación SV(t) y SPI(t). Además, presentan una fórmula genérica de predicción de programación aplicable en diferentes proyectos y comparan los tres métodos más utilizados en la literatura para pronosticar la duración total del proyecto.

4.1.7 EVM. Debilidades del Valor Ganado

La metodología del Valor Ganado se ha hecho muy popular dentro del ámbito de la Dirección de Proyectos, quizás por la relación existente entre el resultado que se obtiene por su aplicación y su simplicidad de utilización. Sin embargo, presenta ciertas limitaciones (Pajares & López-Paredes, 2007).

Una de ellas, comentada en el punto anterior, se refiere a la pérdida de utilidad de la metodología en cuanto a los indicadores de programación en los periodos finales del proyecto. Como se ha indicado, esta debilidad fue corregida por Lipke (2003, 2004a) mediante la implementación de la Programación Ganada (ES), que complementa a la metodología EVM y corrige esta limitación.

Pajares & López-Paredes (2007) recogen, además otra serie de debilidades que presenta la metodología EVM. Tanto el Valor Ganado como la Programación Ganada no tienen en cuenta el efecto aprendizaje que tiene lugar a lo largo del ciclo de vida del proyecto. En todo proyecto existen unas áreas comunes que mejoran con el tiempo, fruto del aprendizaje (actividades repetitivas, efecto coordinación del equipo de proyecto y coordinación externa,..). La capacidad predictiva del Valor Ganado y de la Programación Ganada, está fuertemente influenciada por la morfología de la red (Vandevoorde & Vanhoucke, 2006). Cuanto mayor es el grado de paralelismo, mejor es la capacidad predictiva de las diferentes metodologías. Por otra parte, las metodologías no tienen en cuenta la flexibilidad de la gestión, es decir, la capacidad que tiene el equipo directivo para decidir alternativamente el plan, en función de las vicisitudes ocurridas durante la ejecución del proyecto (Jorgensen & Wallace, 2000).

Pero la aplicación práctica de la metodología EVM también tiene otras limitaciones, que recogen Kutsch & Hall (2005), por ejemplo no se diferencian las actividades críticas y no críticas, se asume que las actividades son independientes, coincidiendo con los autores anteriores en que no se tienen en cuenta aspectos del comportamiento de gestión ni del equipo de proyecto, ni siquiera de la morfología de la red.

Hillson (2004b) resalta otra limitación que afecta tanto a la metodología EVM como, sobre todo, a los indicadores de predicción. Existe una dependencia que se basa en un supuesto clave, que el desempeño futuro se puede predecir sobre la base de los resultados anteriores. Se utilizan medidas de rendimiento previamente calculados (CPI, SPI, CV, SV, etc.) para predecir el futuro sobre el costo estimado en ejecución total del proyecto o su duración total. A pesar de ello, no hay garantía de que dicha suposición será verdad, y es probable que la realidad futura se desvíe de la predicha por simple extrapolación de los resultados.

La fortaleza de la metodología EVM se encuentra en su examen riguroso de lo que ya ha ocurrido en el pasado del proyecto, utilizando métricas cuantitativas para evaluar el rendimiento pasado del proyecto. Sin embargo se utiliza para predecir el rendimiento futuro mediante la extrapolación del pasado.

Pero, sin duda alguna, la debilidad más importante que presenta esta metodología es la falta de consideración de la incertidumbre que presentan las actividades que conforman el proyecto. ((Acebes, Pajares, Galán, & López-Paredes, 2013a), (Acebes et al., 2014a), (Aliverdi, Moslemi Naeni, & Salehipour, 2013), (Hazir & Shtub, 2011), (Hillson, 2004a), (Pajares & López-Paredes, 2007), (Pajares & López-Paredes, 2011), (Vanhoucke, 2010), (Vanhoucke, 2011), (Vanhoucke, 2012)) entre otros).

Dada la naturaleza no repetitiva de los proyectos, la incertidumbre y el riesgo son un tema central de la Gestión de Proyectos, y los Directores de Proyectos deben tenerlo en cuenta para hacer frente a los posibles retrasos en los proyectos (y sobrecostes) más allá de los datos que pudieran haber obtenido como valores planificados. En consecuencia, los Directores de Proyectos necesitan metodologías para tomar decisiones en condiciones de incertidumbre del proyecto. La forma típica de incorporar esta incertidumbre en el modelado del proyecto es por medio de las redes estocásticas donde los costes de la actividad y la duración no son deterministas, sino que siguen ciertas distribuciones de probabilidad.

Pero la metodología tradicional EVM asume certeza sobre la duración y los costes de las actividades del proyecto. Por esta razón, la metodología EVM informa al director del proyecto si el proyecto tiene sobrecostes (o retrasos) o se está ejecutando mejor de lo previsto, pero la metodología no especifica si la desviación con respecto a los valores planificados se encuentra (o no) dentro de las posibles desviaciones derivadas de la variabilidad esperada del proyecto. En otras palabras, quizás el proyecto se retrasa respecto de los valores planificados (calculados, por ejemplo, por medio de metodología CPM ((Kelley & Walker, 1989), (Kelley, 1961)) o PERT ((Fazar, 1959), (Malcolm, Roseboom, Clark, & Fazar, 1959))), pero el retraso podría estar comprendido dentro de los márgenes establecidos, teniendo en cuenta la variabilidad intrínseca de las actividades.

Al contrario, el retraso del proyecto (o sobrecoste) podría ser mayor que el valor máximo esperado, por lo que algunos cambios habrían tenido que producirse dentro del proyecto y algunas condiciones habrían cambiado respecto de las planificadas debido a la variabilidad de las actividades.

La inclusión de la variabilidad de proyecto en metodologías de control en general, y de EVM en particular, se está convirtiendo en un tema interesante de investigación dentro del ámbito académico.

Barraza, Back, & Mata (2004) aplican S-curvas estocásticas para determinar las estimaciones previstas del proyecto. Más tarde, Barraza & Bueno (2007) introdujeron un concepto de control de proyectos probabilístico mediante la ampliación de las curvas límite de control de rendimiento para obtener un pronóstico aceptable de rendimiento final del proyecto.

Las implicaciones de este enfoque estocástico en EVM se ha incorporado recientemente aplicándolo a través de enfoques difusos (Naeni et al., 2011). Ellos desarrollaron gráficos de control *fuzzy* para monitorizar los índices de Valor Ganado, proporcionando un método basado en los nuevos índices calculados. Leu & Lin (2008) mejoraron el rendimiento del EV tradicional mediante la aplicación de los gráficos estadísticos de control de calidad. Implementaron gráficas de control individuales para supervisar los datos de rendimiento del proyecto, y proporcionaron un método de transformación de los índices. Por último, Aliverdi et al. (2013) aplican los gráficos de control de calidad estadística para monitorizar los índices de Valor Ganado.

Vanhoucke (2011) sugirió monitorizar los proyectos con dos enfoques diferentes: de arriba hacia abajo, basándose en los indicadores de Valor Ganado; y de abajo hacia arriba, basado en el método de análisis de riesgos de programación. Vanhoucke (2012) estudió las razones del por qué las metodologías EVM y análisis de riesgos de programación dan mejores resultados en algunos proyectos que en otros. Hazir & Shtub (2011) exploran la relación entre la presentación de la información y el control de proyectos y desarrollaron un software de simulación para enfrentarse a entornos inciertos.

Más recientemente, Colin & Vanhoucke (2014) presentan un nuevo método de control estadístico de proyectos. Está inspirado en el formato práctico de

gráficos de control estadístico de procesos y se base en intervalos de tolerancia producidos por simulación.

Hillson (2004a) identifica dos puntos débiles en la metodología del Valor Ganado. Por una parte, para calcular los indicadores de predicción de futuro del proyecto (coste final y duración final del proyecto), la metodología se basa en datos relativos al pasado. Por otra parte, también apunta que, al utilizar la metodología de gestión de riesgos se tiene una visión de futuro, actuando como un radar, es decir, se busca incertidumbre y futuros inciertos para identificar potenciales peligros que se deberán evitar, así como posibles beneficios adicionales que deben ser capturados. La debilidad de la gestión de riesgos se fundamenta en que sólo mira hacia adelante sin conciencia real del pasado.

Propone, finalmente, una sinergia entre las metodologías EVM y de gestión de riesgos, que sean capaces de hacer frente a estas debilidades.

4.2 Integración de la incertidumbre en el seguimiento y control de proyectos SCoI / CCoI

La metodología del Valor Ganado no tiene en cuenta el análisis de riesgo de los proyectos ni su variabilidad. Existen varias metodologías que tratan de incorporar la incertidumbre a los riesgos del proyecto. La metodología PERT introdujo una primera aproximación al considerar variabilidad en la duración de las actividades, de tal manera que la duración total del proyecto y su varianza se calculan como la suma de las duraciones y varianzas de las actividades que pertenecen al camino crítico (considerándose estas actividades independientes).

Sin embargo, esta simple aproximación nos conduce a un error en la estimación de la duración y los costes ya que, en la práctica, el camino crítico varía a lo largo del tiempo, en función de la duración real de las actividades.

Para dar solución a este problema, Pajares & López-Paredes (2011) proponen dos nuevos indicadores de control: el *Schedule Control Index* (SCoI) y el *Cost Control Index* (CCoI). La aproximación hecha por Pajares & López-Paredes (2011) se basa en el concepto de “variabilidad planificada”, es decir, la variabilidad que tiene el proyecto en cualquier tiempo acorde con la variabilidad

estimada de las actividades del proyecto (duración y coste). La variabilidad del proyecto puede ser estimada durante la fase de planificación utilizando simulación de Monte Carlo, a partir de las distribuciones de probabilidad de las actividades. Así pues, se puede obtener la variabilidad planificada o estimada del proyecto en cualquier momento, durante la ejecución del mismo.

Como consecuencia, las desviaciones del proyecto pueden encontrarse, en cualquier tiempo de ejecución, fuera o dentro de la variabilidad esperada. Los índices de control de la metodología EVM (varianzas e índices de rendimiento) nos indican si el proyecto se encuentra retrasado o tiene sobrecostes (adelantado o infracostes), pero no dicen nada sobre si dichos retrasos o sobrecostes se encuentran dentro de la variabilidad planificada o no. Si no lo están, se deberían tomar acciones correctivas ya que se están produciendo cambios estructurales o eventos externos inesperados que podrían estar afectando a nuestro proyecto en ejecución.

Los autores adoptan el concepto *Risk Baseline* en el sentido descrito por Cagno, Caron, & Mancini (2008), donde la línea base de riesgo representa el riesgo (incertidumbre) para cumplir con el resto de actividades del proyecto. Se utiliza la línea de base de riesgo para evaluar los nuevos índices de rendimiento que integran el alcance / plazo / coste con el riesgo del proyecto. Estas nuevas medidas facilitan a los directores de proyecto la pronta adopción de medidas correctivas. El riesgo del proyecto en un instante determinado es calculado como la incertidumbre aportada por las actividades aún no finalizadas, teniendo en cuenta que la eficiencia del proyecto ha sido calculada según su planificación, hasta el instante que se está considerando.

Los Directores del Proyecto calculan medidas de riesgo del proyecto (varianzas, impacto, probabilidades, etc.) antes de la puesta en marcha del proyecto. Pero, una vez que el proyecto está en marcha, también es conveniente volver a calcular el riesgo restante. Por ejemplo, en cualquier momento durante la ejecución del proyecto, se puede utilizar de nuevo la simulación de Monte Carlo para calcular las propiedades estadísticas de coste del proyecto y la duración pendiente (Figura 4-3).

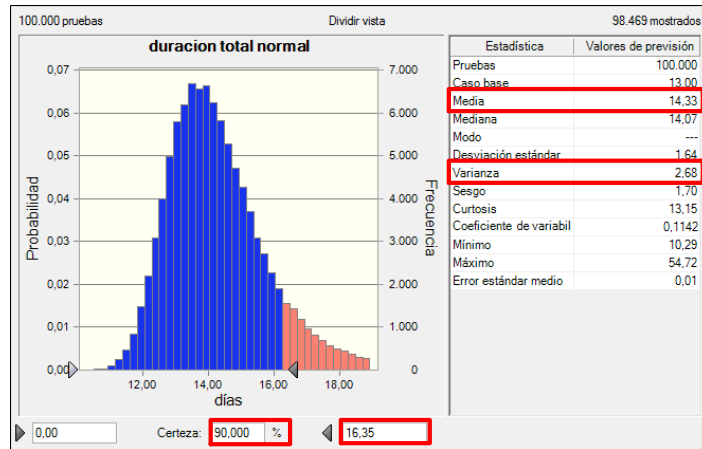


Figura 4-3 Función de distribución de Duración Total del Proyecto. Datos estadísticos.

Como alternativa, el equipo de proyecto podría re-estimar las probabilidades y el impacto de los principales costes y de la duración restante, por lo que se podrían obtener nuevas medidas de riesgo del proyecto. Si la ejecución del proyecto se lleva a cabo según su planificación, el riesgo de los proyectos debería disminuir con el tiempo, ya que las actividades ya terminadas tienen riesgo nulo (en términos de su variabilidad).

Durante el tiempo de ejecución del proyecto podrían producirse los sobrecostes y las demoras de tiempo. Pero si todo sigue según lo previsto, los retrasos y sobrecostes deben permanecer dentro de la variabilidad prevista. Sin embargo, tienen lugar situaciones inesperadas y no planificadas durante el ciclo de vida del proyecto, que afectan no sólo al desempeño actual, sino también al riesgo del proyecto en sí. Williams (2002) muestra que un alto porcentaje de retrasos es consecuencia de fenómenos sistémicos durante etapas específicas del proyecto, y alerta de que, en algunos casos, las medidas especiales adoptadas con el fin de reducir las demoras y sobrecostes tienen un efecto negativo adicional, llevando a cabo más retrasos y más sobrecostes (Williams, 2005).

Por estas razones, debería ser útil para detectar si los retrasos actuales o sobrecostes están dentro del rango de variabilidad esperado (proyecto bajo control) o, por otro lado, si los fenómenos sistémicos y no descubiertos están desplazando al proyecto a posiciones fuera de control.

Los índices de rendimiento y varianzas de costo y programación nos dicen si el proyecto se retrasa y / o tiene un exceso de coste, pero estas medidas no alertan sobre los cambios estructurales dentro del proyecto que van más allá de la "variabilidad esperada", es decir, de los cambios estructurales que contribuyan a poner el proyecto fuera de control. Por lo tanto, los autores han propuesto nuevas medidas e índices que comparan las variaciones de costes y de programación con una "desviación de control máximo por unidad de tiempo".

Comienzan por definir la Línea Base de Riesgos, de coste y programación (SRBt – *Schedule Risk Baseline* y CRBt – *Cost Risk Baseline*).

Para representar la línea base de riesgos aplicamos simulación de Monte Carlo a nuestro proyecto modelo, desde el instante inicial, cuando aún no ha comenzado el proyecto, periodo a periodo, hasta que el proyecto finaliza, considerando que la ejecución de las actividades que lo componen se realiza según la planificación inicialmente prevista.

En cada periodo de tiempo de ejecución, se extrae el dato de la varianza de la función de distribución de coste total del proyecto y de duración total del proyecto (Figura 4-4).

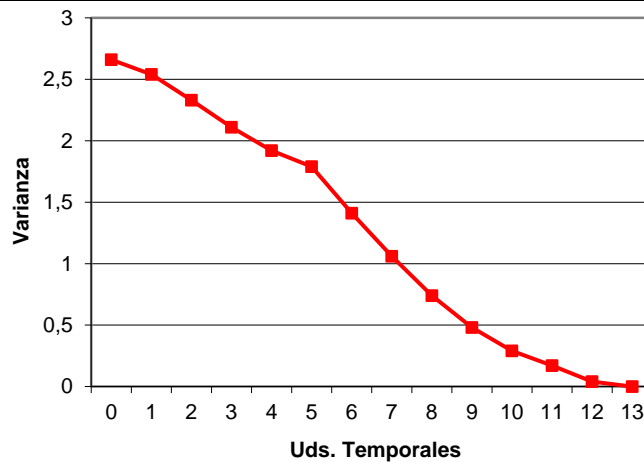


Figura 4-4 Schedule Risk Baseline.

En cada periodo de simulación, para la obtención de la varianza, se tendrá en cuenta la parte de la actividad pendiente de ejecutar, aquella parte de la actividad que aún presenta incertidumbre.

Según avanza el proyecto en su ejecución, la curva de la línea base de riesgos es decreciente, hasta finalizar con riesgo nulo en la fecha prevista de finalización del proyecto.

Se recurre al uso de *buffers*, entendidos como márgenes o valores tolerables, que nos ayudan a decidir cuándo un proyecto excede los límites de variabilidad normal (*Cost Project Buffer* (CPBf) y el *Schedule Project Buffer* (SPBf)).

Los *buffers* son calculados teniendo en cuenta los principales estadísticos de las distribuciones de probabilidad de coste y programación, fruto de la simulación mediante el método de Monte Carlo.

$$SPB_f = P90\text{-Schedule_Mean} \quad [\text{Ecuación 4-9}]$$

Los autores proponen que los buffers sean calculados como la diferencia entre algún percentil superior de la distribución (por ejemplo, percentil 90) y la media de esa misma distribución (ver Ecuación 4-9 para el buffer de programación).

Cuanto mayor sea el percentil, mayor será el *buffer* y, por consiguiente, mayor será el rango de valores en los que los retrasos o sobrecostes se puedan mover sin que el proyecto se considere fuera de control. A mayor percentil trabajaremos de una manera más tosca, con un menor control sobre el proyecto.

Los *buffers* calculados se refieren al instante final del proyecto, cuando este ya ha sido ejecutado. Pero nos interesa controlar el proyecto periodo a periodo. No es útil saber cómo ha sido la evolución del proyecto una vez finalizado sino que es más necesario conocer esa información, el comportamiento del proyecto en cada periodo de tiempo.

Por ello, estos *buffers* deberán ser repartidos a lo largo de todos los periodos de ejecución del proyecto de manera que podamos conocer o estimar cuánto se puede desviar la ejecución del proyecto respecto de los valores planeados.

El reparto de los *buffers* en los periodos será ponderado de forma proporcional a la reducción del riesgo en cada intervalo, recurriendo a los pesos (*weights*, w_c y w_s) para realizar la ponderación (Figura 4-5).

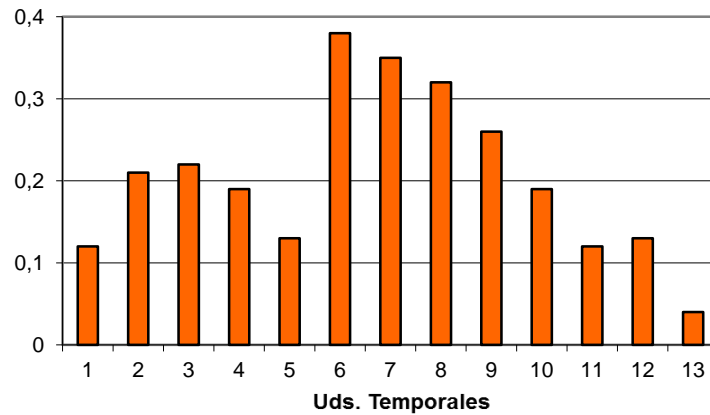


Figura 4-5 Weight Schedule.

El cálculo de los *buffers*, por ejemplo de programación se realizaría siguiendo la Ecuación 4-10. Para el coste se realizaría de forma análoga.

$$ws_t = SRB_t - SRB_{t-1}$$

$$\sum_{t=1}^T ws_t = \sigma_{ps}^2 \quad \text{[Ecuación 4-10]}$$

Repartimos a cada periodo t la parte del buffer que le corresponde, haciendo uso de los pesos. Para el *buffer* de programación aplicamos la Ecuación 4-11 (para el coste operamos de forma equivalente).

$$SBf_t = ws_t * \frac{SPBf}{\sigma_{ps}^2} \quad \text{[Ecuación 4-11]}$$

Una vez calculada la parte de *buffer* de cada periodo, estamos en disposición de poder calcular los *buffers* acumulados (ACBf / ASBf), tanto en coste como programación. La Ecuación 4-12 se utiliza para el cálculo del *buffer* acumulado de programación. Operamos de forma semejante para el correspondiente al coste.

$$ASBf_t = SBf_t + ASBf_{t-1} \quad \text{[Ecuación 4-12]}$$

Serán estos valores del buffer acumulado, que representan los valores normales de variabilidad correspondientes a cada periodo, los que, comparados con las varianzas correspondientes, nos permitirán establecer los índices que buscamos.

Representamos en la Figura 4-6 el *buffer* de programación en cada periodo de ejecución así como el *buffer* acumulado de programación.

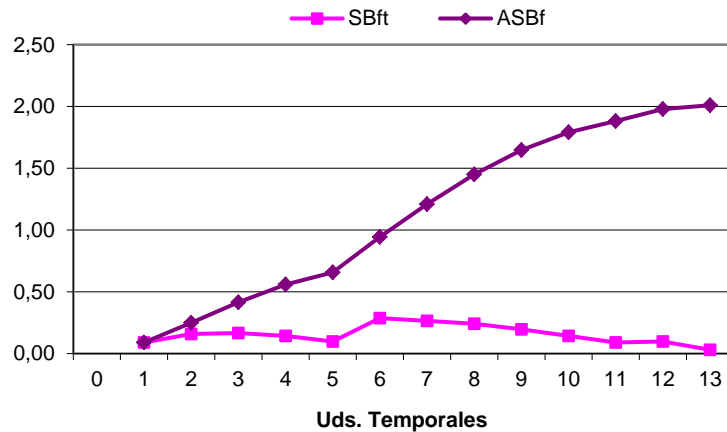


Figura 4-6 Schedule Buffer / Accurate Schedule Buffer.

Finalmente se obtienen como resultado los Índices de Control de Programación (SCoI) y de Costes (CCoI) que nos servirán para comprobar la evolución del proyecto respecto a su variabilidad normal. En la Figura 4-7 se representa el *Schedule Control Index*.

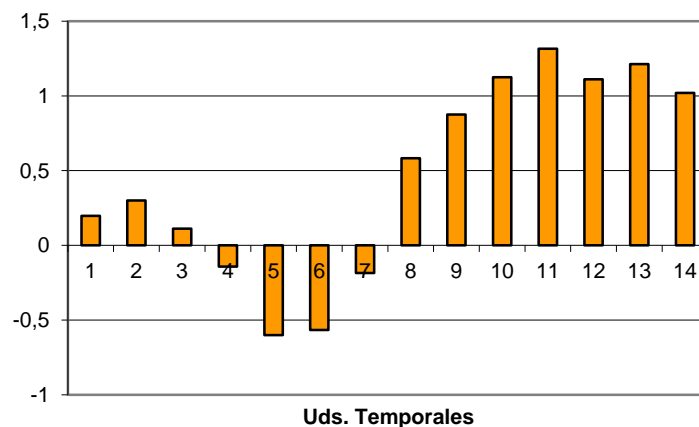


Figura 4-7 Schedule Control Index.

Las ecuaciones que se utilizan para la obtención de los índices son las representadas en Ecuación 4-13:

$$SCoI_t = ASBf_t + SV(t) = ASBf_t + ES - AT$$

$$CCoI_t = ACBf_{(t=ES)} + CV_t = ACBf_{(t=ES)} + EV - AC \text{ [Ecuación 4-13]}$$

Para el cálculo del índice de programación se ha comparado el *buffer* acumulado de programación con la varianza del Valor Ganado. Debemos darnos cuenta de que cada vez que el proyecto se retrasa, la varianza de programación será negativa, por lo que en la práctica, el índice de control de programación compara el *buffer* acumulado con el retraso en el tiempo real (AT). Si el retardo acumulado (-SV(t)) es mayor que *buffer* acumulado entonces el índice de control será negativo. Esto significa que las desviaciones de programación son mayores de lo "normal", nos alerta sobre posibles cambios estructurales y sistémicos en el proyecto.

Análogamente, para el Índice de Control de Costes, se comparan los *buffers* acumulados de costes con las variaciones de costes, pero en este caso, el *buffer* acumulado no se calcula en tiempo real sino en el tiempo correspondiente a la Programación Ganada (t = ES).

Y de nuevo, un CCoI negativo alerta sobre extracostes superiores a la variabilidad normal planificada.

En fase de ejecución del proyecto, se calculará el índice de control (de costes y de programación) en cada periodo de ejecución de tiempo.

Si el índice de control es negativo significa que se están produciendo retrasos o sobrecostes superiores a la variabilidad esperada en función de la incertidumbre que aportan cada una de las actividades que constituyen el proyecto.

Representamos en a Figura 4-8 la interpretación gráfica de estos índices.

El Índice de Control de Programación se encuentra expresado en unidades temporales de modo que será representado en el eje horizontal. Razonando análogamente, el Índice de Control de Coste se encontrará en el eje vertical. Podemos decir que ambos índices representan una serie de valores para el momento estudiado, cada uno en su eje correspondiente, que entran dentro de la variabilidad tolerable que se puede dar en el proyecto.

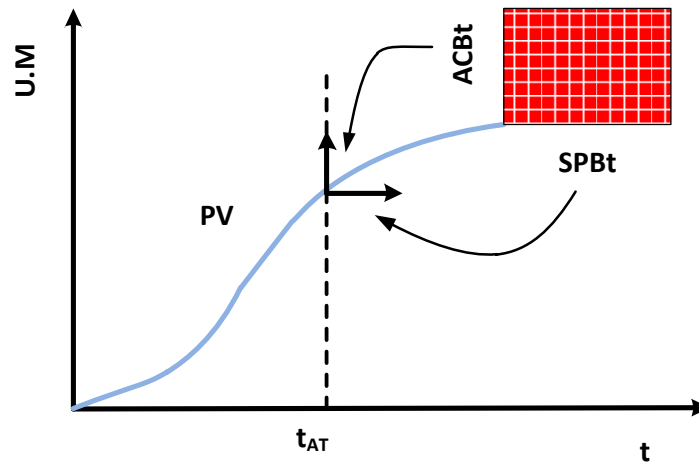


Figura 4-8 SPBf / CPBf.

El tamaño de estos márgenes depende de los buffers calculados y de los pesos (o *weights*) que reparten los *buffers* para cada uno de los periodos del proyecto. Si elegimos un percentil más alejado del valor medio, aumenta el *buffer* acumulado (ASBf por ejemplo). Esto significa que el rango de valores del índice de control hasta que el proyecto pueda considerarse fuera de control, por encima de su variabilidad normal, es mayor. El control que ejercemos sobre el proyecto disminuye, ya que aumentamos el rango de confianza del proyecto, según se puede apreciar en la Figura 4-9.

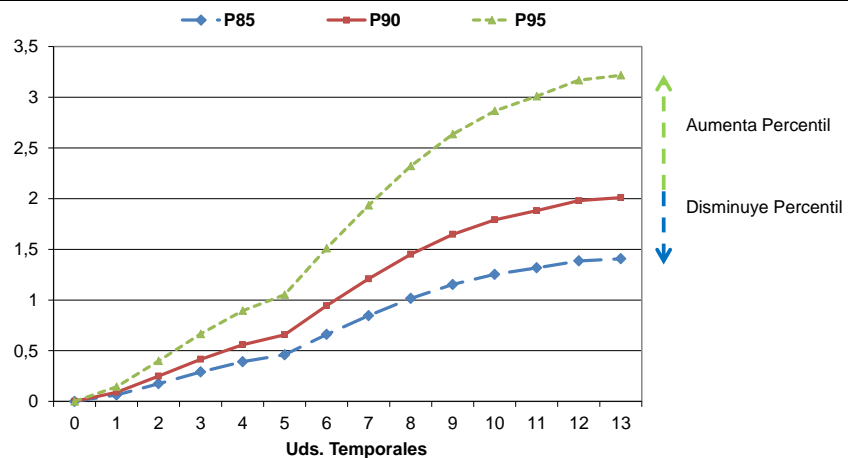


Figura 4-9 Variación del Percentil

Por el contrario, si elegimos un percentil más próximo al valor medio, tendremos como resultado un valor inferior del buffer acumulado (ASBf) y, por tanto, realizaremos un control más exhaustivo y preciso sobre el proyecto, ya que el rango de valores del índice de control que nos informan que la situación del proyecto se encuentra en condiciones normales de variabilidad, es menor.

4.3 Estudio de la robustez de los índices de control

Una vez definidos los índices de control SCoI y CCoI por Pajares & López-Paredes (2011), se desarrollan los aspectos prácticos de la metodología propuesta ante distintos supuestos prácticos (Acebes, Pajares, & López-Paredes, 2010c).

Se exploran distintos escenarios que podrían producirse y se estudia cómo responden los índices de control, SCoI y CCoI, ante dichos escenarios.

Para ello hemos elegido un proyecto con una configuración muy concreta, utilizada por Lambrechts, Demeulemeester, & Herroelen (2008) en sus trabajos de investigación, pues consideramos que la red posee suficiente entidad sin caer en grandes complejidades, al mismo tiempo que pone de manifiesto las particularidades de la metodología propuesta.

La red de proyecto se representa en la Figura 4-10 y la descripción de las actividades en la Tabla 4-1.

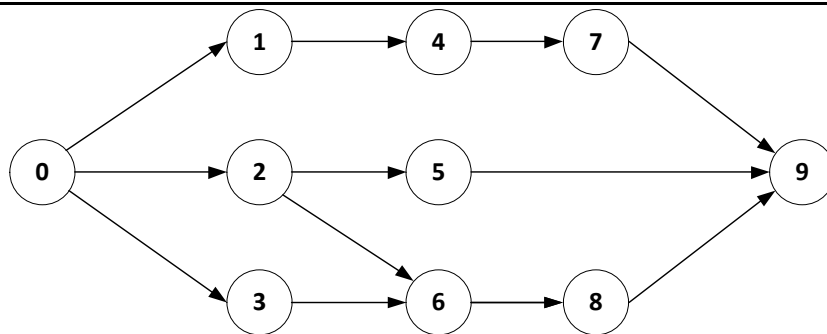


Figura 4-10 Diagrama AON. Red de proyecto utilizada.

Como podemos ver en la Figura 4-10, en lo que a paralelismo se refiere, existen tres caminos paralelos. La profundidad es distinta en función del camino que elijamos, en dos de los casos es del orden de cinco tareas mientras que en el restante es de cuatro actividades. Por último podemos destacar el hecho de que tras la tarea número dos existe una bifurcación que aporta disparidad en la profundidad.

Para poder poner en práctica todo lo expuesto anteriormente y, sobre todo poder ver el funcionamiento de los nuevos indicadores, realizaremos un estudio mediante EVM a nuestro proyecto elegido. Posteriormente se llevará a cabo un análisis de riesgos. Con los resultados obtenidos tenemos la capacidad de comprobar si nuestro proyecto ejecutado se encuentra en todo momento dentro de los márgenes propios de variabilidad o si por el contrario, el proyecto ha excedido dichos límites y el director del proyecto debe actuar sobre él para reorientarlo hacia el objetivo previsto.

Tabla 4-1
Descripción de actividades

Id. Act.	Act. a ejecutar	Uds. de Recurso	Tasa por Ud. De recurso	Sigma	Coste Ud de recurso (mano de obra)	Coste Materia prima	Costes fijos
A0							
A1	100	1	50	8,50	550	4	5
A2	20	1	5	0,95	1250	90	50
A3	35	1	5	0,75	40	9	8
A4	12	1	4	0,80	850	9	30
A5	60	1	10	1,85	12	2	2
A6	32	1	8	1,00	1200	5	10
A7	40	1	5	0,90	700	30	25
A8	20	1	10	1,65	50	15	50
A9							

Para poder realizar la simulación, definimos los parámetros de las actividades que componen el proyecto:

- Descripción de la actividad
- Identificación de la actividad.
- Actividad a ejecutar, es la cantidad de actividad a realizar.

- Unidades de recursos, son las unidades de mano de obra inicialmente previstos para la realización de la actividad.

- Tasa por unidad de recurso, es el promedio de la cantidad de trabajo realizado por una unidad de recurso en un período de tiempo.

- Sigma, es la varianza estadística asociada con el ratio de unidad de recurso. El valor de ratio de unidad de recurso no es un parámetro fijo y constante, sino que está determinada por una función de distribución (en nuestro caso una distribución normal) caracterizado por un valor medio (Ratio de Unidad de Recurso) y una varianza (sigma).

- Coste por Unidad de recurso, es el coste de la mano de obra en un período de tiempo.

- Coste de Materia prima, es el costo de la materia prima utilizada y, por lo general, se asocia con la tarea a ejecutar.

- Costes Fijos, son los costes por periodo de tiempo de trabajo y son independientes de la labor realizada en ese período de tiempo.

Las actividades A0 y A9 son actividades ficticias, que se corresponden con el inicio y fin del proyecto respectivamente.

La duración prevista de cada actividad se calculará según la Ecuación 4-14:

$$\text{Duración } A_i = (\text{Act a ejecutar}) / (\text{Uds de Recurso} \times \text{Tasa por Ud de Rec.})$$

[Ecuación 4-14]

Dado que la Tasa por unidad de recurso es una variable probabilística, con un valor medio y una varianza, va a determinar que la duración de la propia actividad sea a su vez, una variable probabilística.

En este caso, la duración de las actividades no va a venir representada por una magnitud fija y constante y sí por una magnitud variable, representada por una función de distribución, conforme a la variabilidad asignada a la Tasa de la actividad.

El Director del Proyecto, en base a los conocimientos que disponga del propio proyecto a ejecutar, de los conocimientos específicos de la actividad, de la experiencia,..., determinará la variabilidad de cada actividad, indicando primeramente el tipo de función de distribución que sigue la actividad (distribución normal, beta, uniforme,...) y los parámetros característicos de la

función de distribución de cada actividad (para distribución normal: valor medio y sigma, para función uniforme: valor máximo y valor mínimo,...).

Como resultado final a la salida del proyecto, realizando simulación de Monte Carlo, obtendremos la función de distribución de duración total del proyecto (Figura 4-11).

En cuanto al coste se refiere, cada una de las actividades viene definida por un coste por unidad de recurso, un coste de materia prima y un coste fijo.

Así pues, el coste de una actividad se calculará según indica la Ecuación 4-15:

$$\text{Coste } A_i = \text{Dur Prev.} \times (\text{C. MObra} + \text{C. fijo}) + \text{Act ejecut} \times \text{C. MPrimas}$$

[Ecuación 4-15]

Como podemos observar, para el cálculo del coste de la actividad, utilizamos la variable Duración Prevista que, a su vez, se calcula con la Tasa por Ud de Recurso.

Así pues, el coste presentará una variabilidad en función de dicha Tasa y del resto de factores que se utilizan para su cálculo.

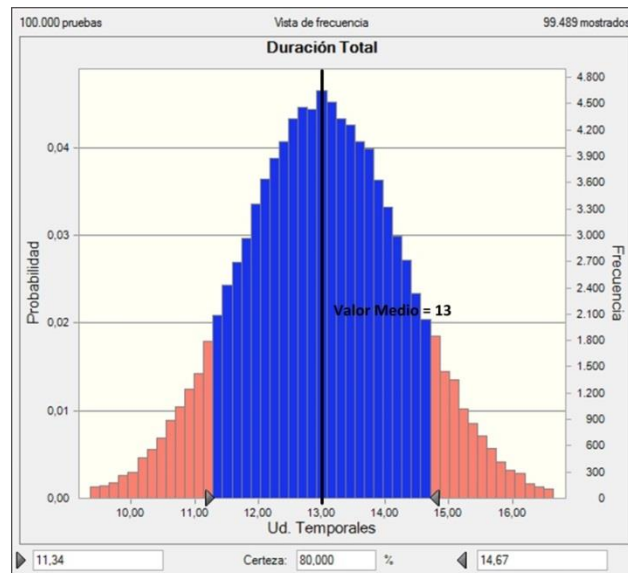


Figura 4-11 Función de distribución Duración Total del Proyecto.

Previo a la realización del estudio de robustez de los índices de control se diseña un primer marco gráfico donde incorporar los índices de control SCoI y CCoI, con el objetivo de que la información que tenga el usuario sea más útil.

Hasta el momento, la representación de los índices de control nos permite saber si el proyecto se está ejecutando con sobrecostes o con retraso, superiores a la variabilidad esperada aportada por las actividades que forman el proyecto.

Proponemos integrar en un marco gráfico los índices de control de manera que la información que aporten durante el control del proyecto sea mucho mayor y más útil.

El nuevo marco gráfico se obtiene durante la fase de planificación. Representaremos un gráfico para el seguimiento y control de los costes, donde incorporaremos en fase de ejecución el índice de control de costes (CCoI); y un gráfico de seguimiento y control del plazo, donde incorporaremos, en fase de ejecución, el índice de control de programación (SCoI).

En el nuevo marco gráfico se representan la curva del buffer acumulado (ASBf / ACBf) y la curva $2xASBf / 2xACBf$.

Si el proyecto se ejecuta según la planificación inicial en cuanto a programación, $SV(t)=0$, por lo tanto $SCoI_t=ASBf_t$.

De la misma manera, si el proyecto se ejecuta según la planificación inicial en cuanto a costes, $CV(t)=0$, así pues $CCoI=ACBf_{(t=ES)}$.

Por lo tanto, los proyectos cuyo índice de control, en un periodo de tiempo dado, coincidan con la curva $ASBt / ACBf_{(t=ES)}$ significará que el proyecto se está ejecutando, en dicho periodo, según la planificación inicial, en programación / coste.

Si el índice de control es mayor que el $ASBt / ACBf_{(t=ES)}$, el proyecto se estará ejecutando, en dicho periodo de tiempo, con adelanto / infracoste, sobre lo previsto hasta esa fecha. Por el contrario, si el índice de control representado en ese periodo de tiempo es menor que el $ASBt / ACBf_{(t=ES)}$ significará que el proyecto se está ejecutando con retraso / sobrecoste.

Por otra parte, tal como ya sabemos, si el índice de control es negativo (por debajo del eje de abscisas), el proyecto se ejecutará con retraso / sobrecostes por encima de la variabilidad esperada.

Para situaciones de retraso / sobrecoste hemos utilizado el valor medio de la función y un determinado percentil de la función de distribución a la salida del proyecto (duración total / coste total), por ejemplo el percentil P90. Así hemos obtenido la curva del buffer acumulado $ASBt / ACBf_{(t=ES)}$. Si consideramos que la función de distribución a la salida es del tipo normal (como se aprecia en la Figura 4.11), y si suponemos que el percentil que utilizaremos para situaciones de adelanto / infracoste es simétrico respecto del valor medio, por ejemplo percentil P10, obtendremos una curva de valor doble a la anterior. Así pues, obtendremos la curva $2xASBt / 2xACBf_{(t=ES)}$.

Incorporando las dos curvas comentadas en nuestro gráfico y, teniendo en cuenta igualmente el eje de abscisas, obtenemos nuestro marco de seguimiento y control de proyectos, donde podremos incorporar en cada periodo de tiempo los índices de control.

El marco gráfico divide el plano en 5 zonas en las que puede situarse el índice de control (plazo / coste) (Figura 4-12):

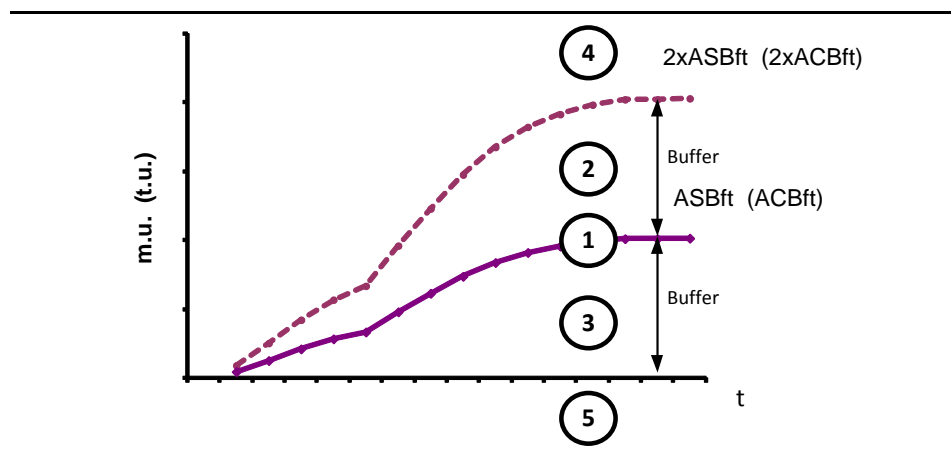


Figura 4-12 Marco gráfico de control del proyecto.

- **Zona 1.-** $SCoIt=ASBft$, $CCoIt=ACBft$. El índice de control es igual a la curva del buffer acumulado. El proyecto se está ejecutando según la planificación inicial (programación / coste). *Earned Schedule* es igual al tiempo actual (Coste Actual es igual a Valor Ganado) *Schedule Variance* (*Cost Variance*) es nulo.

- **Zona 2.-** $ASBft < SCoI \leq 2xASBft$ ($ACBft < CCoI \leq 2xACBft$). El proyecto se está ejecutando con Adelanto (infracoste), pero este buen comportamiento se debe a la variabilidad esperada del proyecto, según la incertidumbre de las actividades.
- **Zona 3.-** $0 \leq SCoI < ASBft$ ($0 \leq CCoI < ACBft$). *Schedule Variance (Cost Variance)* es negativo, pero es menor (en valor absoluto) que el *buffer* acumulado. El proyecto está retrasado (con sobrecostes), pero ese “mal” comportamiento se encuentra dentro de la variabilidad normal. Por lo tanto, no hay evidencias sobre cambios importantes o estructurales en el proyecto. Aunque los Directores del Proyecto deben vigilar estrechamente la evolución del proyecto, probablemente no sean necesarias acciones correctivas.
- **Zona 4.-** $2xASBft < SCoI$ ($2xACBft < CCoI$). El proyecto finaliza antes de lo previsto (tiene infracostes), pero el proyecto está funcionando mejor de lo que cabría esperar de acuerdo a la variabilidad esperada de sus actividades. Podrían estar ocurriendo cambios estructurales en el proyecto, que están jugando a favor de los objetivos del mismo.
- **Zona 5.-** $SCoI < 0$ ($CCoI < 0$). El proyecto se retrasa (tiene sobrecostes), pero además, estos retrasos (sobrecostes) superan la variabilidad esperada del proyecto. Los Directores del Proyecto deben analizar a qué se debe este “inesperado” bajo rendimiento, y si es debido a algún tipo de situación no planeada que está cambiando la evolución del proyecto. Probablemente, después del análisis se deban tomar acciones correctivas.

Una vez se ha definido el modelo de red del proyecto con el que se va a trabajar, se realizan distintos supuestos de ensayo (Figura 4-13), modificando la duración de sus actividades para conseguir como resultado final diferentes escenarios posibles de ejecución del proyecto.

Las situaciones analizadas son:

- **Según Planificado:** simulación de proyecto que se ejecuta siguiendo la planificación inicial.
- Escenarios en **Adelanto**.

- Adelanto Mantenido: proyecto que comienza con una situación de adelanto con respecto a la planificación inicial y continúa en dicha situación de adelanto hasta su finalización.
- Adelanto Perdido: proyecto que comienza con una situación de adelanto con respecto a la planificación inicial y que finaliza en la fecha planificada.
- Adelanto Retraso: proyecto que comienza con una situación de adelanto con respecto a la planificación inicial y que finaliza con retraso respecto de lo inicialmente planificado.
- Escenarios en **Retraso**.
 - Retraso Adelanto: proyecto que comienza con retraso respecto a lo inicialmente planificado y que finaliza en adelanto respecto de la planificación inicial.
 - Retraso Ganado: proyecto que comienza con una situación de retraso con respecto a la planificación inicial y que finaliza en la fecha planificada.
 - Retraso mantenido: proyecto que comienza con una situación de retraso con respecto a la planificación inicial y continúa en dicha situación de retraso hasta su finalización.

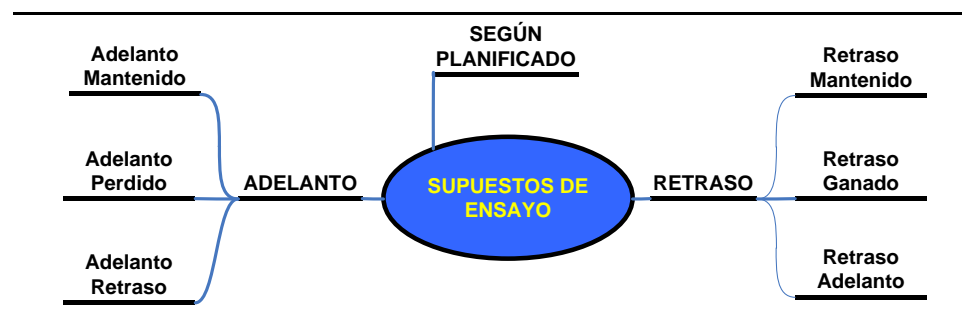


Figura 4-13 Supuestos de ensayo.

A continuación describimos cada una de los escenarios mostrando los gráficos resultantes tras aplicar metodología de Valor Ganado así como los gráficos de seguimiento y control donde incorporamos los índices SCoI/CCoI.

4.3.1 Ejecución de proyecto según planificación

En este caso, donde la ejecución del proyecto coincide en cada periodo de tiempo con la planificación inicial, podemos observar, tras realizar un análisis con la metodología del Valor Ganado, que las gráficas de Valor Planificado (PV), Coste Actual (AC) y Valor Ganado (EV) son coincidentes en cada punto.

Por tal motivo, y según se representa en la Figura 4-14, las varianzas en costes y programación van a ser de valor nulo. Si las varianzas son positivas nos indicarán adelanto o infracoste en la ejecución del proyecto, mientras que si son negativas, nos indican retrasos o sobrecostes.

Esto es así excepto a la finalización del proyecto, ya que el valor planificado tiende al Valor Ganado y siempre va a suceder que la varianza en programación es nula. Por ello calculamos la Programación Ganada y representamos en la Figura 4-14 la varianza de este valor ($SV(t)$). En este caso, el valor de la varianza es también nulo.

En cuanto al análisis de riesgos, vamos a representar en una misma gráfica los valores de buffer acumulado (ASBf/ACBf), junto con el índice de control (SCoI/CCoI), tanto para programación como para costes.

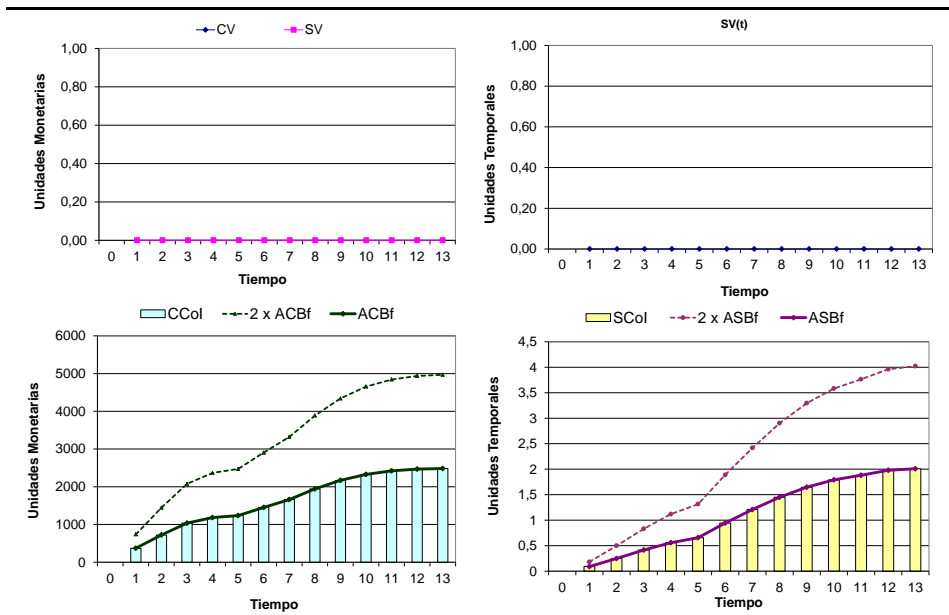


Figura 4-14 Proyecto ejecutado según planificación. EVM y CCoI/SCoI.

En el caso de un proyecto ejecutado según lo planificado (Figura 4-14), la curva del buffer acumulado coincide en cada periodo de tiempo con el valor del Índice de Control, tanto para costes como para programación.

4.3.2 Ejecuciones del proyecto en adelanto

En este grupo de simulaciones, consideramos que el proyecto sufre un adelanto en la fase inicial del mismo. A partir de este momento, simularemos varias opciones, de tal manera que la primera será considerar que el proyecto termina ejecutándose respetando el adelanto conseguido; otra posibilidad será aquella donde el proyecto finaliza según su planificación inicial, a pesar del adelanto inicial y finalmente, una tercera simulación donde el proyecto, a pesar de haber sufrido un adelanto al comienzo del mismo, finalmente sufre un retraso en su programación que hace que concluya con retraso.

4.3.2.1 Adelanto Mantenido

En el primero de los casos, con un adelanto mantenido desde el inicio del proyecto hasta el final del mismo, se observa que las varianzas son positivas, lo que nos confirma la existencia de un adelanto en cuanto a programación e infracoste en cuanto a costes. Vemos como el valor de $SV(t)$ se hace nulo en el periodo 13, cuando sabemos que tenemos un adelanto del proyecto (Figura 4-15).

Para solucionar esta contradicción, representamos la Varianza de la Programación Ganada que nos refleja el adelanto absoluto del proyecto.

Podemos comprobar como tenemos un adelanto desde el periodo 2 hasta el periodo 12 que finaliza el proyecto, es decir, un periodo antes de lo previsto.

En cuanto al análisis de riesgos, en la gráfica de costes (comparativa $CCoI/ACBf$), observamos cómo los valores del índice de control desde el periodo 3 hasta el final son superiores a los correspondientes del $ACBf$. Esto significa que tenemos un infracoste (ahorro) en la ejecución del proyecto. Además, podemos observar como el proyecto finaliza en el periodo 12, un periodo de adelanto con respecto a lo previsto.

Hemos representado también, en la misma gráfica, el valor de $2 \times ACBf$. Vemos que los valores del $CCoI$ se encuentran entre las dos líneas del buffer. Significa

que, aunque tenemos un ahorro, este infracoste está dentro de los valores normales de variabilidad de las actividades que componen el proyecto.

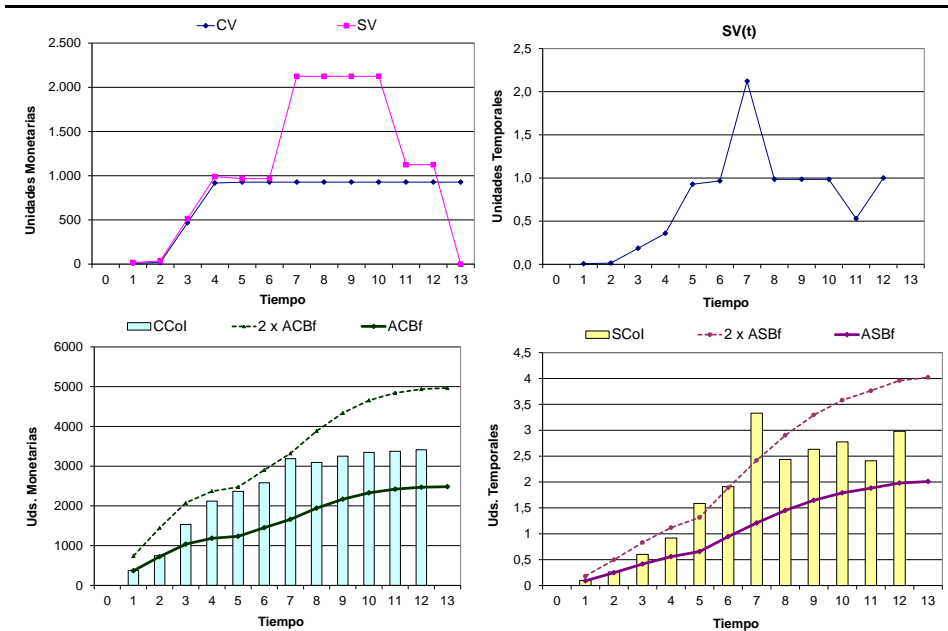


Figura 4-15 Proyecto ejecutado en Adelanto Mantenido. EVM y CCoI/SCoI.

En el primero de los casos, con un adelanto mantenido desde el inicio del proyecto hasta el final del mismo, se observa que las varianzas son positivas, lo que nos confirma la existencia de un adelanto en cuanto a programación e infracoste en cuanto a costes. Vemos como el valor de $SV(t)$ se hace nulo en el periodo 13, cuando sabemos que tenemos un adelanto del proyecto.

Para solucionar esta contradicción, representamos la Varianza de la Programación Ganada que nos refleja el adelanto absoluto del proyecto.

Podemos comprobar como tenemos un adelanto desde el periodo 2 hasta el periodo 12 que finaliza el proyecto, es decir, un periodo antes de lo previsto.

En cuanto al análisis de riesgos, en la gráfica de costes (comparativa CCoI/ACBf), observamos cómo los valores del índice de control desde el periodo 3 hasta el final son superiores a los correspondientes del ACBf. Esto significa que tenemos un infracoste (ahorro) en la ejecución del proyecto. Además, podemos observar como el proyecto finaliza en el periodo 12, un periodo de adelanto con respecto a lo previsto.

Hemos representado también, en la misma gráfica, el valor de $2 \times ACBf$. Vemos que los valores del $CCoI$ se encuentran entre las dos líneas del buffer. Significa que, aunque tenemos un ahorro, este infracoste está dentro de los valores normales de variabilidad de las actividades que componen el proyecto.

En cuanto a programación se refiere, la gráfica es similar que la relativa a los costes, con valores superiores del índice de control desde el periodo 3.

En el periodo 7 observamos como el valor del índice de control supera el valor de $2 \times ASBf$, mientras que el resto se mantiene en la franja intermedia entre las dos líneas.

Esto significa que en este periodo, tenemos un adelanto de programación muy superior a lo que cabría esperar conforme a la variabilidad de las actividades. Es un adelanto motivado que debería ser tenido en cuenta por parte del Director del Proyecto ya que tenemos un adelanto que no se debe a la ejecución normal de las actividades.

Mediante el análisis de riesgos hemos confirmado lo que ya sabíamos después de realizado el análisis con la metodología del Valor Ganado, pero además hemos comprobado cómo se comporta el proyecto en cada periodo de tiempo conforme a la variabilidad de las actividades que lo componen, deduciendo si el adelanto es esperado o está fuera de los valores normales de variabilidad sus actividades.

4.3.2.2 Adelanto Perdido

Partimos de una situación de adelanto en fases iniciales del proyecto que, por diversas causas, pierde ese adelanto llegando a concluir el proyecto según estaba planificado inicialmente.

Si nos fijamos en la gráfica de programación (Figura 4-16), comenzamos el proyecto con un adelanto respecto de la planificación inicial (como en el caso anterior), con valores del índice de control por encima del $ASBf$, incluso en el periodo 7 por encima del doble de este valor, pero este adelanto va disminuyendo hasta igualarse los valores del $SCoI$ y del $ASBf$ en el periodo 13, es decir, finaliza el proyecto según lo previsto (13 periodos). En cuanto a programación, siempre hemos tenido un adelanto dentro de los valores normales de variabilidad del proyecto excepto en el periodo 7.

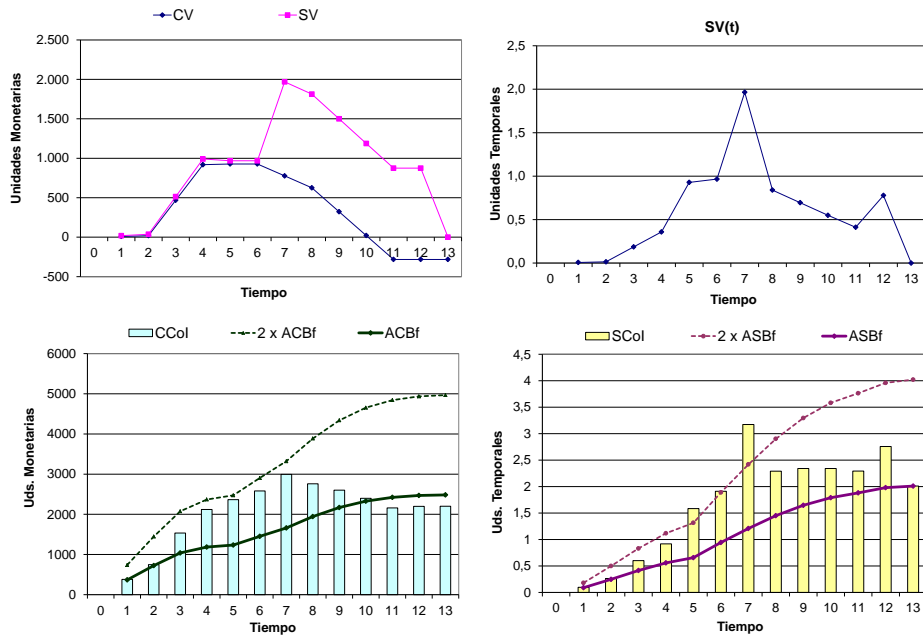


Figura 4-16 Proyecto ejecutado en Adelanto Perdido. EVM y CCoI/SCoI.

Si observamos ahora los costes del proyecto, podemos comprobar cómo, a pesar de concluir en plazo el proyecto, terminamos con un cierto sobrecoste (valor del CCoI inferior al ACBf), aunque este sobrecoste está dentro de los valores esperados conforme a la variabilidad de las actividades que componen el proyecto.

4.3.2.3 Adelanto Retraso

Por último, mostramos las gráficas del proyecto que comienza con un adelanto pero finaliza con un periodo de retraso respecto a lo planificado (Figura 4-17).

En este último caso, señalamos como el proyecto finaliza con un periodo de retraso. La situación de adelanto con la que habíamos comenzado la perdemos al final de la vida del proyecto. Desde el periodo 13 tenemos retrasos, con valores del SCoI inferiores al ASBf pero siempre dentro de la variabilidad del sistema.

En cuanto a costes, tenemos sobrecostes desde el periodo 11, pero igualmente dentro de los valores esperados según la variabilidad de las actividades. De hecho, se muestra como el sobrecoste se produce antes que el retraso en

programación, pero una vez que se produce el retraso, los sobrecostes no se acentúan, sino que siguen uniformes.

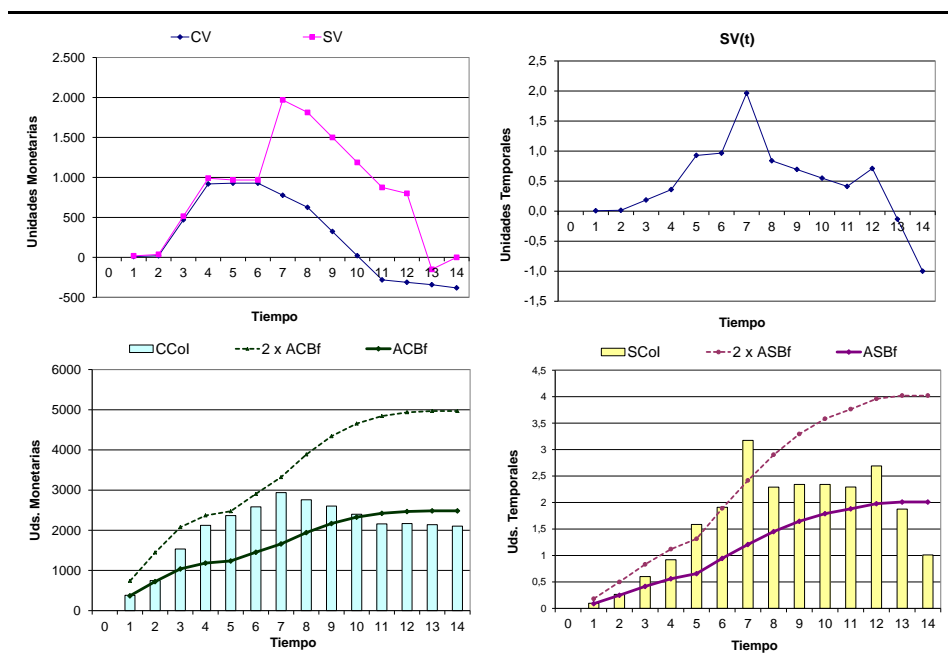


Figura 4-17 Proyecto ejecutado en Adelanto Retraso. EVM y CCoI/SCoI.

4.3.3 Ejecuciones del proyecto en retraso

Por último, en este grupo de simulaciones, consideramos que el proyecto comienza con un retraso en la ejecución de sus actividades. A partir de este momento, al igual que en el caso anterior, simularemos varias opciones, de tal manera que la primera es considerar que el proyecto continúa con el retraso inicial, finalizando después de lo planificado. Otra simulación será aquella donde el proyecto, partiendo de una situación de retraso inicial, se recupera para finalizar en plazo, según lo previsto. Y finalmente, plantearemos la tercera simulación que será aquella donde el proyecto, con un retraso inicial, se recupera para finalmente concluir en adelanto respecto a lo planificado.

De este último ejemplo, vamos a mostrar varias situaciones que pueden aparecer, para observar cómo se comportan los índices calculados y la relación que existe entre la decisión tomada con respecto a los plazos del proyecto y a los costes del mismo.

4.3.3.1 Retraso Mantenido

Partimos de una situación de retraso en la ejecución de las actividades. Esto se refleja en la gráfica de programación con un valor del SCoI menor que el correspondiente al ASBf (Figura 4-18).

En este caso, es interesante señalar cómo, desde el periodo 1 hasta el periodo 4 el valor del SCoI es muy bajo, próximo al valor nulo. Incluso en el periodo de tiempo 5, se hace negativo. Esto nos alerta de la posible existencia de errores sistémicos o estructurales en el proyecto o de una posible errónea planificación inicial de las actividades.

El Director de Proyecto deberá prestar especial atención a estas situaciones para tratar de reconducirlas hacia otras de menor riesgo. A partir del periodo 6 el proyecto sigue en situación de retraso respecto a lo planificado hasta su conclusión (finaliza en el periodo 14, un periodo después de lo previsto). No obstante, en este tramo de proyecto, el retraso se encuentra dentro del rango de retraso esperado conforme a la variabilidad de las actividades que lo componen.

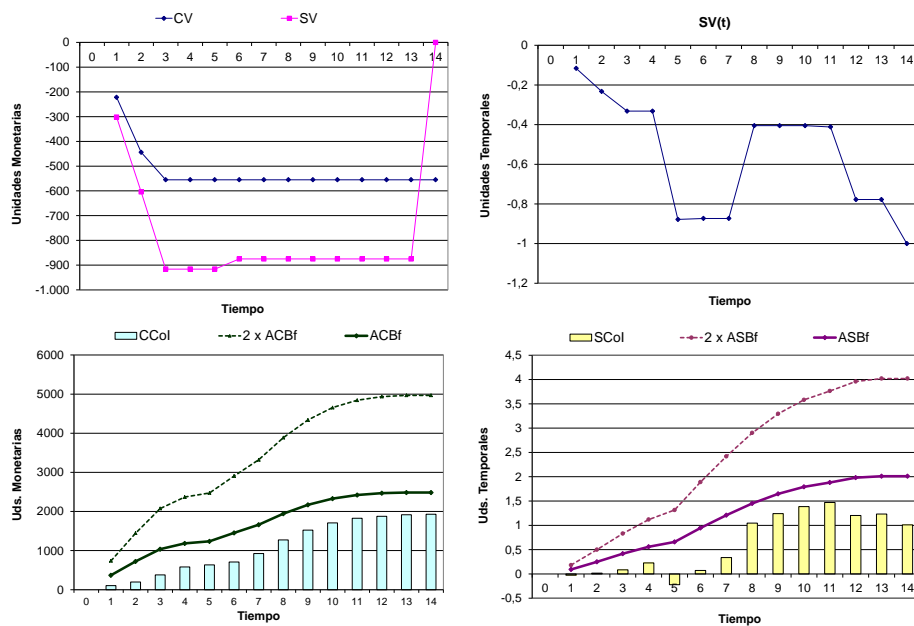


Figura 4-18 Proyecto ejecutado en Retraso Mantenido. EVM y CCoI/SCoI.

En cuanto a los costes, también observamos un sobrecoste en todo momento del proyecto, desde su inicio hasta la conclusión del mismo. Este sobrecoste existente se encuentra dentro de los márgenes normales de variabilidad del proyecto.

4.3.3.2 Retraso Ganado

En el caso de un proyecto con “retraso ganado”, partimos de la situación de retraso en la ejecución de las actividades programadas donde, finalmente, el proyecto logra reconducirse para concluir su ejecución en el plazo previsto en la planificación inicial.

Esto se comprueba en la Figura 4-19, donde inicialmente, hasta el periodo 10, el valor del SCoI es menor que el ASBf, lo cual nos indica un retraso del proyecto.

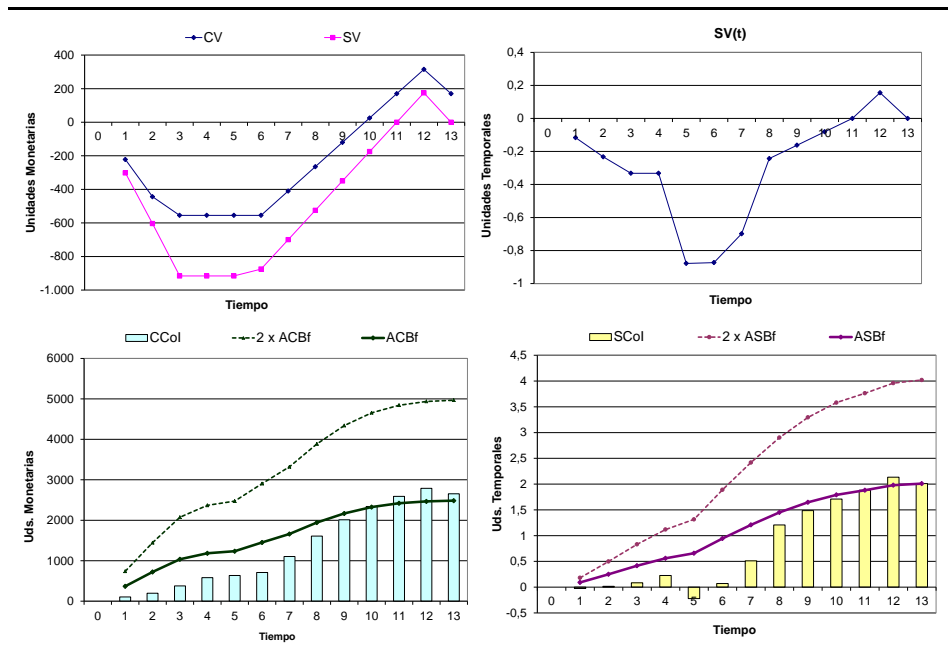


Figura 4-19 Proyecto ejecutado en Retraso Ganado. EVM y CCoI/SCoI.

Hay que prestar atención especial en el periodo 5, con un retraso superior a lo que cabría esperar inicialmente según el margen de tolerancia fijado por el Director de Proyecto. Igualmente que en el caso anterior, nos debe alertar de

errores sistémicos o estructurales en el proyecto; errores que finalmente se solucionan al finalizar el proyecto en el plazo previsto.

En cuanto a los costes se refiere, partimos de una situación de sobrecoste, con valores comprendidos en el intervalo tolerable marcado por la variabilidad de las actividades.

Conforme avanza la ejecución del proyecto, el sobrecoste se va reduciendo para finalmente obtener un ahorro o infracoste con respecto a lo estimado en la planificación. Este infracoste (de muy reducido valor), se encuentra dentro de los valores esperados, conforme a la variabilidad del proyecto.

4.3.3.3 Retraso Adelanto

Por último, analizaremos un proyecto con “retraso adelanto”, aquel que partiendo de una situación de retraso inicial en la ejecución de las actividades planificadas, es capaz de reconducir su situación para concluir en una fecha anterior a la prevista en su planificación inicial.

Consideramos tres situaciones distintas de recuperación del plazo perdido inicialmente que tienen como resultado el avance final de la programación del proyecto.

En el primer caso, el avance en el proyecto no presenta una causa aparente que motive ese adelanto, más bien podría ser debido al “buen hacer” de los trabajadores, con una ejecución de las actividades diarias mayor a su tasa. De la misma manera que se retrasan inicialmente las actividades, los propios trabajadores reconducen la situación para finalizar en adelanto sobre la programación prevista (Figura 4-20).

En el segundo de los casos, el adelanto en la conclusión del proyecto se deberá a la realización de horas extra por parte de los trabajadores. El Director de Proyecto determina agilizar la conclusión de ciertas actividades y para ello invierte más tiempo en forma de horas extra por parte de los trabajadores para la conclusión de las mismas (Figura 4-21).

Comparando estos dos casos podemos observar cómo, en programación, partimos de una situación de retraso, incluso superando los límites normales de variabilidad del proyecto en el periodo de tiempo 5, pero que, a partir del periodo 6 el proyecto se va recuperando hasta lograr un adelanto de un periodo

de tiempo, frente a lo planificado. Concluimos el proyecto con un adelanto que está dentro de los valores normales de variabilidad de las actividades que forman este proyecto.

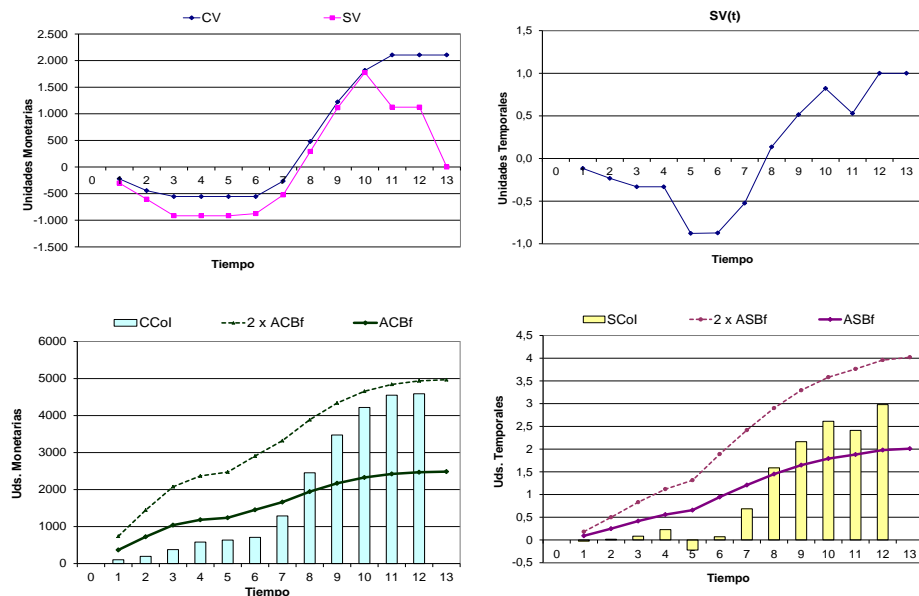


Figura 4-20 Proyecto ejecutado en Retraso Adelanto. EVM y CCoI/SCoI.

Las dos gráficas relativas a programación son iguales porque se ha supuesto que la recuperación del tiempo inicialmente perdido se ha producido en la misma cantidad de tiempo por periodo en los dos casos, en el primero debido al buen hacer de los trabajadores y en el segundo caso, empleando horas extra para recuperar ese tiempo perdido.

Esta suposición se aprecia en la gráfica de costes cómo, en el primer caso, tenemos un ahorro monetario respecto a lo planificado que es superior al segundo caso donde hay que hacer un desembolso de dinero para pagar esas horas extra que se invierten en el adelanto de las actividades.

Por último, representamos la situación donde el adelanto en la conclusión del proyecto se deberá al aporte de mano de obra en determinadas actividades, que reducirán la duración de estas y, por tanto, la duración total del proyecto (Figura 4-22).

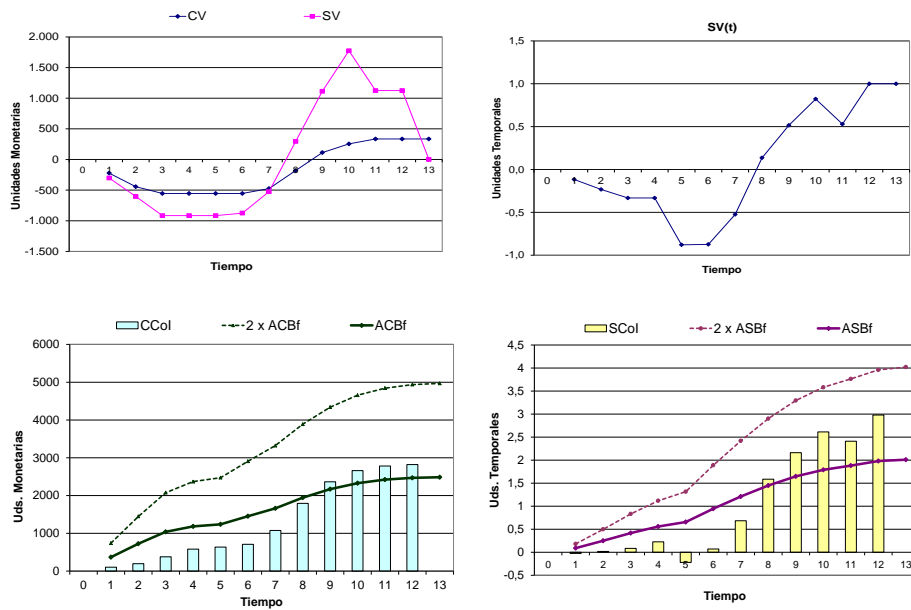


Figura 4-21 Proyecto ejecutado en Retraso Adelanto. Horas Extra. EVM y CCoI/SCoI.

En este caso, el aporte de mano de obra no se realiza hasta los últimos periodos de ejecución del proyecto por lo que tendremos un retraso en la ejecución hasta el periodo 9. A partir de entonces el proyecto se recupera finalizando un periodo de tiempo antes de lo previsto, gracias a la incorporación de mano de obra (Uds. de Recurso) que permiten finalizar las actividades con antelación a lo previsto.

En el caso de los costes, tendremos un sobrecoste desde el momento inicial hasta el momento de la conclusión del proyecto, a pesar de finalizar en un periodo de tiempo antes de lo previsto. Esto es así porque partimos de una situación de retraso en la ejecución de las actividades, que conllevan un sobrecoste y el adelanto final en la ejecución se ha conseguido con incorporación de con mano de obra, que también supone una inversión monetaria.

No obstante, podemos observar como este sobrecoste se encuentra dentro de los valores normales de variabilidad de las actividades.

Ampliando las investigaciones llevadas a cabo en Pajares & López-Paredes (2011), hemos elegido un proyecto de cierta entidad y hemos representado los

índices relativos a la metodología EVM y al análisis de riesgos en programación, desarrollando los aspectos prácticos de estas metodologías.

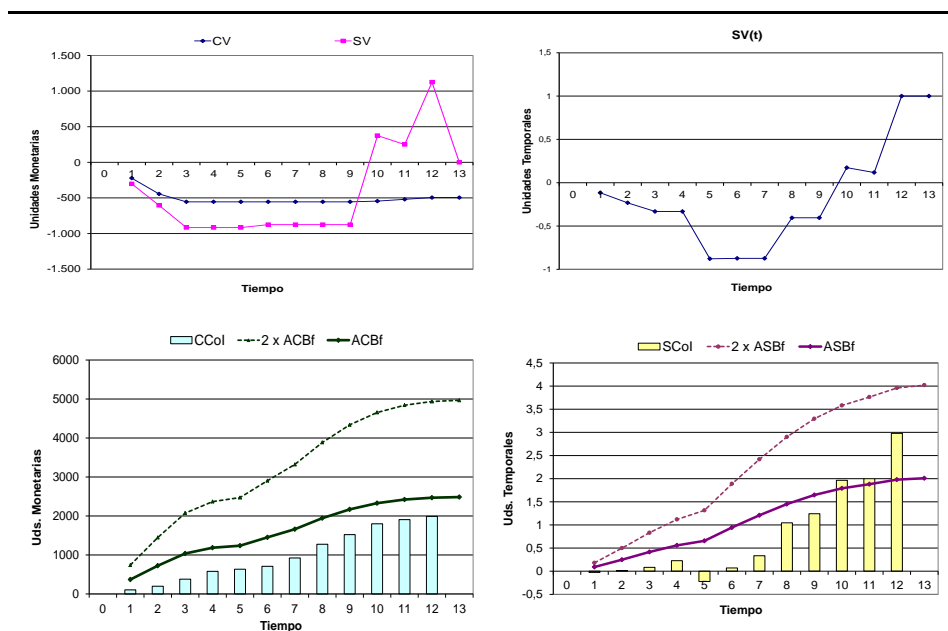


Figura 4-22 Proyecto ejecutado en Retraso Adelanto. Aporte de mano de obra. EVM y CCoI/SCoI.

Pretendemos con este estudio facilitar a los Directores de Proyectos la toma de decisiones conforme sea la evolución de sus proyectos, de manera que gráficamente puedan observar si dicho proyecto se encuentra dentro de los márgenes de variabilidad estimados o si se encuentra fuera de estos límites, tanto por retraso como por adelanto.

Para ello hemos definido las posibles situaciones en las que podemos encontrar nuestro proyecto en cada instante de tiempo. Representando en una misma gráfica el índice de control de programación y el buffer acumulado de programación, nos ayudará a deducir en cuales de las posibles situaciones nos encontramos y con qué variabilidad, alertándonos de si se han producido cambios profundos que pueden poner en peligro el buen desarrollo del proyecto, para adoptar, si procede, medidas correctivas encaminadas a reconducir el proyecto.

4.4 Modificaciones al marco gráfico de control

Después de trabajar con ensayos y simulaciones de proyectos, utilizando el marco gráfico de control donde se integran los índices SCoI y CCoI, se observaron una serie de deficiencias que fueron corregidas por Acebes et al. (2013a).

Se propone un cálculo más preciso de las curvas de control de dicho gráfico, de acuerdo con las funciones de distribución que se obtienen a la salida del proyecto y con la filosofía en la que se basa el diseño de los índices de control.

Tal como ya se ha comentado, inicialmente se definieron dos curvas de control, a parte del eje de abscisas, que determinaban 5 diferentes regiones. Las curvas ASBf y 2xASBf habían sido calculadas teniendo en cuenta:

- El valor medio de la función de distribución a la salida del proyecto ($SPBf = P90\text{-Schedule Mean}$). El *buffer* a la finalización del proyecto, que posteriormente se pondera para cada periodo de tiempo, ha sido calculado tomando un percentil como margen de confianza para los proyectos en retraso (por ejemplo P90). Este valor temporal, que se corresponde con el tiempo en el que el 90% de los proyectos simulados ya ha finalizado, se compara con el valor medio de la función de distribución de la duración total del proyecto. (De forma análoga realizamos el cálculo para los costes).

- Hemos supuesto que la función de distribución a la salida es de tipo normal y que el percentil que utilizaremos para situaciones de adelanto / infracoste es simétrico respecto del valor medio, por ejemplo percentil P10. De esta manera, la curva que delimita los proyectos que se ejecutan en adelanto por encima de la variabilidad normal, tendrá un valor doble a la curva del *buffer* acumulado ASBf, es decir 2xASBf.

Pero la realidad es que, obtenidas las funciones de distribución a la salida del proyecto (costes o programación), la función de distribución, aun tendiendo hacia una forma normal, no lo es exactamente y, por tanto, los valores de P10 y P90 no son simétricos respecto de su valor medio, como puede observarse en la Figura 4-23.

Otra observación que hay que reflejar es que hemos planificado nuestro proyecto siguiendo una determinada metodología de planificación y

programación de proyectos, en nuestro caso, hemos utilizado la metodología PERT para dicha secuenciación y planificación. Tanto gráfica como analíticamente, es evidente que el valor medio no coincide con el valor PV planificado según metodología PERT.

Podemos comprobar que nuestro proyecto modelo, aplicando dicha metodología de programación, debería finalizar en un periodo de tiempo de 13 uds. temporales.

Después de aplicar simulación de Monte Carlo y de representar la función de distribución de la duración del proyecto, comprobamos cómo el valor medio de dicha función se sitúa en 14,33 uds temporales. También observamos que al periodo de tiempo 13 (obtenido como resultado de aplicar metodología PERT para la programación planificada del proyecto) le corresponde un Percentil 18.89, es decir, solo el 18,89% de los proyectos finalizarán en 13 uds temporales o menos.

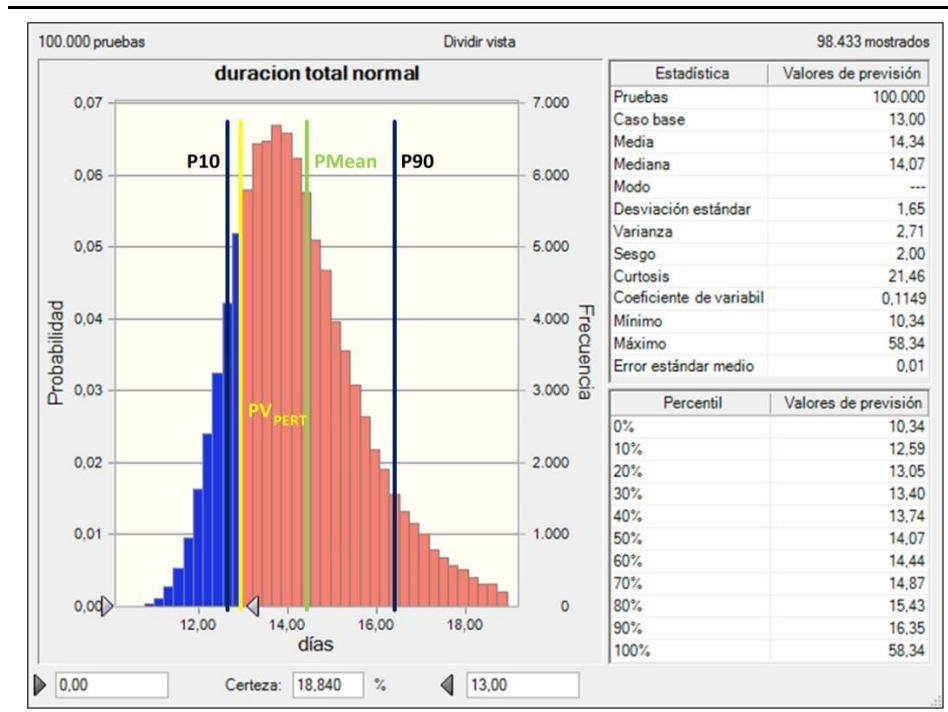


Figura 4-23 Función de distribución de probabilidad a la salida del proyecto. Duración total normal. Percentiles.

Si comprobamos los percentiles que nos ofrece la simulación de Monte Carlo, vemos que el P10 es 12,59 y el P90 es 16,35. No son valores que sean exactamente simétricos respecto del valor medio de la función, ni mucho menos respecto del valor correspondiente al valor planificado (PV) al aplicar metodología PERT.

Por lo tanto, con objeto de mejorar el gráfico de control para que la representación de los índices sea acorde con la representación de las funciones de distribución a la salida del proyecto, tanto de costes como de programación, se pretenden modificar las ecuaciones que generan tanto los índices de control como del marco gráfico de control.

4.4.1 Modificación de los índices de control

Según Pajares & López-Paredes (2011) se define el *buffer* total del proyecto (para costes y programación) como:

$$\begin{aligned} \text{SPBf} &= \text{Percentil-Schedule Mean} \\ \text{CPBf} &= \text{Percentil-Cost Mean} \quad [\text{Ecuación 4-16}] \end{aligned}$$

La primera modificación que se propone es sustituir el valor medio del coste y programación por su correspondiente valor planificado, ya que será este último valor sobre el que realizamos la comparación final para saber el retraso o adelanto del proyecto (infracoste o sobrecoste) y no sobre el valor medio de la función de distribución.

De esta manera, las operaciones resultarán según Ecuación 4-17:

$$\begin{aligned} \text{SPBf} &= \text{Percentil} - \text{PV Schedule} \\ \text{CPBf} &= \text{Percentil} - \text{PV cost.} \quad [\text{Ecuación 4-17}] \end{aligned}$$

La segunda modificación que se propone es definir dos *buffer* distintos, uno para proyectos en adelanto (que terminan antes del valor planificado PV o con infracoste) y otro *buffer* para proyectos en retraso (proyectos que finalizan después de lo planificado o con sobrecoste).

Así, definimos $P_{S_{\max}}$ como el percentil de programación para proyectos en retraso (por ejemplo P90), $P_{S_{\min}}$ como el percentil de programación para proyectos en adelanto (por ejemplo P10).

Análogamente, definimos $P_{C_{\max}}$ y $P_{C_{\min}}$, como los percentiles de coste para proyectos con sobrecoste y con infracoste, respectivamente.

Como resultado, las ecuaciones relativas al *buffer* total resultarán (Ecuación 4-18):

$$\begin{aligned} SPBf_{\max} &= P_{S_{\max}} - PV_S; & SPBf_{\min} &= PV_S - P_{S_{\min}}; \\ CPBf_{\max} &= C_{C_{\max}} - PV_C; & CPBf_{\min} &= PV_C - P_{C_{\min}} \end{aligned} \quad \text{[Ecuación 4-18]}$$

Es muy común elegir como límites de confianza los percentiles P90 para proyectos en retraso (o sobrecostes) y P10 para proyectos en adelanto o infracoste. No obstante, será responsabilidad del Director de Proyecto elegir el percentil que estime oportuno como margen de confianza para el control de su proyecto, no siendo obligado elegir percentiles simétricos y pudiendo elegir, por ejemplo los percentiles P80 como límite máximo y P10 como límite mínimo.

Finalmente, una vez calculados los *buffer* parciales (máximo y mínimo) obtenemos el *buffer* total para programación y costes. Utilizamos la Ecuación 4-19 para su cálculo:

$$\begin{aligned} SPBf_{\text{sum}} &= SPBf_{\max} + SPBf_{\min}; \\ CPBf_{\text{sum}} &= CPBf_{\max} + CPBf_{\min} \end{aligned} \quad \text{[Ecuación 4-19]}$$

El *buffer* total acumulado lo utilizaremos para representar la curva de control que delimita, dentro de las opciones de adelanto/infracoste, las situaciones dentro de valores normales y aquellas situaciones con variabilidad fuera de lo esperado.

El resto de las ecuaciones, hasta la obtención de los índices de control, son las siguientes (Ecuación 4-20):

Buffer en cada periodo t

$$SBf_{\max t} = w_{st} * SPB_{\max} / \sigma_s^2; \quad SBf_{\min t} = w_{st} * SPB_{\min} / \sigma_s^2$$

$$CBf_{\max t} = w_{ct} * CPB_{\max} / \sigma_c^2; \quad CBf_{\min t} = w_{ct} * CPB_{\min} / \sigma_c^2$$

[Ecuación 4-20]

Donde σ_s^2 y σ_c^2 son las varianzas estadísticas de las funciones de distribución de programación y coste total del proyecto, obtenidas tras la simulación de Monte Carlo.

Así ponderamos el *buffer* acumulado en cada periodo de tiempo (Ecuación 4-21):

$$ASBf_{\max t} = SBf_{\max t} + ASBf_{\max t-1}; \quad ASBf_{\min t} = SBf_{\min t} + ASBf_{\min t-1}$$

$$ACBf_{\max t} = CBf_{\max t} + ACBf_{\max t-1}; \quad ACBf_{\min t} = CBf_{\min t} + ACBf_{\min t-1}$$

[Ecuación 4-21]

El *buffer* total acumulado será obtenido según la Ecuación 4-22:

$$ASBf_{\text{sumt}} = ASBf_{\max t} + ASBf_{\min t}$$

$$ACBf_{\text{sumt}} = ACBf_{\max t} + ACBf_{\min t}$$

[Ecuación 4-22]

Y, por último, obtenemos la representación de los índices de control aplicando la Ecuación 4-23:

$$SCoI_t = ASBf_{\max t} + SV(t) = ASBf_{\max t} + ES - AT$$

$$CCoI_t = ACBf_{\max(t=ES)} + CV_t = ACBf_{\max(t=ES)} + EV - AC$$

[Ecuación 4-23]

Con todo lo anterior, procedemos a realizar el seguimiento y control de los proyectos aplicando las nuevas ecuaciones.

En fase de planificación, previo a la ejecución del proyecto, representamos el gráfico de control (Figura 4-24), considerando para el cálculo de las curvas, que el proyecto se ejecuta según su planificación inicial.

En fase de ejecución del proyecto, para cada periodo de tiempo, incorporamos en el gráfico de control los índices SCoI y CCoI.

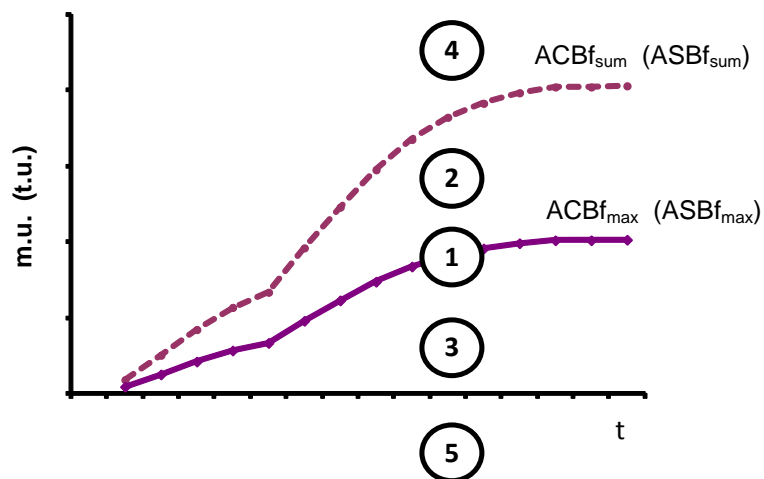


Figura 4-24 Marco gráfico de control.

4.4.2 Sensibilidad a los límites de control

Los valores P_{min} y P_{max} determinan cómo de estricto es el control que queremos ejercer sobre el proyecto. En la práctica los niveles del 10% (P_{min}) y 90% (P_{max}) son comúnmente utilizados ya que abarcan el 80% del área de la función estadística de la duración total del proyecto (coste).

En esta sección estudiamos la influencia de los límites de control (percentiles o márgenes de tolerancia), ya que su elección afecta también a los índices de control y al gráfico de control.

La elección de percentiles mayores (por ejemplo P_{90} frente a P_{75}) conlleva un margen más amplio de control, menos riguroso, ya que los valores que podrá adoptar el índice de control serán mayores sin que se considere el proyecto fuera de control (Figura 4-25).

En orden inverso, la elección de percentiles menores implica que se reducirá el ancho de banda o margen de confianza de los valores que pueda llegar a resultar el índice de control.

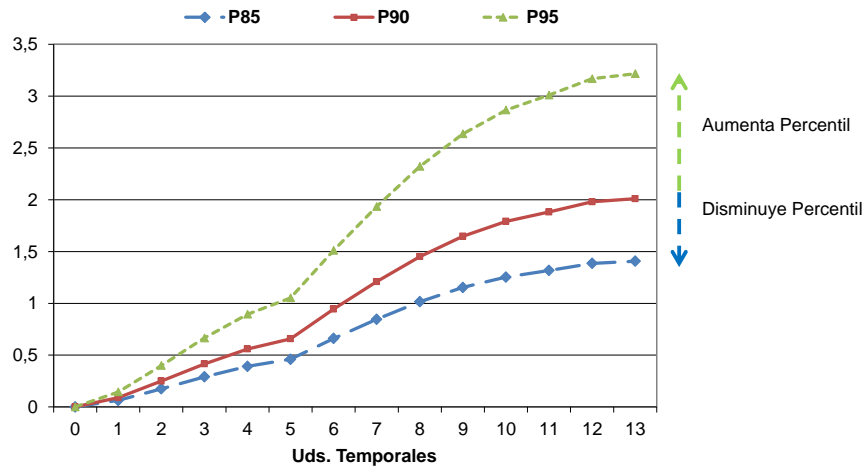


Figura 4-25 Sensibilidad a la modificación del Percentil.

La diferencia entre la elección de un percentil más riguroso que otro más flexible, se puede apreciar gráficamente en la Figura 4-26. Se observan las funciones de distribución de la duración total del proyecto con los percentiles elegidos en cada caso como márgenes de tolerancia (P10/P90 en la parte superior y P75/P15 en la parte inferior). Para cada caso, en función del percentil elegido, resultará un gráfico de control con curvas de control de distinto valor.

Este razonamiento lo explicamos con dos ejemplos gráficos en los que modificamos los percentiles elegidos y observaremos las consecuencias que ello conlleva.

Para un proyecto en particular, en la Figura 4-26 se muestran dos entornos de control diferentes: el primero con un margen de confianza mayor o con un rango de control más ancho, donde P_{min} y P_{max} son 10% y 90%, con valores de $P_{min}=12,55$ t.u. (unidades de tiempo) y $P_{max}=16,20$ t.u.

El entorno más estrecho, o con menor margen de confianza, se ha elegido con probabilidades de 15% y 75%, a los cuales les corresponden los valores de 12,84 y 15,13. En ambos casos, la superficie oscura debajo de la función de probabilidad de duración del proyecto en las figuras expresa la probabilidad de que el proyecto termine entre los límites de control.

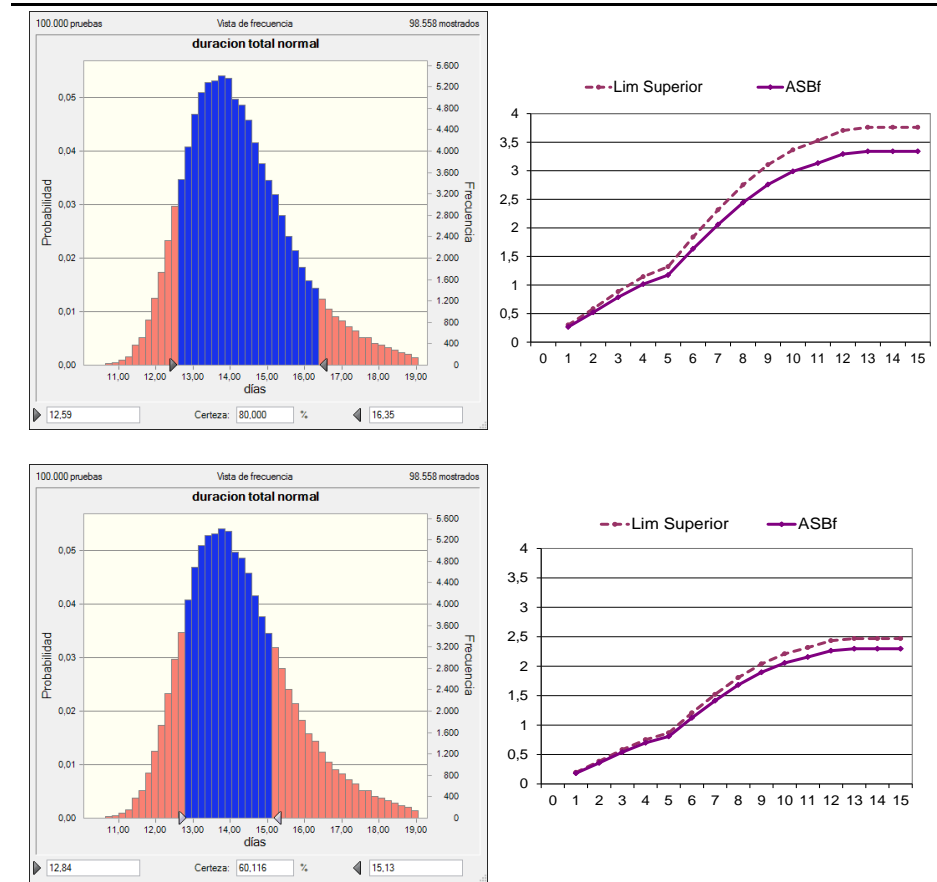


Figura 4-26 Sensibilidad a la modificación del Percentil. Función de distribución de probabilidad y Gráfico de control. P90/P10 frente a P75/P15

En la Figura 4-26, representamos a los *buffers* acumulados. Por supuesto, en el caso de control más estrecho (P15 y P75), los *buffer* acumulados son más bajos que los valores que se obtienen con el margen de control más ancho.

Pero, como vemos en la Figura 4-27, el índice de control de programación también se ha modificado. En ambos casos, durante los dos primeros períodos, el proyecto se ajusta al calendario, ya que el índice de control es igual al *buffer* máximo acumulado ($SCoI = ASBf_{\max}$). A partir de ese periodo el proyecto comienza a retrasarse. Se puede observar como el Índice de control de programación está por debajo de la curva del *buffer* acumulado ($SCoI < ASBf_{\max}$).

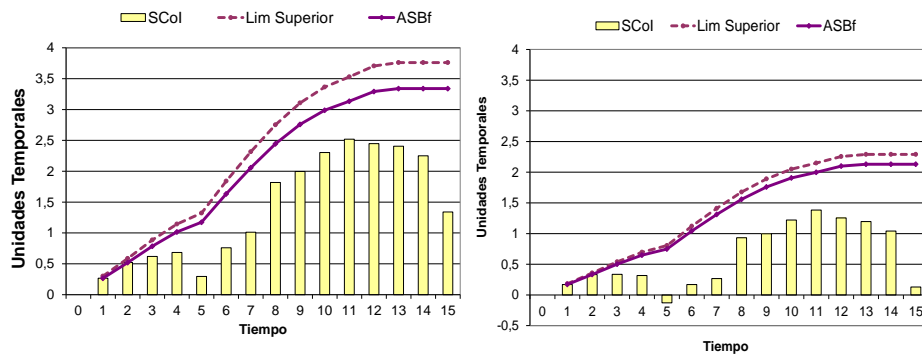


Figura 4-27 Sensibilidad a la modificación del Percentil. Gráfico de Control y SCoI. P90/P10 frente a P75/P15

En el caso de la Figura 4-27 con percentiles P10 y P90, el índice de control es siempre positivo, es decir, la duración del proyecto siempre se mantiene dentro de los límites de control y el director del proyecto no advirtió acerca de la posibilidad de ocurrencia de eventos inesperados.

En el caso más estrecho, percentiles P75 y P15, el Índice de Control de programación adquiere un valor negativo en el período 5, acercándose también a valores negativos en el último periodo de ejecución. Esta situación debería alertar al director del proyecto sobre posibles cambios no planificados u ocurrencia de errores sistémicos dentro del propio proyecto.

Cuando el control es más estrecho, las señales de advertencia son más frecuentes al realizarse un control más preciso y riguroso. Se debe alcanzar un compromiso a la hora de elegir dichos márgenes de control con el fin de gestionar el proyecto adecuadamente.

Podemos afirmar que hemos propuesto un gráfico de control simple para realizar el seguimiento y control en los proyectos, incorporando incertidumbre en las actividades del mismo. Hemos representado la evolución de los indicadores de control propuestos por Pajares & López-Paredes (2011), añadiendo dos nuevas medidas que serán las que configuren el marco gráfico, para potenciar el significado y utilidad de dichos indicadores.

Con este nuevo marco gráfico el director de proyecto podrá determinar gráficamente si el proyecto se retrasa o no, y si la desviación respecto de los valores planificados se mantiene dentro de la variabilidad esperada o prevista (aplicamos un razonamiento similar para el coste). Si las desviaciones son

mayores que los valores permitidos, se deben tomar medidas correctivas con el fin de controlar el proyecto. Si se consigue un buen rendimiento en el proyecto, con valores en adelanto (infracoste) por encima de lo previsible, la metodología nos alertará acerca de las posibilidades de mejora.

Se trata de una metodología sencilla, ya que no necesita más datos que los utilizados para llevar a cabo el análisis de EVM y la simulación de Monte Carlo.

Hemos utilizado el nuevo marco gráfico para incorporar los índices de control. Hemos realizado un análisis de distintas situaciones posibles que puede adoptar el proyecto y hemos comprobado el comportamiento de los índices de control, observando su robustez, mostrándonos en cada periodo de tiempo la evolución del proyecto con respecto a la variabilidad de las actividades.

Resultados parciales de este capítulo han sido publicados en diferentes congresos nacionales e internacionales, exponiendo los resultados de las investigaciones según se iban produciendo y que han servido para la elaboración de este apartado ((Acebes, Pajares, & López-Paredes, 2010a), (Acebes, Pajares, & López-Paredes, 2010b), (Acebes et al., 2010c), (Acebes, Pajares, & López-Paredes, 2012a), (Acebes, Pajares, & López-Paredes, 2012b), (Acebes et al., 2013a)).

Los líderes del proyecto deben tener la autoridad para adaptar sus planes a las condiciones cambiantes. Los proyectos se llevan a cabo en un entorno cambiante de la incertidumbre y el riesgo. La reducción de la complejidad del trabajo y la simplificación de los procesos de trabajo contribuirán a reducir el riesgo.



5

Estudio de la Incertidumbre en los Proyectos



5 Estudio de la Incertidumbre en los Proyectos

En este capítulo se exponen una serie de conclusiones extraídas durante el proceso de investigación. Dado que el tema central de la investigación es la incertidumbre presente en los proyectos, han surgido cuestiones relacionadas con esta materia a las que hemos tratado de dar solución.

Una de ellas ha sido el estudio del riesgo del proyecto en presencia de un tipo de incertidumbre específica, que hemos denominado Estacional, y que se presenta ocasionalmente a lo largo del tiempo, con distinto grado de probabilidad de aparición. En este estudio también se analiza la variación que sufren los distintos indicadores que utilizamos para priorizar la importancia de las actividades que conforman el proyecto.

Por otra parte, y también relacionado con la incertidumbre presente en las actividades del proyecto, hemos realizado distintos análisis de sensibilidad, modificando los parámetros estadísticos de las actividades (entradas) para observar y analizar cómo se comportan las variables de salida del proyecto (tiempo, coste). En este estudio hemos estudiado la evolución de los indicadores con los que medimos la importancia relativa de las actividades.

En cada uno de estos estudios previos hemos obtenido unos resultados parciales que más adelante explicaremos. Pero, de forma global, nos han servido para entender el comportamiento de las actividades dentro del proyecto, considerando que cada actividad está condicionada por la incertidumbre asociada a la duración de la misma. Igualmente hemos utilizado esos resultados para ampliar los conocimientos en cuanto a la importancia relativa que cada una de las actividades tiene en el proyecto, y cómo puede ser modificada variando alguno de los parámetros de entrada del proyecto.

5.1 Incertidumbre Estacional

5.1.1 Introducción. Sensibilidad de las actividades

Desde la introducción de la metodología PERT a finales de los años 50 en programación de proyectos, la investigación sobre medición de la sensibilidad de un proyecto ha recibido cada vez más atención por parte de los profesionales y académicos. Motivado por el conocimiento común que el análisis del Camino Crítico tradicional da una estimación de la duración del proyecto optimistas (véase, por ejemplo (Klingel, 1966), (Schonberger, 1981), (Vanhoucke, 2010), (Pontrandolfo, 2000), y muchos otros), la medición de la sensibilidad del proyecto se ha convertido en un parámetro clave para los Directores de Proyectos.

Mummolo (1994) trata de solucionar este problema desarrollando una nueva técnica que denomina *Pert-Path Network Technique* (PPNT), que utilizará para la planificación y control de las actividades del proyecto. Esta técnica representa todos los posibles caminos existentes en el proyecto, analizando todas sus posibles combinaciones. A partir de ahí, calcula la duración estimada de cada uno de ellos y, por tanto, del proyecto completo. Mummolo (1997) amplía el estudio sobre esta técnica y la utiliza para el cálculo de la importancia (Criticidad) de las actividades, teniendo en cuenta para su determinación, todas las actividades del proyecto y no sólo aquellas que pertenecen al camino crítico.

El cronograma del proyecto tiene, a menudo, una visión determinista sobre el futuro y, rara vez, contiene algún valor práctico ni estimaciones correctas de duración de las actividades y costes. Sin embargo, utilizando duraciones y costes estocásticos con la simulación de Monte Carlo nos permite detectar un valor de sensibilidad para cada actividad. La simulación de Monte Carlo se utiliza a menudo para crear modelos de simulación de proyectos que permiten la estimación de la incertidumbre (Acebes et al., 2013a, 2014a). Si las duraciones de las actividades se modelan mediante una función de distribución de probabilidad, la simulación de Monte Carlo puede dar como resultado una distribución de probabilidad de la duración total del proyecto. Esta salida es útil ya que proporciona un soporte probabilístico para hacer predicciones sobre la duración real de los proyectos. Además, podemos utilizar la simulación para

tratar de averiguar qué actividades son las que tienen más influencia en la duración o la variabilidad del proyecto.

La priorización de los riesgos es una parte importante de cualquier proceso de gestión de riesgos porque focaliza la atención en los problemas más importantes (Hopkinson, Close, Hillson, & Ward, 2008). Sin embargo, "lo más importante" es variable en el sentido de que depende del contexto. Varía desde el punto de vista de un *stakeholder* a otro y puede cambiar durante el curso del proyecto, desde un estado a otro.

El proceso de priorización de riesgos está comúnmente asociado con la evaluación de la probabilidad y el impacto del riesgo, calculando en una matriz probabilidad/impacto el resultado del nivel de riesgo de la actividad con respecto al resto, pero pueden priorizarse las actividades en función de factores de sensibilidad, que hacen que una actividad sea más importante que otras en determinadas condiciones o en determinados periodos del proyecto.

Tradicionalmente, la importancia de la actividad del proyecto se ha medido por el "Índice de Criticidad", este concepto fue introducido por Martin (1965), y se define como la probabilidad de que una actividad pertenezca al camino crítico. Williams (1992) cuestiona la consistencia del Índice de Criticidad como único indicador de la importancia de cada actividad en la duración del proyecto. Señala que el Índice de Criticidad clásica no siempre ofrece información completa acerca de la importancia de las actividades y propone utilizarlo conjuntamente con el "Índice de Crucialidad". Este índice se define como la correlación entre la duración de la actividad y la duración total del proyecto.

En Elmaghraby (2000), se realiza un breve resumen sobre las ventajas y desventajas de estas medidas de sensibilidad discutidas en Williams (1992). Opina que se debe dar la importancia relativa a las actividades del proyecto considerando una versión combinada de estas medidas de sensibilidad. Por otra parte, revisa los esfuerzos de investigación relacionados con la sensibilidad de la media y la varianza de la duración total de un proyecto debido a los cambios en la media y la varianza de las actividades individuales.

Por último, Vanhoucke (2010) ha validado cuatro medidas conocidas de sensibilidad de las actividades, el Índice de Criticidad (CI), el índice de Importancia (SI), el índice Crucialidad (CI) y el índice de Sensibilidad de

Programación (SSI), en un gran conjunto de proyectos ficticios, y ha llegado a la conclusión de que el SSI tiene el mayor potencial para discriminar la sensibilidad entre las actividades del proyecto. Por otra parte, el estudio concluye que el potencial de las medidas de sensibilidad basados en la actividad aumenta cuando las redes del proyecto contiene más actividades paralelas.

5.1.2 Incertidumbre Estacional

Durante años, muchos estudios de investigación se han centrado en proyectos de programación, asumiendo un entorno determinista y con información completa de la tarea. Sin embargo, durante la ejecución del proyecto, la programación puede estar sujeta a incertidumbre, que puede dar lugar a modificaciones significativas del cronograma. Este hecho ha llevado a la aparición de distintas investigaciones sobre el tema ((Chapman, Ward, & Bennell, 2000), (Hillson, 2002), (S. Ward & Chapman, 2003), (Jaafari, 2006), (Perminova et al., 2008), entre otras).

Algunos autores piensan que hay dos tipos de incertidumbre: Incertidumbre Aleatoria, que es un proceso estadístico natural que existe en los proyectos. Podemos encontrar la Incertidumbre Aleatoria en actividades de trabajo para su coste y programación.

La Incertidumbre Epistémica es consecuencia de acontecimientos inesperados que "podrían" suceder en un proyecto.

Ambos, incertidumbres Aleatorias y Epistémicas son responsables de los riesgos del proyecto. El riesgo que crea la Incertidumbre Aleatoria en un proyecto ocasiona que pueda estar por encima del presupuesto o que esté retrasado, debido a las variaciones naturales que ocurren al realizar los trabajos, a las diferencias de productividad, a la volatilidad natural de los precios de materiales y mano de obra. Este "tipo" de riesgo puede ser manejado con márgenes.

La incertidumbre Epistémica crea riesgos a través de la ocurrencia de algún evento probabilístico. Ejemplos típicos de riesgos epistémicos son debidos a la tecnología del proyecto, a los procesos, y a otras actividades. La gestión de riesgos para este tipo de incertidumbre se basa a menudo en dar "respuesta a los riesgos". Hay varias clases de respuesta, pero los enfoques más utilizados para

aplicarlas son dos. Gestionar el riesgo con el trabajo planificado en la línea base. Este enfoque se basa en la inversión monetaria y de tiempo para reducir el riesgo o incluso hacerlo desaparecer. El segundo enfoque se basa en proveer márgenes de reserva (o contingencia) para “manejar” las consecuencias del riesgo.

Chapman & Ward (2003b) establecen diferentes áreas en las que puede aparecer incertidumbre a lo largo del ciclo de vida del proyecto (variabilidad asociada con las estimaciones, incertidumbre sobre las previsiones, incertidumbre sobre el diseño y la logística, incertidumbre acerca de los objetivos y prioridades, incertidumbre acerca de las relaciones fundamentales entre las partes del proyecto). Jaafari (2006) también incluye una lista de riesgos variables que se encuentran normalmente en grandes proyectos: riesgo de volumen de mercado, riesgo del precio del mercado, riesgos políticos, riesgos técnicos...

En esta lista también se incluye el llamado Riesgo Ambiental: Probabilidad de que un determinado proyecto tendrá impactos ambientales adversos más allá de sus límites permitidos.

Chapman & Ward (2004) nos muestran un ejemplo de un proyecto importante de construcción de conductos petrolíferos en el Mar del Norte, donde este tipo de proyectos puede verse afectado por el estado de la mar, especialmente en época invernal. A través de análisis de riesgos, el gerente del proyecto puede decidir utilizar un equipo más adecuado a las condiciones climáticas adversas para reducir el riesgo.

Ejemplos similares se pueden encontrar en los proyectos de obras públicas, que podrían verse afectadas por la lluvia, o los proyectos de construcción en las zonas tropicales, y otros.

En este sentido, Acebes, Pajares, Galán, & López-Paredes (2014b) presentan un estudio donde se considera la presencia de una incertidumbre de tipo estacional (por ejemplo meteorológica) que afecta a algunas de las actividades que componen el proyecto. Se discute cómo el riesgo del proyecto puede verse afectado por tal incertidumbre, dependiendo de la fecha de inicio del mismo.

Se utiliza el concepto de Línea Base de Riesgos (*Schedule Risk Baseline* – SRB), introducido por Pajares & López-Paredes (2011), para la representación

del nivel de riesgo del proyecto y para realizar la comparación de cada simulación.

Para ilustrar este apartado se ha utilizado la red de proyecto propuesta por Lambrechts et al. (2008) en sus trabajos de investigación sobre programación de proyectos. Se ha representado en la Figura 5-1 el diagrama AON (*Activity On Node*) del proyecto elegido. La red utilizada es simple a la vez que presenta tres caminos paralelos, con diferente profundidad y con una bifurcación en una de sus actividades.

La duración de las actividades ha sido modelada como una función de distribución normal con los parámetros que se muestran en Tabla 5-1.

Asumiendo un enfoque determinista y de duración media, la duración total del proyecto será de 13 unidades de tiempo, que corresponderán con las duraciones de la ruta formada por las actividades A1, A4 y A7 y también con la duración de la ruta formada por las actividades A3, A6 y A8. Por lo tanto, podemos deducir la existencia de dos posibles caminos críticos, con la misma duración.

Tabla 5-1
Descripción de actividades

Id. Actividad	Duración	Varianza	Coste Variable	Coste Fijo
A1	2	0,15	555	200
A2	4	0,83	1300	450
A3	7	1,35	48	45
A4	3	0,56	880	36
A5	6	1,72	14	20
A6	4	0,28	1210	40
A7	8	2,82	725	150
A8	2	0,14	100	150

La incertidumbre asociada a cada actividad implica que la duración es considerada estocástica, adquiriendo valores según una función de distribución de probabilidad.

Aparte de la Incertidumbre Aleatoria que presenta cada una de las actividades que componen el proyecto, queremos estudiar el comportamiento del proyecto ante la aparición de una Incertidumbre Epistémica. Para ello, introducimos una

incertidumbre “estacional” (incertidumbre meteorológica) que impactará sobre la actividad A7.

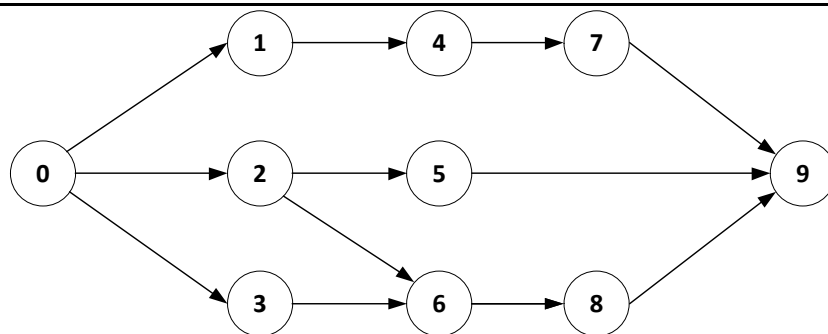


Figura 5-1 Diagrama AON. Fuente (Lambrechts et al 2008).

Esta incertidumbre se presentará en ciertas épocas del año y en otras no, y en dichos periodos en los que pueda ocurrir, la probabilidad de aparición será diferente de un período a otro.

Asumimos, como incertidumbre estacional que afecta a la actividad A7, la existencia de temperaturas inferiores a 0°C (riesgo de heladas) en la ciudad de Valladolid (España).

Tenemos datos estadísticas de días con temperaturas inferiores a 0°C , ordenados por meses y años, en la ciudad de Valladolid. Representamos en la Tabla 4-3 los días en los que la temperatura fue inferior a 0°C en la ciudad de Valladolid, mes a mes, desde el año 1997 hasta el año 2008.

Suponemos que el número de días con heladas durante el año está ajustado a una función de distribución de probabilidad normal, para cada uno de los meses del año, según los datos disponibles en la Tabla 5-2, obteniendo el dato de número medio de días por mes con temperaturas inferiores a 0°C y su varianza.

Representamos en la Figura 5-2 el valor promedio de días con heladas ocurridos en la ciudad de Valladolid durante los distintos meses del año, en el periodo de tiempo elegido.

Tabla 5-2
Temperaturas por años y meses en la ciudad de Valladolid

Año	Enero	Feb	Mazo	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
1997	10	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	23
1998	8	7	3	2	0	0	0	0	0	0	11	22	53
1999	19	19	4	2	0	0	0	0	0	0	9	16	69
2000	28	5	5	3	0	0	0	0	0	0	5	2	48
2001	7	10	0	3	0	0	0	0	0	0	13	25	58
2002	9	11	2	3	0	0	0	0	0	0	1	2	28
2003	16	15	1	1	0	0	0	0	0	0	1	8	42
2004	14	17	10	2	0	0	0	0	0	0	9	10	62
2005	22	24	13	2	0	0	0	0	0	0	6	18	85
2006	17	20	4	1	0	0	0	0	0	0	1	19	62
2007	13	2	7	2	0	0	0	0	0	0	10	16	50
2008	12	5	8	0	0	0	0	0	0	1	6	18	50
Valor medio en el periodo 1997/2008	14,6	11,7	4,8	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	6,0	13,7	52,5
Varianza	38,6	51,5	16,6	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	20,0	56,8	286,6

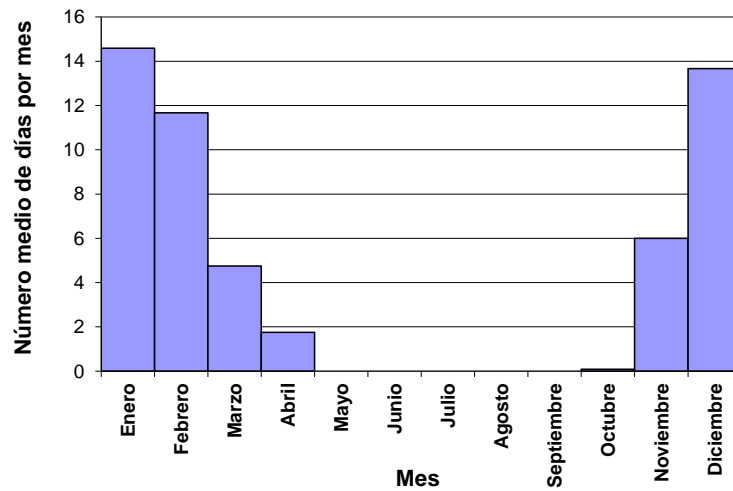


Figura 5-2 Valor medio de días con temperaturas bajo 0°C en la ciudad de Valladolid

Podemos observar cómo el mes de enero y de diciembre son los meses con mayor promedio de días con heladas, seguido por el mes de febrero. También observamos que el riesgo desaparece durante los meses de mayo a septiembre.

Asumimos que este riesgo estacional descrito tendría un impacto negativo en la actividad A7 de nuestro proyecto, si llegara a ocurrir, que provocará un retraso en dicha actividad del 25% de la duración prevista para ese período.

De esta manera hemos definido el suceso inesperado o evento inicializador, tal como se recoge en Baraldi & Zio (2008) y Huang, Chen, & Wang (2001).

Este evento se desencadenará según su función de distribución asociada, calculada en base a los datos estadísticos recogidos. Si se produce el evento, tendrá un impacto negativo sobre la actividad que se ve afectada por el mismo (actividad A7), no afectando al resto de actividades. Si el evento, aun estando en época del año que existe probabilidad de existir, no llegara a materializarse, no tendría ningún impacto sobre la actividad A7.

En cualquiera de los periodos de tiempo que se materialice el evento, el impacto sobre la duración de la actividad afectada será siempre constante, un 25% de retraso en la duración prevista de la actividad A7 para ese periodo.

5.1.3 Integración de la Incertidumbre del Proyecto y del Riesgo Estacional

Las actividades del proyecto incluyen incertidumbre en su duración, cada una de ellas según su función de distribución de probabilidad. La actividad A7 está expuesta también a riesgo estacional que puede impactar sobre esta actividad.

Utilizamos simulación de Monte Carlo para determinar el riesgo del proyecto y lo representamos mediante la Línea Base de Riesgo (SRB). Pajares & López-Paredes (2011) definen la Línea Base de Riesgos del Proyecto como la evolución del valor del riesgo del proyecto a lo largo de la ejecución del ciclo de vida de este. El riesgo del proyecto, para cualquier periodo de tiempo, es calculado como el riesgo de las tareas pendientes de ejecutar (aquellas no completadas), suponiendo que el proyecto se ha llevado a cabo como estaba previsto hasta ese momento.

Aplicamos simulación de Monte Carlo en cada periodo de ejecución del proyecto y extraemos y representamos el valor de la varianza de la duración total del proyecto, teniendo en cuenta que sólo las tareas pendientes de ejecutar contribuyen a la incertidumbre de duración del proyecto.

El riesgo del proyecto en cada período de tiempo (medido como el valor de la varianza de la duración total del proyecto) se determina por el valor de la incertidumbre de cada actividad junto con la incertidumbre estacional (dependiendo del tiempo de ejecución del proyecto), que puede repercutir negativamente en la actividad A7.

Desde un punto de vista determinista y considerando semanas como la unidad de tiempo del proyecto, el proyecto durará 13 semanas, siendo la duración de la actividad A7, 8 semanas.

Teniendo en cuenta la naturaleza estocástica del proyecto, la duración total del proyecto depende de la función de distribución de probabilidad de cada actividad. Mostramos en este capítulo que también depende de la fecha de comienzo del proyecto como consecuencia del riesgo estacional.

El riesgo del proyecto viene determinado por la incertidumbre de cada una de las actividades y también por la fecha de ejecución de la actividad A7, que puede sufrir un impacto negativo en la duración total de esta actividad si se llegase a ejecutar dentro de meses con probabilidad de que existan heladas.

Observamos las diferentes situaciones que pudieran presentarse durante la ejecución del proyecto.

La primera situación es aquella en la que la actividad A7 se ejecuta completamente en algún mes/meses donde no hay riesgo de heladas (de mayo a septiembre). En este caso no habría posibilidad de impacto estacional.

Otra opción es la representada en la Figura 5-3, donde la actividad A7 se ejecute completamente dentro de meses con probabilidad de heladas. En este caso el riesgo de que se retrase el proyecto es mayor, ya que la actividad está expuesta a dicho riesgo durante la ejecución de esa actividad, desde su inicio hasta la ejecución completa de la actividad. Aunque el impacto es constante (25% de retraso sobre el valor planificado para el periodo de tiempo en el que se ejecute la actividad A7), la probabilidad de que llegue a producirse el riesgo es distinta, en función de la fecha de ejecución de la actividad. Por lo tanto, en función de la fecha de comienzo del proyecto.

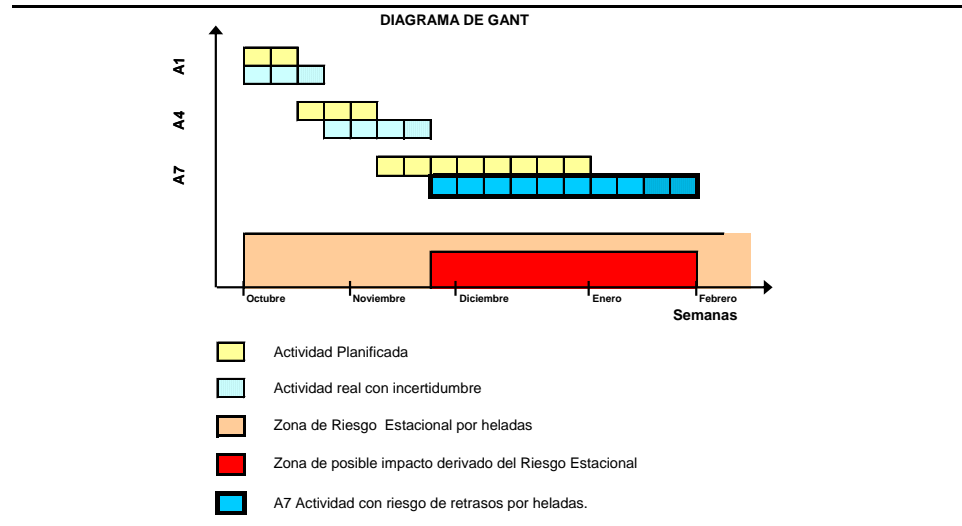


Figura 5-3 Ejemplo de actividad con incertidumbre estacional ejecutada completamente en zona con riesgo de heladas

Otra posible opción de ejecución del proyecto es aquella que parte de la actividad A7 comience su ejecución dentro de zona con riesgo de heladas y finalice su ejecución en una época donde ya no exista ese riesgo, representado en la Figura 5-4.

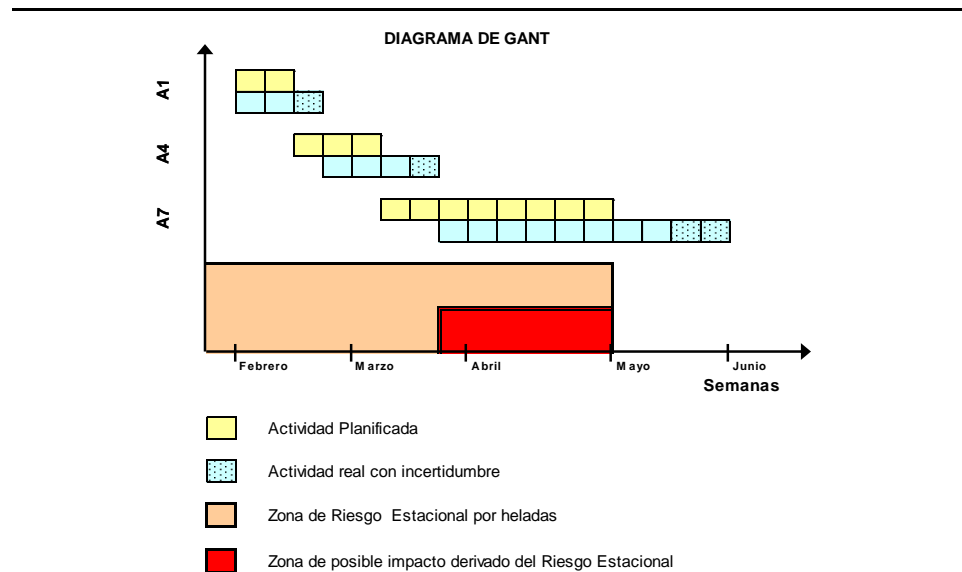


Figura 5-4 Actividad con incertidumbre estacional ejecutada parcialmente en zona con riesgo de heladas

Durante la planificación del proyecto la actividad A7 estaba previsto que se ejecutase completamente dentro de zona con existencia de riesgo estacional pero debido a la incertidumbre de las actividades, sólo parte de dicha actividad se ejecuta dentro de este periodo estacional de incertidumbre.

Y viceversa, por último, pudiera ocurrir que la actividad comience su ejecución en un mes sin riesgo de heladas y finalice su ejecución en un mes donde sí exista ese riesgo. Según se refleja en Figura 5-5, en fase de planificación la actividad se ejecutaría en fechas sin existencia de riesgo estacional pero, debido a la incertidumbre de las actividades del proyecto, la ejecución de la actividad A7 puede retrasar su comienzo, llegando a ejecutarse parte de dicha actividad en zona con incertidumbre estacional.

Con todos los condicionantes anteriores, se realiza simulación de Monte Carlo, obteniendo el valor de la varianza de la función de distribución de la duración total del proyecto, en cada uno de los periodos de tiempo. Para realizar la simulación en cada periodo de tiempo, consideramos que el proyecto se ejecuta según está planificado.

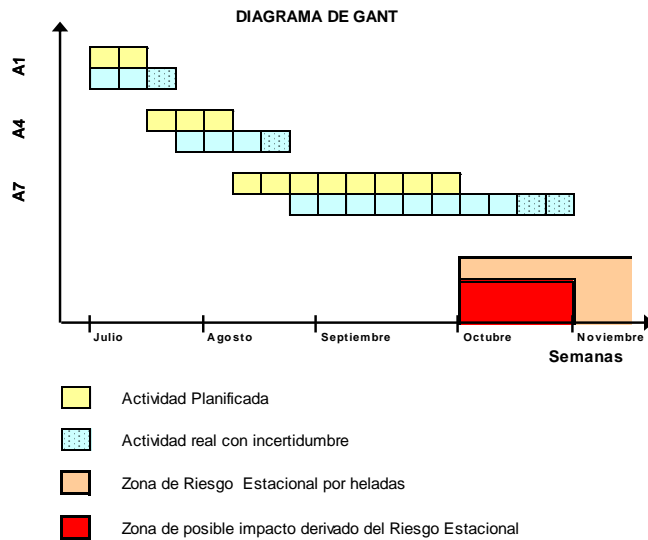


Figura 5-5 Dos situaciones de actividad con incertidumbre estacional ejecutada en zona con riesgo de heladas

Repetimos la simulación modificando la fecha de comienzo del proyecto, fijando la fecha de inicio, el primer día del mes, para cada uno de los meses del año. Finalmente representamos la Línea Base de Riesgos correspondiente.

Hemos representado en la Figura 5-6 cada línea base de riesgo del proyecto basado en la fecha de inicio de éste, suponiendo que el proyecto de comienzo su ejecución el primer día de cada mes del año.

Se han representado las Líneas Base de Riesgo de las simulaciones realizadas, donde se ha modificado la fecha de comienzo del proyecto y se ha considerado la existencia de un riesgo estacional que afecta a la duración de una de las actividades del proyecto (A7). Comprobamos como el riesgo total del proyecto es distinto en función del mes en el que comience la ejecución del proyecto.

En todos los casos, la SRB disminuye a medida que avanza el proyecto. Según se van ejecutando las actividades, el proyecto reduce incertidumbre debido a las actividades ya realizadas.

Las simulaciones muestran variación en el nivel inicial de los riesgos del proyecto (punto de partida de la SRB), como consecuencia del impacto que la incertidumbre estacional ejerce sobre la actividad A7, que provoca un aumento del riesgo global del proyecto.

En las simulaciones donde la actividad A7 se está ejecutando en las fechas con mayor probabilidad de temperaturas inferiores a 0 °C (proyecto que comienza en octubre), el nivel de riesgo es más alto, mientras que las simulaciones donde se ejecuta la actividad A7 en fechas con menor probabilidad de temperaturas inferiores a 0 °C (proyecto que comienza, por ejemplo, en julio), el nivel de riesgo del proyecto es menor.

Debemos tener en cuenta que la actividad A7 se ejecuta después de actividades A1 y A4. Desde un punto de vista determinista, requiere 5 semanas desde el inicio del proyecto hasta que comienza la ejecución de la actividad A7. El hecho de que un proyecto comience en un mes con riesgo de heladas, puede suceder que el comienzo de la actividad A7 pase a realizarse en un mes sin probabilidad de dicho riesgo. Y viceversa, puede ocurrir que el proyecto comience en fechas sin riesgo de heladas y la actividad A7 comience su ejecución o se ejecute en parte en periodo con existencia de dicho riesgo.

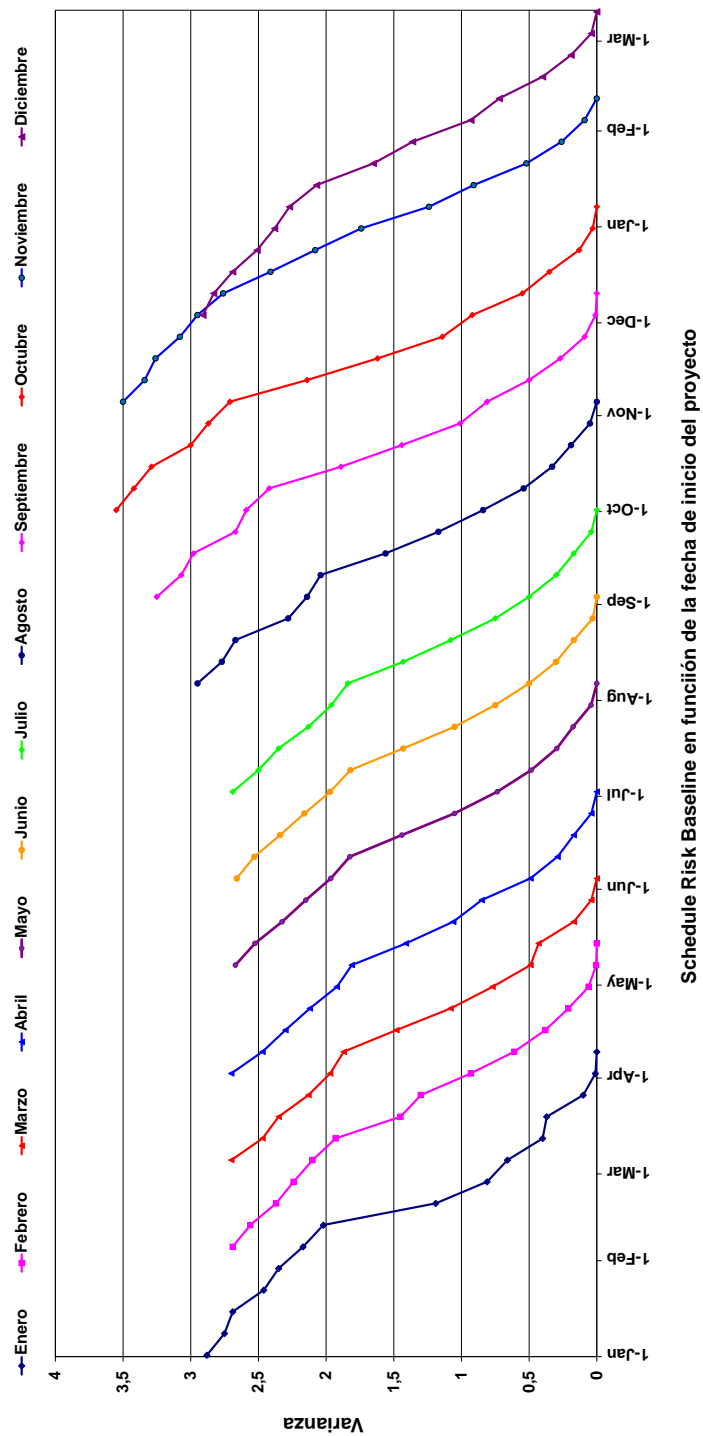


Figura 5-6 Línea Base de Riesgo según el mes de ejecución del proyecto

Por otra parte, hay que tener en cuenta la naturaleza estocástica de todas las actividades, que pueden alargar y/o acortar su duración en función de su función de distribución de probabilidad. Esto se puede traducir en que determinísticamente la actividad A7 pudiera no tener que llegar a ejecutarse en un mes con riesgo de heladas pero que, debido a la naturaleza estocástica de las actividades, estas se retrasasen y pudieran favorecer que finalmente la ejecución de A7, o de parte de ella se ejecute en zona con riesgo de impacto.

En la Figura 5-7 representamos el SRB dependiendo del período de ejecución del proyecto, integrando las simulaciones de cada uno de los meses para el tiempo de ejecución. Podemos ver la diversidad de nivel de riesgo de cada proyecto simulado según el mes de inicio, así como la diferente evolución de cada una de las simulaciones por periodo de tiempo.

Esto es debido a la presencia de incertidumbre estacional que afecta a la actividad A7, dependiendo del mes de la ejecución de la actividad y a la mayor o menor probabilidad de impacto en esta actividad.

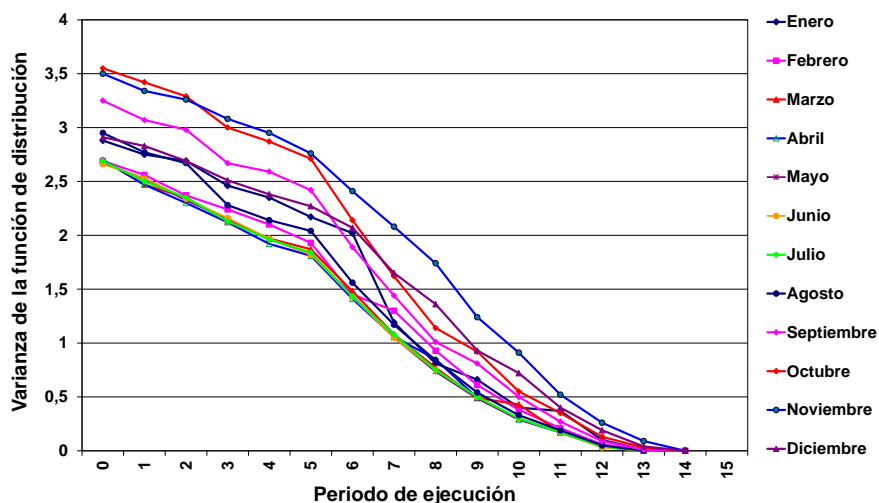


Figura 5-7 Línea Base de Riesgos del Proyecto en función del periodo de ejecución

En las simulaciones donde se ejecuta la actividad A7 en meses con nula probabilidad de heladas (simulaciones desde mayo a julio) las curvas promedio son casi coincidentes, porque la incertidumbre es proporcionada únicamente por las actividades, no hay riesgo asociado con la incertidumbre estacional.

En este apartado hemos analizado cómo influye la presencia de un riesgo “estacional” sobre la programación del proyecto, en función de la fecha de ejecución de sus actividades. Para ello, disponemos de datos estadísticos relativos al evento estacional que impacta negativamente sobre una de las actividades del proyecto.

Se ha representado la Línea Base de Riesgos del Proyecto, calculada teniendo en cuenta la aportación al riesgo procedente de la incertidumbre aleatoria de las actividades que componen el proyecto y de la componente de riesgo estacional que afecta a una de sus actividades. Se realiza la comparación gráfica para cada una de las distintas simulaciones, pudiendo determinar cuál sería la fecha idónea de comienzo del proyecto.

El nivel de riesgo del proyecto, representado por la gráfica SRB, aumenta cuando la actividad afectada por la incertidumbre estacional se ejecuta en periodos con mayor probabilidad de ocurrencia. Nuestros resultados muestran que los proyectos que están sujetos a incertidumbres estacionales de cualquier tipo pueden tener un impacto negativo en el proyecto. Un análisis teniendo en cuenta al mismo tiempo la estocasticidad asociada a las actividades, junto con las incertidumbres estacionales, podría ayudarnos a conocer la mejor fecha de inicio del proyecto, con menor riesgo de romper la línea de base prevista.

5.1.4 Análisis de sensibilidad

Utilizando los datos proporcionados por las simulaciones del apartado anterior, se ha realizado un análisis de sensibilidad de las actividades que componen el proyecto, que puede ayudarnos a priorizar las actividades del mismo.

Mediante simulación de Monte Carlo, se ha estudiado la importancia relativa de las actividades del proyecto, comprobando cómo puede variar la importancia de cada una de ellas en función de la fecha de comienzo del proyecto, manteniendo la hipótesis de la presencia de una incertidumbre estacional que impacta sobre una de las actividades del proyecto.

En el análisis de sensibilidad hemos utilizado tres indicadores.

Índice de Criticidad (*Criticality Index*, CI): mide la probabilidad que una actividad pertenezca al camino crítico. Es una simple medida obtenida de la simulación de Monte Carlo y se expresa como porcentaje que representa la

probabilidad de que dicha actividad sea crítica. El Índice de Criticidad a menudo no ofrece una medición aceptable del riesgo del proyecto. La principal debilidad del Índice de Criticidad es que el foco de atención está restringido a la medida de la probabilidad, lo cual no significa necesariamente que actividades que tengan alto Índice de Criticidad traigan consigo un alto impacto en la duración total del proyecto.

Índice de Crucialidad (*Cruciality Index*, CRI); está basado en el coeficiente de correlación producto-momento de Pearson ente la duración de la actividad y la duración del proyecto completo. Esta medida de la correlación es una medida del grado de relación lineal entre dos variables. Sin embargo, la relación existente entre la duración de la actividad y de la duración total del proyecto a menudo sigue una relación no lineal. Mide la porción de incertidumbre de la duración total del proyecto que puede ser explicada por la incertidumbre de la actividad.

Índice de Sensibilidad de Programación (*Schedule Sensitivity Index*, SSI): el PMBoK (Project Management Institute, 2013) propone combinar las desviaciones estándar de la duración de la actividad y la duración total del proyecto con el Índice de Criticidad. El cálculo del índice se obtiene con la Ecuación 5-1:

$$SSI = \left[\frac{\text{var}(d_i)}{\text{var}(C_{max})} \right] \cdot CI \quad [\text{Ecuación 5-1}]$$

Representamos en la Figura 5-8 el Índice de Criticidad de las actividades del proyecto, en función del mes de inicio del proyecto. Previamente hemos obtenido mediante simulación de Monte Carlo los valores del Índice de Criticidad, correspondientes a cada actividad, en función del mes de comienzo del proyecto, indicados en la Tabla 5-3.

En este gráfico se observa que las actividades se agrupan en tres diferentes caminos posibles: el camino formado por las actividades A1, A4 y A7, el formado por las actividades A3, A6 y A8 y el camino formado por las actividades A2 y A5.

Teniendo en cuenta la duración media de cada una de las actividades, la duración del camino A1-A4-A7 es de 13 unidades temporales, lo mismo que el

camino A3-A6-A8. En cambio, el camino A2-A5 tiene una duración media determinista de 10 unidades temporales.

Tabla 5-3
Índice de Criticidad

	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ag	Sept	Oct	Nov	Dic
A1	61,21	53,48	50,60	49,89	49,80	49,46	49,79	50,38	54,76	62,44	68,60	66,62
A2	3,37	4,07	4,22	4,29	4,32	4,28	4,42	4,19	3,92	3,31	2,73	3,07
A3	35,50	42,52	45,29	45,92	45,99	46,23	45,88	45,52	41,39	34,33	28,73	30,38
A4	61,21	53,48	50,60	49,89	49,80	49,46	49,79	50,38	54,76	62,44	68,60	66,62
A5	2,97	3,56	3,74	3,80	3,75	3,79	3,88	3,68	3,44	2,94	2,39	2,74
A6	35,90	43,03	45,77	46,42	46,56	46,72	46,41	46,03	41,88	34,70	29,08	30,71
A7	61,21	53,48	50,60	49,89	49,80	49,46	49,79	50,38	54,76	62,44	68,60	66,62
A8	35,90	43,03	45,77	46,42	46,56	46,72	46,41	46,03	41,88	34,70	29,08	30,71

Mediante simulación de Monte Carlo, considerando únicamente la incertidumbre Aleatoria de las actividades del proyecto (por ejemplo en el mes de junio), comprobamos que las actividades más críticas son A1, A4 y A7, con un Índice de Criticidad en torno al 50%. Las tres actividades tienen el mismo Índice de Criticidad al ser actividades conectadas en serie que pertenecen al mismo camino.

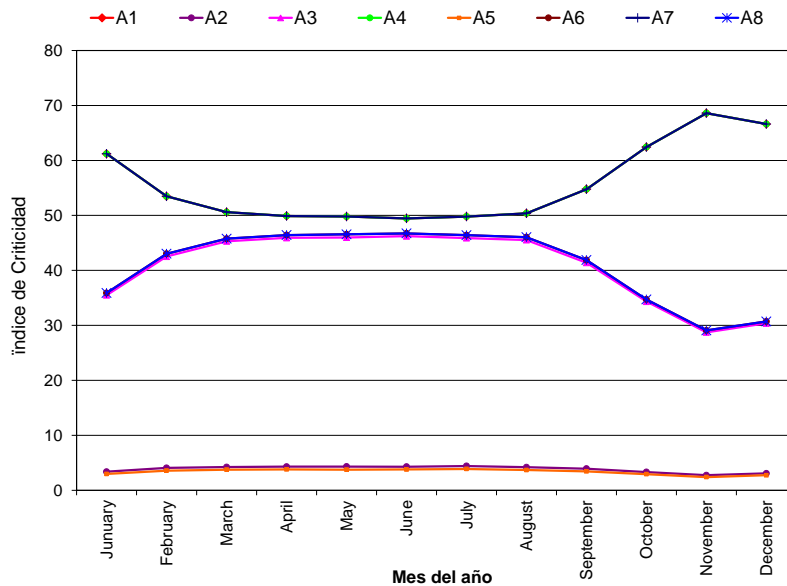


Figura 5-8 Índice de Criticidad en función de la fecha de comienzo del proyecto.

Posteriormente, con un Índice de Criticidad en torno al 46% se sitúan las actividades A3, A6 y A8. A pesar de que el camino formado por estas actividades tienen el mismo valor medio determinista que el formado por las actividades A1-A4-A7, la probabilidad de que el camino crítico pase por A1, A4 y A7 es mayor que la probabilidad de que lo haga por A3, A6 y A8, debido a la incertidumbre que aportan las respectivas actividades.

Por último, observamos que el Índice de Criticidad de las actividades A2 y A5 es muy bajo, del orden del 3 y 4%.

El proyecto que comienza en el mes de junio se ha ejecutado sin que la actividad A7 haya estado expuesta al riesgo estacional analizado (riesgo de heladas). Con inicio de proyecto en meses posteriores, la posibilidad de que la actividad A7 pase a ejecutarse en periodos con riesgo estacional aumenta. Tal como hemos recogido en el apartado anterior, aumenta el valor del SRB (*Schedule Risk Baseline*) del proyecto.

En la gráfica de Criticidad observamos cómo aumenta progresivamente el Índice de Criticidad de las actividades A1, A4 y A7, hasta alcanzar un máximo del 68% en el mes de noviembre.

Esto es debido a que la actividad A7 está expuesta al impacto originado por el riesgo estacional que provoca retrasos en su ejecución y, por tanto, aumenta la duración de dicha actividad. Por consiguiente, aumenta la duración del camino que forman las actividades A1, A4 y A7 y, la Criticidad de todas estas actividades.

De igual modo, el aumento del Índice de Criticidad de las actividades del camino superior hace que disminuya el Índice de Criticidad de las actividades que forman el camino A3, A6 y A8, observando un comportamiento simétrico en la gráfica.

A partir del mes de noviembre, donde se alcanza el valor máximo de Criticidad para la actividad A7 y el resto de actividades de su mismo camino, el valor del índice desciende progresivamente hasta alcanzar de nuevo un valor mínimo en el mes de junio, donde la ejecución de A7 vuelve a realizarse sin riesgo de impacto estacional.

Observamos como la mayor diferencia entre los índices de Criticidad de las actividades A7 y A8 (que pertenecen a caminos distintos) es mayor en el mes de

noviembre, cuando A7 se ejecuta con la mayor probabilidad de que la temperatura sea inferior a 0 ° C, mientras que la diferencia entre los índices de Criticidad es menor en el mes de junio, cuando no existe riesgo estacional durante la ejecución de A7.

En cualquier caso, es razonable pensar que puede haber aumentado la Criticidad de A7, porque ha aumentado la probabilidad de que la duración de la actividad pueda ser mayor. Pero también ha aumentado el Índice de Criticidad de las actividades A1 y A4 en la misma proporción, y en este caso la duración de estas actividades no ha cambiado.

A la hora de priorizar actividades, teniendo en cuenta el Índice de Criticidad obtenido, observamos que es igual de importante la actividad A1 que la actividad A4 y que la actividad A7. Todas ellas tienen el mismo valor del Índice de Criticidad.

También observamos como la evolución del índice en cada una de estas actividades es el mismo, a pesar de que sólo la actividad A7 sufre el impacto de la incertidumbre estacional.

Esto es así debido a que las tres actividades están conectadas en serie, perteneciendo al mismo camino.

Por esta razón, el Índice de Criticidad no es del todo fiable a la hora de priorizar actividades y se debe utilizar conjuntamente con otros, como por ejemplo el índice de Crucialidad.

La Tabla 5-4 recoge los valores del Índice de Criticidad de las actividades del proyecto, después de haber realizado simulación de Monte Carlo, en función de la fecha de comienzo del proyecto.

Tabla 5-4
Índice de Crucialidad

	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ag	Sept	Oct	Nov	Dic
A1	0,14	0,13	0,13	0,12	0,13	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15	0,15	0,14
A2	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
A3	0,32	0,39	0,41	0,42	0,42	0,42	0,43	0,41	0,36	0,30	0,25	0,27
A4	0,25	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23	0,24	0,26	0,28	0,28	0,26
A5	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,02	0,03
A6	0,14	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18	0,16	0,13	0,11	0,11
A7	0,68	0,61	0,59	0,58	0,58	0,58	0,58	0,59	0,62	0,68	0,73	0,71
A8	0,09	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11	0,09	0,07	0,08

En la Figura 5-9 representamos el Índice de Crucialidad de cada actividad (o correlación entre la duración de la actividad y la duración total del proyecto), en función del mes de inicio del proyecto.

En el gráfico observamos que cada actividad tiene su correspondiente índice de Crucialidad, distinto de los demás.

En periodos donde únicamente tenemos en cuenta la Incertidumbre Aleatoria debida a las actividades (por ejemplo proyectos con comienzo en el mes de mayo o junio), la actividad con un Índice de Crucialidad mayor es A7. Le siguen en importancia las actividades A3 y A4.

La primera observación respecto de los resultados que obtenemos es que cada actividad tiene su propio índice de Crucialidad, sin coincidir con el de otras actividades que pudieran pertenecer al mismo camino crítico, como así sucedía en el caso anterior con el Índice de Criticidad.

Si nos centramos en la evolución de los distintos índices, a lo largo de los distintos meses de comienzo del proyecto, comprobamos que la importancia de la actividad A7 crece progresivamente, según se va ejecutando esta actividad en meses con probabilidad de impacto estacional.

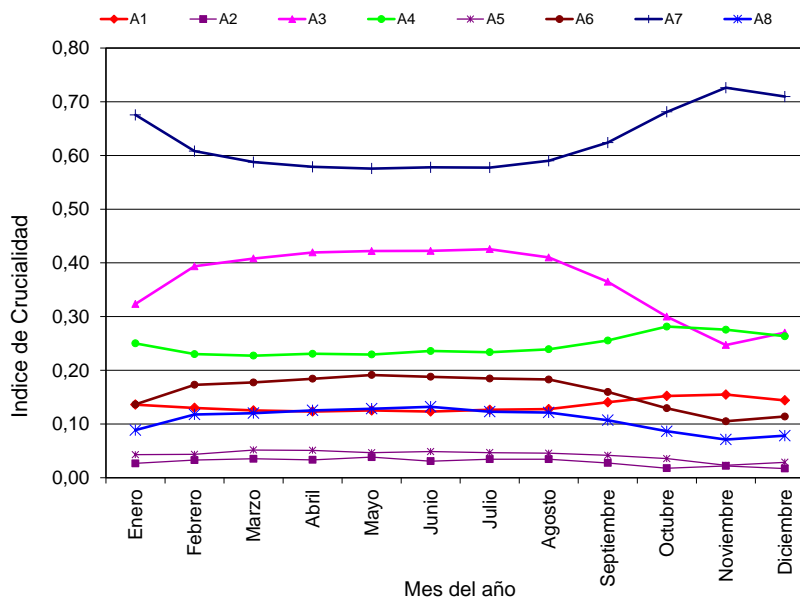


Figura 5-9 Índice de Criticidad en función de la fecha de comienzo del proyecto.

Por el contrario, la importancia de la actividad A3 decrece de forma simétrica a la actividad A7, llegando, incluso, a tener un menor índice de Crucialidad que la actividad A4 en el proyecto que comienza en noviembre.

A medida que el riesgo de impacto debido a la incertidumbre estacional (riesgo de heladas) es mayor, la actividad A7 se hace más importante, la correlación entre la duración del proyecto y la duración de esta actividad es mayor.

Por último, también vemos que hay actividades que tienen poca importancia en términos del riesgo de este proyecto (actividades A2 y A5). La importancia de estas dos actividades también se reflejó en el Índice de Criticidad.

A pesar del hecho de que, en este proyecto, el indicador de Crucialidad se comporta mejor que el indicador de Criticidad, pues ofrece un reflejo más fiel del desempeño de las actividades del proyecto, no siempre es el caso y ambos deben ser utilizados para entender adecuadamente el proyecto y las actividades que lo componen.

Es importante recordar la diferencia entre Criticidad y Crucialidad de las actividades del proyecto, pues podemos utilizar ambas como medida de la importancia de cada actividad en la duración del proyecto y queremos analizar el significado de la información que aporta cada uno de los indicadores.

Entendemos por Criticidad o Índice de Criticidad de una actividad la probabilidad de dicha actividad de pertenecer al camino crítico o a uno de los caminos críticos. Por tanto, mediremos la influencia de la duración de la actividad sobre la duración del proyecto como las veces sobre el total de las simulaciones en las que dicha actividad perteneció al camino crítico.

El Índice de Criticidad de una actividad, en el sentido anteriormente explicado, puede llevar a conclusiones erróneas. Poniendo un ejemplo como el siguiente, podemos entender la incongruencia del Índice de Criticidad. Imaginemos un proyecto formado por dos ramas en paralelo. La primera rama está formada por una serie de actividades que, analizadas de forma aislada, tendrán una duración esperada de un año y una variabilidad de más o menos dos meses. La segunda rama consta únicamente de una actividad, por ejemplo el desarrollo de una nueva tecnología que se implantará al final del proyecto, y que tiene una probabilidad del 95% de durar nueve meses, y una probabilidad del 5% de durar dos años. El Índice de Criticidad de esta actividad será del 5%, que

es la probabilidad de que esta actividad sea crítica, pero es evidente que basarse en ese índice para determinar la importancia de la actividad en el devenir del proyecto puede ser un error muy grave, pues esa actividad está generando gran parte del riesgo del proyecto.

Otra de las limitaciones del Índice de Criticidad como indicador de la importancia de cada actividad en la duración del proyecto, es la dificultad de aplicación analítica en modelos más complejos de proyectos. Algunos ejemplos de estos casos pueden ser la existencia de restricciones o incertidumbre sobre las necesidades de recursos materiales o humanos, la existencia de nodos de decisión... En estos casos, el Índice de Criticidad pierde aplicabilidad y la información que ofrece es poco relevante.

Por estas razones, es evidente que el Índice de Criticidad debe estudiarse junto a otros indicadores para determinar con más precisión la influencia de la duración de cada actividad en el proyecto completo. Una posibilidad es el llamado índice de Crucialidad.

Entendemos por Crucialidad o índice de Crucialidad de una actividad como la correlación existente entre la duración de dicha actividad y la duración del proyecto completo. Por tanto, mediremos la influencia de la duración de la actividad sobre la duración del proyecto completo como el coeficiente de correlación estadístico (coeficiente de correlación de Pearson) entre la duración de la actividad y la duración del proyecto completo, y es extraída del total de las simulaciones.

Si el proyecto es siempre largo cuando una determinada actividad es larga, y el proyecto es corto cuando esa actividad es corta, entonces podemos decir que esa actividad tiene un alto índice de Crucialidad. Para el ejemplo anteriormente explicado, apreciamos que el índice de Crucialidad de la actividad que transcurre en paralelo al grueso del proyecto será muy elevado, lo que concuerda con la importancia real de la actividad en el desarrollo del proyecto, mientras que el Índice de Criticidad era del 5%.

La forma de complementarse de ambos índices es sencilla. Consideramos el riesgo como una combinación entre probabilidad e impacto. El Índice de Criticidad se encarga de reflejar la importancia de la probabilidad de determinados riesgos, pero no tiene en cuenta la importancia de los impactos en

el proyecto. El índice de Crucialidad, en cambio, refleja mejor la combinación de probabilidad e impacto. Además, el índice de Crucialidad supera la dificultad para valorar las restricciones o la incertidumbre sobre los recursos, así como la posible existencia de nodos de decisión. No obstante, el índice de Crucialidad es significativo de la incertidumbre respecto a la duración total del proyecto que cada actividad produce, pero no siempre del impacto. El ejemplo es claro. Supongamos un proyecto con dos actividades en serie, una con una larga duración fija, y la otra con una corta duración sujeta a incertidumbre. La primera tendrá una Crucialidad del 0%, y la segunda del 100%, pero es evidente que la primera tiene bastante influencia en el conjunto del proyecto.

Por estas razones, es evidente que ambos índices ofrecen información complementaria para tomar decisiones. Actividades con alta Crucialidad deberán ser tratadas debido a la incertidumbre que crean sobre el proyecto, mientras que actividades con alta Criticidad deberán ser acortadas, pues son susceptibles de convertirse en “cuellos de botella”.

Finalmente se representa el último de los índices que hemos analizado, SSI, para cada actividad, y en función de la fecha de inicio del proyecto. Los datos recogidos tras la simulación se incluyen en la Tabla 5-5.

La Figura 5-10 muestra el valor de la Criticidad ponderado por la relación de la desviación estándar de la actividad y la desviación estándar del proyecto.

Tabla 5-5
Schedule Sensitivity Index

	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ag	Sept	Oct	Nov	Dic
A1	14,04	12,52	12,00	11,77	11,87	11,73	11,82	11,62	11,77	12,86	14,47	15,10
A2	1,81	2,24	2,33	2,38	2,40	2,39	2,44	2,25	2,02	1,58	1,36	1,63
A3	24,02	29,88	31,81	32,41	32,89	32,65	32,46	31,02	26,76	21,05	18,04	20,44
A4	27,92	23,88	22,45	22,71	22,58	22,24	22,40	21,78	22,83	24,52	27,66	28,38
A5	2,29	2,83	2,97	3,07	2,99	3,06	3,10	2,84	2,48	2,05	1,70	2,08
A6	11,16	13,90	14,85	15,00	15,29	15,20	15,07	14,48	12,39	9,82	8,40	9,56
A7	62,09	55,20	52,06	51,21	51,29	51,01	51,40	52,42	56,99	63,91	69,93	67,76
A8	7,80	9,74	10,36	10,53	10,78	10,71	10,65	10,14	8,65	6,85	5,87	6,68

En este caso, su representación es similar a la del Índice de Crucialidad, con la actividad A7 siendo más importante que las otras actividades, para todos los meses. Esta actividad aumenta su importancia en los meses en los que la probabilidad de temperaturas por debajo de 0 ° C es mayor.

En la representación de este índice, la actividad A4 se vuelve más importante que la actividad A3 (en términos relativos) en simulaciones de octubre a enero, aunque estas diferencias no son especialmente llamativas.

También se observa que la importancia de las actividades se modifica a medida que aumenta la probabilidad de ocurrencia del impacto estacional (meses desde octubre a febrero). Esto ocasiona que unas actividades que eran más importantes que otras (por ejemplo A3 frente a la actividad A4 en el mes de junio), pasen a alternar su importancia (siendo en el mes de noviembre más importante la actividad A4 que la actividad A3, conforme al Índice de Crucialidad).

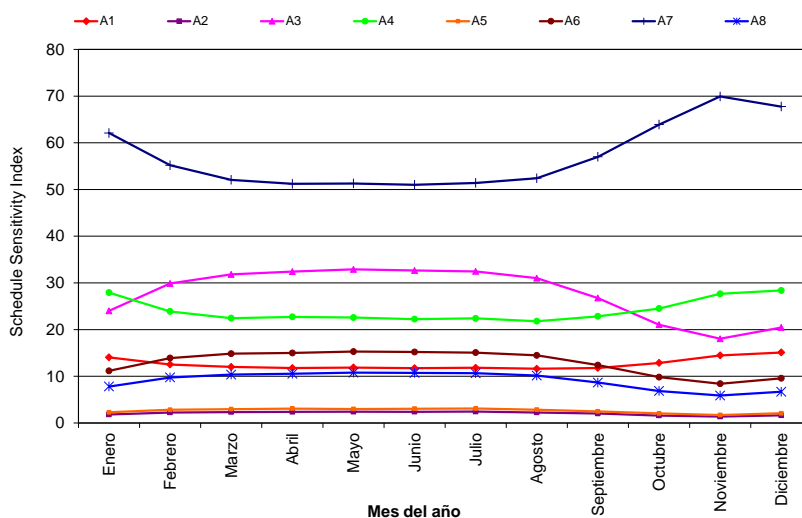


Figura 5-10 Schedule Sensitivity Index en función de la fecha de comienzo del proyecto.

Vanhoucke (2010) demuestra que el índice SSI proporciona resultados relativamente mejores que el Índice de Criticidad y muy similares a algunas versiones del índice de Crucialidad.

En esta parte del trabajo, se ha comprobado que la utilización aislada de cualquiera de los índices no aporta certeza absoluta sobre la importancia de las actividades y son indicadores que se deben utilizar conjuntamente para poder analizar la importancia en cuanto al riesgo que aportan al proyecto.

Con la representación de la evolución de los distintos indicadores modificando la fecha de comienzo del proyecto para cada actividad se comprueba que la actividad expuesta al riesgo estacional adquiere mayor importancia cuando aumenta la probabilidad de que dicha incertidumbre estacional se presente.

El resto de actividades adecuan su importancia conforme a esta circunstancia y a la propia estructura de la red de proyecto.

Resultados parciales de este capítulo han sido publicados en diferentes congresos nacionales e internacionales, exponiendo los resultados de las investigaciones según se iban produciendo y que han servido para la elaboración de este apartado ((Acebes et al., 2014b), (Acebes, Pajares, & López-Paredes, 2011a, 2011b)).

5.2 Sensibilidad de la Duración del Proyecto

En el trabajo presentado por Acebes, Pajares, Galán, & López-Paredes (2013b), continuando con el análisis de la priorización de las actividades del proyecto, se ha buscado relacionar la influencia de la duración de cada una de las actividades (tanto la duración media esperada como la variabilidad de la duración de las actividades) con la criticidad y crucialidad de todas las actividades, y a partir de ahí buscar la influencia de esas variables en la duración del proyecto completo (tanto la duración esperada como la variabilidad de la duración del proyecto), así como conocer qué actividades son las más importantes para el proyecto y qué características tienen en términos de criticidad y crucialidad.

Cuando hablamos de incertidumbre sobre la duración total del proyecto, nos referimos a la probabilidad del proyecto de terminar en una u otra fecha en función de las duraciones de las actividades que lo componen.

Mediante simulación de Monte Carlo, se pueden crear modelos de simulación de proyectos que permiten obtener como resultado una distribución de probabilidad de la duración total del proyecto a partir de las duraciones de las actividades, que han sido previamente modeladas mediante una distribución de probabilidad. A partir de la distribución de probabilidad resultado, podemos

hacer predicciones con un soporte probabilístico sobre lo que ocurrirá en la realidad.

Queremos ir un paso más allá y saber qué actividades son las que más influyen tanto en la duración esperada del proyecto completo como en la variabilidad de esa duración. Saber si es posible que, acortando o alargando determinadas actividades, se produzcan reducciones significativas en la duración esperada del proyecto completo, o si se pueden producir reducciones significativas en la variabilidad de esa duración. Además de saber qué características tienen esas actividades.

Es posible que, centrando los esfuerzos en determinadas actividades para reducir la variabilidad de su duración, se puedan producir reducciones significativas en la duración esperada del proyecto completo, o incluso, que se puedan producir reducciones significativas en la variabilidad de esa duración.

Cho & Yum (1997) proponen una medida de la importancia de la incertidumbre para medir el efecto de la variabilidad en la duración de la actividad sobre la variabilidad de la duración global del proyecto. Elmaghraby, Fathi, & Taner (1999) investigan el impacto del cambio en la duración media de una actividad en la variabilidad de la duración del proyecto.

Elmaghraby (2000) analiza la incertidumbre del proyecto completo, medida como la variabilidad en la duración del proyecto (varianza de la duración), en función de la duración esperada de las actividades (media de la duración).

Gutierrez & Paul (2000) presentan un tratamiento analítico del efecto de la varianza de la actividad sobre la duración esperada del proyecto.

Podemos adelantar que buscaremos relacionar la influencia de la duración (tanto la duración esperada como la variabilidad de la duración) de cada una de las actividades con la criticidad y crucialidad de todas las actividades, y a partir de ahí buscar la influencia de esas variables en la duración del proyecto completo (tanto la duración esperada como la variabilidad de la duración).

El objetivo último de estos estudios es proporcionar a los Directores de Proyectos una información valiosa que permita determinar con mayor exactitud la duración total de los proyectos con una variabilidad más acotada, es decir, con menor incertidumbre; así como conocer qué actividades son más influyentes

y determinantes en el desarrollo del proyecto en cada caso, para poder así tomar las medidas preventivas oportunas.

La información que se puede extraer del estudio puede ayudar a los Directores de Proyectos, ya que:

- Podrán ofrecer a los gerentes de las empresas o a los clientes una fecha de finalización del proyecto lo menos incierta posible, con probabilidades respaldadas por datos estadísticos.
- Podrán determinar la fecha de finalización del proyecto más favorable, alcanzando un compromiso entre esa fecha y los costes previstos para el proyecto, que están directamente relacionados con la duración del proyecto y con las actividades que lo componen. Cualquier empresa buscará reducir al máximo posible los costes de su proyecto, pues éstos repercuten directamente de forma negativa en su beneficio económico, que es el objetivo último de cualquier organización empresarial.
- Podrán determinar la fecha de finalización más favorable, consiguiendo un equilibrio entre esa fecha y los requisitos de financiación para los costes previstos a lo largo del proyecto.
- Podrán determinar la fecha de finalización más favorable, consiguiendo un compromiso entre esa fecha y la calidad del resultado. En general, podemos asumir que la calidad del producto o servicio que se obtiene como resultado de un proyecto depende directamente del tiempo y los costes que al mismo se dediquen.
- Podrán determinar la fecha de finalización más favorable que permita realizar una gestión adecuada de los recursos humanos y materiales.

Las necesidades de recursos humanos y materiales para completar el proyecto suelen variar a lo largo de sus etapas. Por ello, conocer con mayor exactitud los plazos de ejecución ayudará a los Directores de Proyectos en este aspecto. De forma análoga podemos razonar con respecto a los costes, tanto en el caso de recursos humanos como en el caso de recursos materiales, más aún en este último caso, pues está directamente implicada la relación con los proveedores.

Si bien es más que probable que no se encuentre la solución óptima que aúne todas las premisas anteriores, la función del director del proyecto en este caso deberá ser encontrar una solución que satisfaga todas o la mayoría de ellas,

valorando cuáles son las más importantes en cada proyecto en particular e intentando acercarse lo máximo posible a esa solución óptima.

Para valorar las diversas posibilidades, se ha utilizado simulación de Monte Carlo.

En concreto, nosotros hacemos un análisis para la red propuesta por Elmaghraby et al. (1999).

La duración de las actividades se modela mediante distribuciones de probabilidad normal, y sus parámetros se muestran en la Tabla 5-6.

Tabla 5-6
Descripción de actividades

Actividad precedente	Actividad	μ	σ
//	Ai	0	0
Ai	A1	5,5	1,18
Ai	A2	13	3
A1	A3	7	1
A1	A4	16,5	2,5
A2,A3	A5	10	1,34
A4, A5	Af	0	0

La red que vamos a estudiar, representada en la Figura 5-11, presenta la ventaja de combinar caminos en serie y en paralelo a través de la actividad 3. Las actividades inicial (Ai) y final (Af) son actividades ficticias que no tienen duración, y que representan el inicio y el final del proyecto.

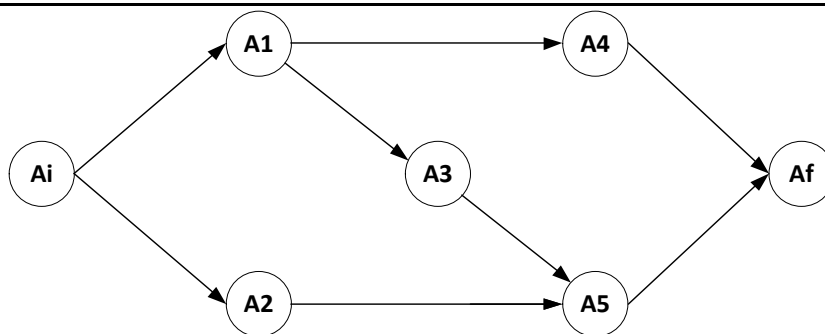


Figura 5-11 Diagrama AON. Fuente (Elmaghraby et al., 1999).

Los análisis realizados mediante simulación de Monte Carlo, se agrupan en cuatro apartados:

- A. Duración esperada del proyecto en función de la duración esperada de las actividades.
- B. Variabilidad de la duración del proyecto en función de la duración esperada de las actividades.
- C. Duración esperada del proyecto en función de la variabilidad de la duración de las actividades.
- D. Variabilidad de la duración del proyecto en función de la variabilidad de la duración de las actividades.

Realizaremos simulaciones para cada actividad, variando tanto la media (duración esperada, medida de centralización) como la varianza (variabilidad de la duración, medida de dispersión), y obtendremos una serie de datos como resultado que permitirán estudiar los casos A, B, C y D; así como unos análisis de crucialidad y criticidad para cada caso.

5.2.1 Duración esperada del proyecto en función de la duración esperada de las actividades

En el caso A, duración esperada del proyecto en función de la duración esperada de las actividades, cualquier incremento en la duración de una actividad conducirá a un incremento de la duración del proyecto, o, al menos, la duración del proyecto permanecerá constante. En el caso contrario, cualquier decremento en la duración de la actividad conducirá a un decremento de la duración del proyecto, o, al menos, la duración del proyecto permanecerá constante. De la misma manera, la crucialidad de las actividades aumenta al aumentar la duración de cada una de ellas.

Hemos representado en las Figuras 5-12 a la Figura 5-16 la evolución de la duración esperada del proyecto, Índice de Criticidad, Índice de Crucialidad y SSI al variar la duración esperada de cada una de las actividades del proyecto, desde su valor planificado, aumentándolo progresivamente y disminuyéndolo para comprobar la evolución de dichos valores.

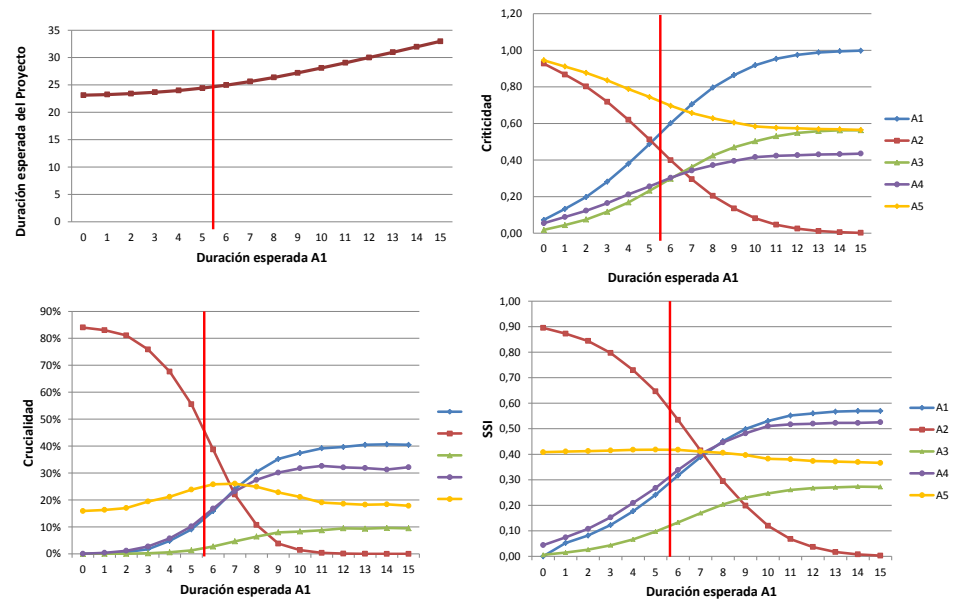


Figura 5-12 Duración esperada del proyecto, Críticidad, Crucialidad y SSI en función de la duración esperada de la actividad A1

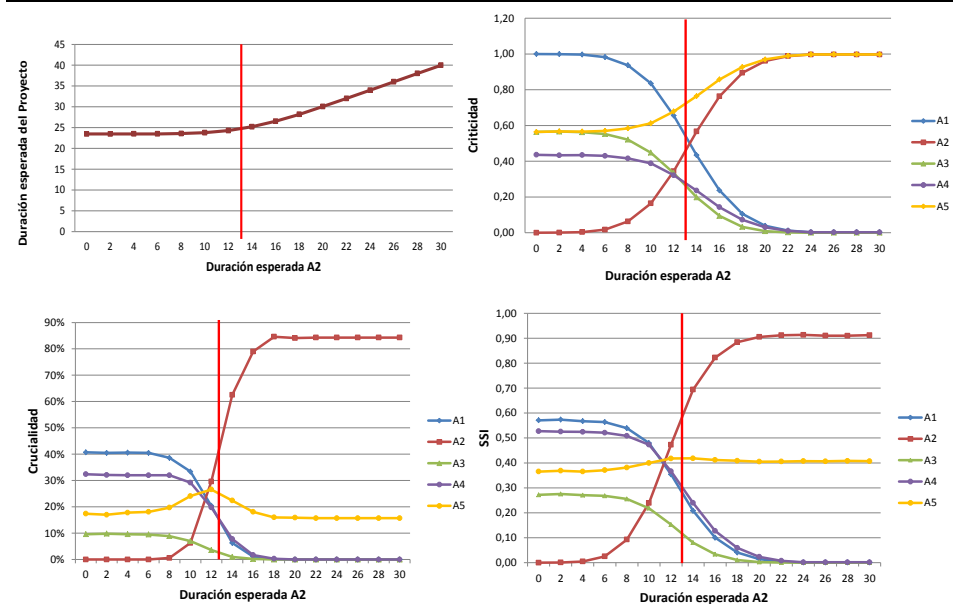


Figura 5-13 Duración esperada del proyecto, Críticidad, Crucialidad y SSI en función de la duración esperada de la actividad A2

Como era previsible, en todos los casos apreciamos que al aumentar la duración de la actividad correspondiente, esa actividad y aquellas actividades que pertenecen a su camino van aumentando su criticidad.

Podemos fijarnos en que cuando las actividades superan el 95% de criticidad, la duración esperada del proyecto aumenta exactamente la cantidad aumentada en cada una de las actividades, es decir, la actividad en cuestión se convierte prácticamente en la única que influye en la duración esperada del proyecto. Son reseñables el caso de la actividad 1 y la actividad 5, que cuando se ven aumentadas se convierten, en solitario, en las más críticas (alcanzan el valor 1). Esto se debe a la morfología de la red, puesto que de la actividad 1 parten dos caminos, y a la actividad 5 llegan dos caminos, pues ambas están unidas por la actividad 3, y por eso la criticidad de las actividades sucesoras y precedentes respectivamente, se ve dividida y no aumenta tanto como en el resto de casos.

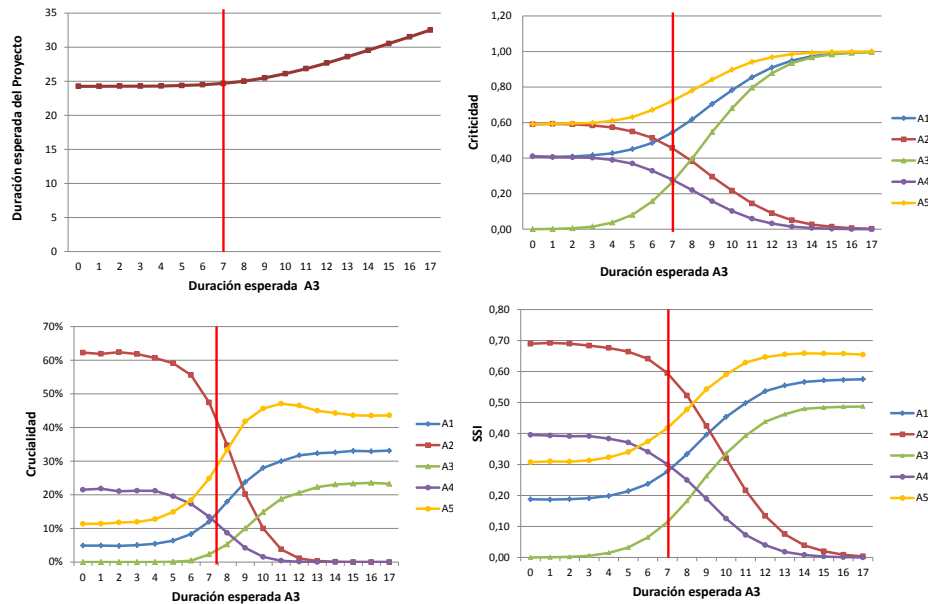


Figura 5-14 Duración esperada del proyecto, Criticidad, Crucialidad y SSI en función de la duración esperada de la actividad A3

De la misma manera, la crucialidad de las actividades aumenta al aumentar la duración de cada una de ellas. En este caso, es reseñable el comportamiento de las actividades 1 y 4. Al aumentar la duración de la actividad 1, aumenta su

crucialidad; no obstante, debido a la larga duración de la actividad 4, que pertenece al mismo camino que la uno, la crucialidad de ambas en este caso acaba siendo similar. En cambio, al aumentar la duración de la actividad 4, ésta se convierte holgadamente, debido a su larga duración, en la actividad con la mayor crucialidad.

En el caso de la actividad 3, que une dos caminos paralelos, al aumentar su duración aumenta la crucialidad de las actividades unidas con la actividad 3, que son las actividades 1 y 5.

También hemos representado para cada actividad el parámetro SSI, que combina las desviaciones estándar de la duración de la actividad y la duración total del proyecto con el Índice de Crucialidad.

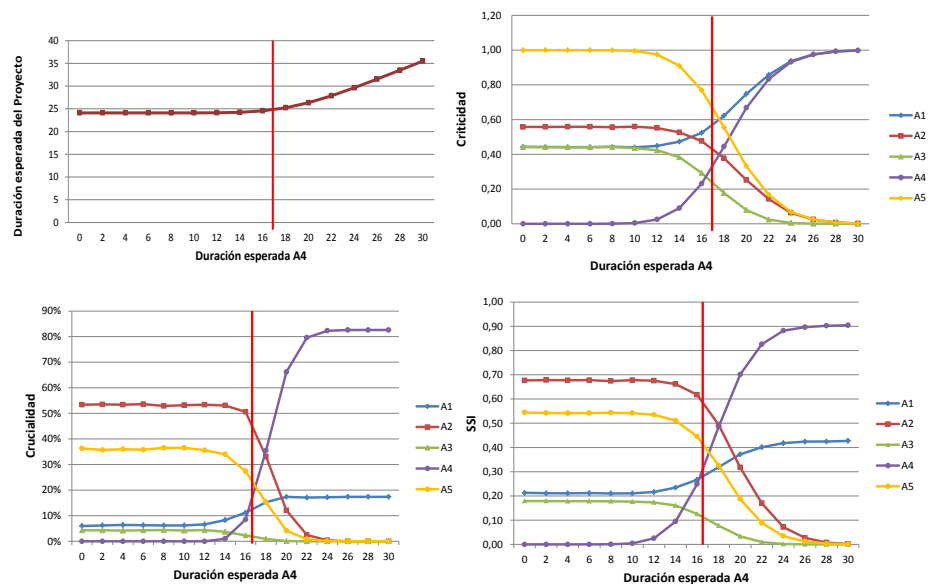


Figura 5-15 Duración esperada del proyecto, Crucialidad, Crucialidad y SSI en función de la duración esperada de la actividad A4

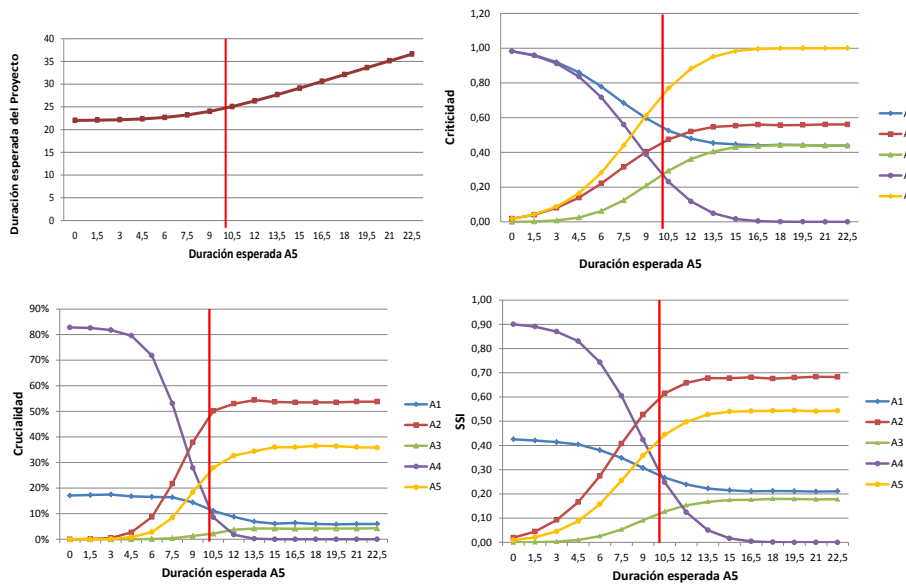


Figura 5-16 Duración esperada del proyecto, Críticidad, Crucialidad y SSI en función de la duración esperada de la actividad A5

5.2.2 Variabilidad de la duración del proyecto en función de la duración esperada de las actividades

Representamos en la Figura 5-17 el caso B, variabilidad de la duración del proyecto en función de la duración esperada de cada una de las actividades.

La variabilidad de la duración del proyecto se estabiliza para permanecer constante a partir de un determinado límite. En este caso nos encontramos tres tipos de actividades al aumentar la duración esperada de las mismas: unas que disminuyen la variabilidad de la duración del proyecto, otras que aumentan la variabilidad de la duración del proyecto y un último grupo que hacen que esa variabilidad oscile antes de estabilizarse.

Estos resultados ya suponen de por sí una importante aportación, pues ahora sabemos que alargar determinadas actividades puede contribuir a reducir la incertidumbre sobre la fecha de finalización del proyecto sin retrasarlo demasiado. Por ejemplo, podemos observarlo con la actividad 3 que permite reducir la incertidumbre aumentando la duración. De forma similar ocurre con la actividad 1.

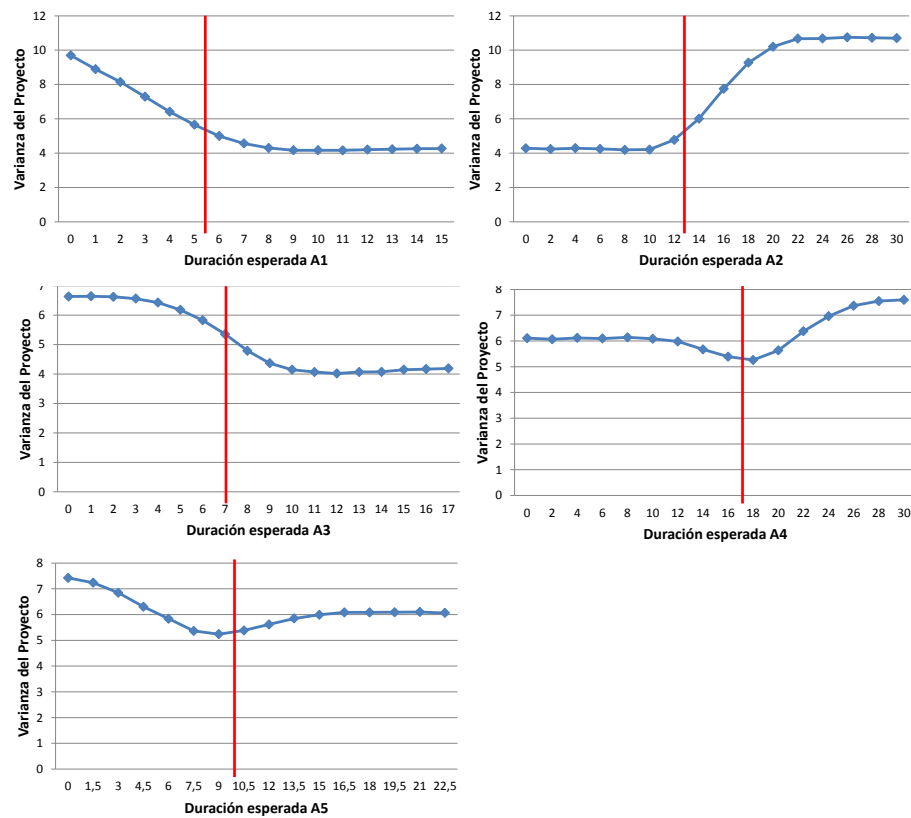


Figura 5-17 Varianza del proyecto en función de la duración esperada de las actividades

¿Cómo puede aprovecharse este hecho? Supongamos que el director de un proyecto necesita que su proyecto termine a tiempo, sin importar si la duración es algo mayor. Conociendo estos resultados, podría hacer un estudio de su proyecto y determinar la fecha en la que existe menos incertidumbre sobre la finalización, siempre que las ampliaciones en el tiempo no sean excesivas. También podría centrar sus esfuerzos en reducir la duración de actividades como la 2, consiguiendo así un efecto similar en la incertidumbre del proyecto; pero, en general alargar deliberadamente una actividad será mucho más sencillo y barato que intentar reducir la incertidumbre sobre la duración de otra.

Una de las razones que justifican este comportamiento que a priori puede parecer anómalo, y que supone la reducción de la incertidumbre del proyecto a

medida que alargamos determinadas actividades, radica en la criticidad de las actividades.

Obviando la actividad 5, que, por la morfología de la red y las duraciones estimadas de las actividades, es con diferencia la más crítica de todas, la actividad 1 es aquella que, en las condiciones de partida, es la más crítica de las restantes. Por lo tanto, aumentar la duración de esta actividad contribuirá decisivamente a que el proyecto se retrase por esta causa, y, por lo tanto, al retrasarse debido a esta actividad, gran parte de la variabilidad del proyecto desaparece (la variabilidad del resto de actividades no influirá decisivamente) y la variabilidad remanente pasa a ser causada mayoritariamente por la actividad 1, como así lo demuestra también el análisis de crucialidad.

En cambio, aumentar la duración de la actividad 2 contribuye a crear mayor incertidumbre sobre la fecha de finalización del proyecto. Esto ocurre así porque al alargar esta actividad, su criticidad va aumentando progresivamente hasta llegar a igualarse a la criticidad de la actividad 1, y esto se traduce en un aumento de la variabilidad de la fecha de finalización del proyecto completo que se refleja claramente en el gran incremento de crucialidad que, con el aumento de su duración, sufre la actividad 2. Por ello, es evidente que para redes con caminos con criticidades más dispares, la reducción de la incertidumbre sobre la duración del proyecto al aumentar las actividades más críticas será mucho mayor; mientras que alargar las actividades menos críticas contribuirá, a medida que las criticidades entre caminos se van igualando, a incrementar considerablemente la incertidumbre sobre la duración del proyecto.

El caso de la actividad 3 puede ser algo engañoso. Si bien es evidente que aumentar su duración contribuye a reducir la variabilidad del proyecto, es evidente que su criticidad no es alta. ¿Por qué se reduce entonces la variabilidad de la duración del proyecto?

Existe una actividad final claramente crítica, la actividad 5. Aumentar la duración de la actividad 3, contribuye a aumentar la criticidad del camino A1-A3-A5, iniciado por la actividad 1, en detrimento de la criticidad del camino A2-A5, iniciado por la actividad 2. Por ello, es bastante probable que la reducción de incertidumbre asociada al aumento de la duración de la actividad 3

sea impulsado por el aumento de la criticidad del camino A1-A3-A5, es decir, por el aumento de criticidad de la actividad 1.

Respecto a las actividades que provocan oscilaciones en la variabilidad de la duración del proyecto, nos damos cuenta de que son las actividades finales. El razonamiento que podemos plantear es sencillo. Las actividades iniciales del proyecto, como es lógico, son las que mayor incertidumbre arrojan sobre el desarrollo del mismo, pues se ejecutan en los periodos con menor información. En cambio, al acercarse el final, la información de la que se dispone es mucho mayor y la incertidumbre sobre la fecha de finalización es menor, es decir, las actividades finales generan menor incertidumbre sobre el proyecto al depender más del desarrollo de las actividades que las preceden. De hecho, podemos ver que, para las actividades 4 y 5, la varianza del proyecto oscila en un intervalo pequeño alrededor de la varianza prevista inicialmente, mientras que para las actividades 1 y 2, el aumento y la disminución que se producen abarcan un rango muchísimo mayor.

Hemos comprobado que si el objetivo es reducir la variabilidad en la duración del proyecto, se pueden tomar dos decisiones. Aumentar la criticidad del camino más crítico contribuirá a reducir notablemente la variabilidad total; es decir, alargar un poco las actividades iniciales más críticas o acortar las menos críticas, reducirá la incertidumbre sobre el proyecto. Una segunda opción es tratar de reducir la incertidumbre generada por las actividades más cruciales, en especial las iniciales.

La diferencia entre ambas estrategias es evidente, pues la primera es mucho más fácil de aplicar, y puede incluso no suponer coste alguno; mientras que la segunda será más complicada de aplicar y puede ser costosa. Aplicar una u otra dependerá, en general, del tipo de proyecto del que estemos hablando, es decir, de si se necesita acabar lo antes posible o se necesita acabarlo a tiempo y de los recursos económicos de que se disponga.

5.2.3 Duración esperada del proyecto en función de la variabilidad de la duración de las actividades

En el caso C, duración esperada del proyecto en función de la variabilidad de la duración de las actividades, para proyectos que incluyen ramas en paralelo,

que podemos suponer que serán la mayoría, aumentar la variabilidad en la duración de una actividad siempre conducirá a aumentar la duración esperada del proyecto completo.

Poniéndonos en el caso más atípico, supongamos que nos encontramos ante un proyecto formado por un conjunto de actividades en serie. En ese caso, un aumento en la variabilidad en la duración de las actividades no tendrá ningún efecto relevante sobre la duración esperada del proyecto, puesto que las duraciones esperadas de las actividades seguirán siendo las mismas.

En cambio, para proyectos que incluyen ramas en paralelo, que podemos suponer que será la mayoría, aumentar la variabilidad en la duración de una actividad siempre conducirá a aumentar la duración esperada del proyecto completo.

No obstante, nos encontramos ante el fenómeno que nos muestra que la criticidad es un indicador que no ofrece una información completa sobre la duración esperada del proyecto. Cuanto más aumenta la variabilidad de la duración de las actividades, más subestima la longitud del camino crítico la duración esperada del proyecto; es decir, a mayor variabilidad por actividad, peor comportamiento predictivo del Índice de Criticidad. Como ya habíamos comentado, el índice de crucialidad mide mejor la influencia de la incertidumbre.

Representamos en la Figura 5-18 la variación de la duración total del proyecto y de la duración del camino crítico al modificar la varianza de cada una de las actividades del proyecto.

La principal conclusión que podemos obtener en este caso es que, en general, si los Directores de Proyectos dedican recursos a reducir la incertidumbre de las actividades, podrán acortar el proyecto. En cuanto a qué actividades contribuirán más a este efecto, como se desprende del análisis de crucialidad, serán aquellas que tengan mayor crucialidad. Este hecho era previsible, pues la crucialidad mide mejor la incertidumbre generada por las actividades que la criticidad. De hecho, observamos que la criticidad apenas se ve modificada con el incremento de la variabilidad de la duración de las actividades.

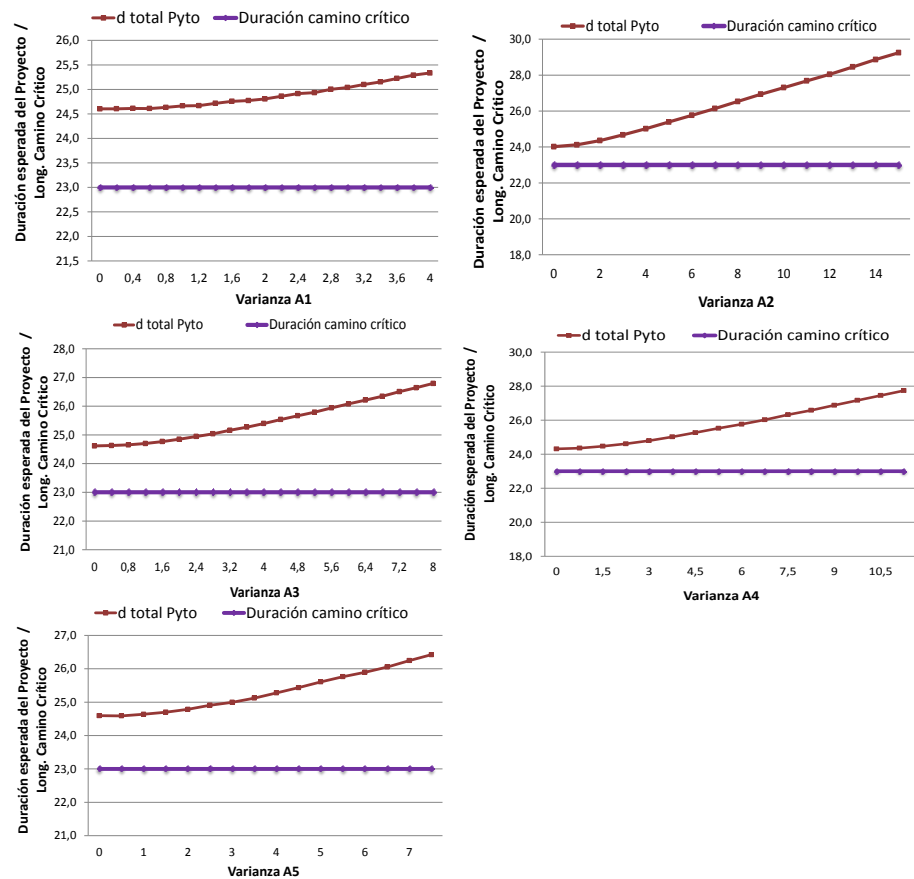


Figura 5-18 Duración esperada del Proyecto y longitud del camino crítico en función de la varianza de las actividades

5.2.4 Variabilidad de la duración del proyecto en función de la variabilidad de la duración de las actividades

Representamos en Figura 5-19 el caso D, variabilidad de la duración del proyecto en función de la variabilidad de la duración de las actividades. Los resultados nos indican que todas las variables son significativas, no obstante, es evidente que hay grandes diferencias entre actividades.

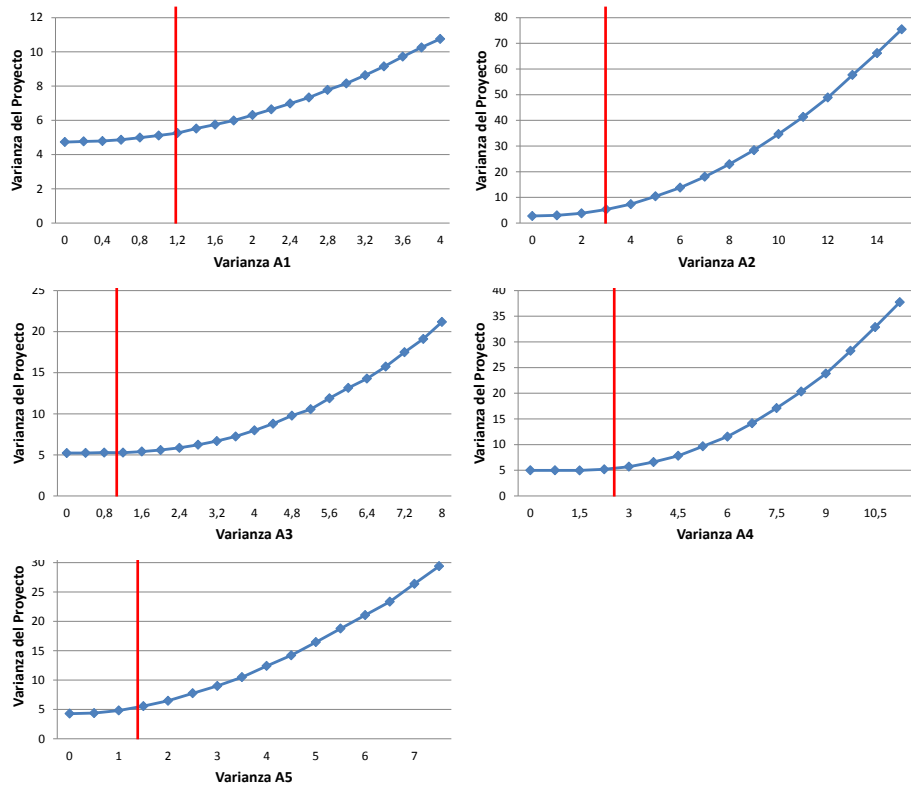


Figura 5-19 Varianza del Proyecto en función de la varianza de las actividades

Los resultados nos indican que las variabilidades en la duración de las actividades 2 y 5 son, con diferencia, las más influyentes en este aspecto. Por lo tanto, serán estas actividades las que los directores de proyecto deberán tratar de tener más en cuenta para reducir la incertidumbre del proyecto.

El estudio realizado nos permite conocer qué actividades son clave en el desarrollo del proyecto y por tanto deben recibir una atención especial. Determinadas actividades con unas características concretas en lo que a crucialidad y criticidad se refiere, son decisivas para el desarrollo del proyecto.

Así, actuar sobre estas actividades, tanto variando su duración esperada como centrando los esfuerzos en reducir la variabilidad de esa duración, permite reducir la incertidumbre sobre la duración del proyecto. Además, hemos comprobado que la criticidad no es un indicador completamente significativo de la importancia de duración de las actividades en la duración del proyecto, y que la crucialidad aporta una información complementaria para los análisis.

Resultados parciales de este capítulo han sido publicados en diferentes congresos nacionales e internacionales, exponiendo los resultados de las investigaciones según se iban produciendo y que han servido para la elaboración de este apartado ((Acebes et al., 2013b), (Acebes, Paz, Pajares, & López-Paredes, 2012a, 2012b)).

5.3 Sensibilidad del Coste del Proyecto

Todo el mundo está de acuerdo en que los proyectos tienen riesgos, por lo que la gestión del riesgo se ha convertido en una parte integral de la Gestión de Proyectos. Sin embargo, los proyectos no son todos iguales de arriesgados, y no todos los riesgos merecen la misma atención. Los gerentes de todos los niveles deben centrar sus esfuerzos en la gestión de los riesgos más importantes y en los proyectos más arriesgados.

Un proceso de gestión de riesgos efectivo debe incluir un enfoque sólido para la priorización de los riesgos que reconozca los desafíos de tratar con la incertidumbre asociada a todos los riesgos. En algunas organizaciones la gestión de riesgos es simplista, usando técnicas que no proporcionan suficiente entendimiento de la exposición al riesgo.

En el capítulo anterior hemos realizado un análisis de sensibilidad modificando los parámetros de las actividades para comprobar como afectaban estos cambios a los parámetros del proyecto. A la vez hemos observado la evolución de algunos indicadores de programación con los que priorizamos las actividades (Críticidad, Crucialidad, SSI).

Todos estos indicadores priorizan las actividades del proyecto en función de la duración de las actividades, pero no tienen en cuenta los costes de las actividades.

En el estudio del análisis de sensibilidad, modificamos los parámetros de cada actividad (duración media estimada, varianza) y recogemos los datos resultantes. En el capítulo anterior, los datos de salida analizados fueron: duración estimada del proyecto, varianza del proyecto, criticidad, crucialidad, SSI.

Además, hemos recogido datos relativos a costes de las actividades y del proyecto, que nos servirán para definir unos nuevos indicadores de priorización de actividades en función del coste.

Los indicadores que vamos a definir son:

- **Coste Relativo de la actividad:**

CR= Coste actividad / Coste total del Proyecto.

- **Índice de crucialidad de Coste:**

CCI=correlación entre coste de la actividad y coste total del proyecto.

- **Cost Sensitivity Index:**

CSI = (Desviación estándar actividad / Desviación estándar del proyecto)xCoste Relativo de la actividad.

Los nuevos indicadores relativos a los costes son análogos a los tradicionales indicadores de programación (Criticidad, Crucialidad, SSI). No obstante, existen diferencias ya que, por definición, el coste total del proyecto es la suma de los costes de todas las actividades, dejando de existir el concepto de camino crítico relativo a costes.

Si pretendemos priorizar las actividades de un proyecto en función de los costes de las actividades, la primera opción que se nos presenta es utilizar el indicador Coste Relativo. Este indicador nos muestra la importancia de cada una de las actividades en cuanto a su contribución en coste de cada una de ellas al proyecto.

Una actividad con alto coste relativo significa que supone una gran inversión en esta actividad dentro del proyecto y, por consiguiente, habrá que tenerla muy en cuenta en cuanto a su elevado coste respecto de las otras actividades.

Pero puede ocurrir que dentro del proyecto encontremos actividades que tienen un menor valor esperado medio de coste de la actividad y presentan a la vez una alta varianza, es decir, una gran variabilidad de coste final de dicha actividad.

Esta actividad presentará, por tanto, un alto índice de crucialidad de coste, frente a la anterior actividad que presentaba un elevado coste relativo, con un nivel bajo de incertidumbre.

Es por esto que, en determinadas situaciones, puede ser interesante tener en cuenta otro tipo de actividades que pueden hacer que el coste total del proyecto

se aleje del coste presupuestado debido a su variabilidad. Este tipo de actividades no las hubiéramos tenido en cuenta si sólo nos centramos en el indicador Coste Relativo e ignoramos el nuevo indicador propuesto Índice de Crucialidad de coste.

De forma análoga a los indicadores de programación, podemos definir el indicador *Cost Sensitivity Index*, donde se integra tanto el coste relativo de la actividad como la variabilidad de dicha actividad, ya que se pondera el coste relativo con la razón entre las desviaciones típicas del coste de la actividad y del coste total del proyecto.

La duración de las actividades se modela mediante distribuciones de probabilidad normal, y sus parámetros se muestran en la Tabla 5-7.

Tabla 5-7
Descripción de actividades

Actividad precedente	Actividad	μ	σ
//	Ai	0	0
Ai	A1	5,5	1,18
Ai	A2	13	3
A1	A3	7	1
A1	A4	16,5	2,5
A2,A3	A5	10	1,34
A4, A5	Af	0	0

El diagrama de red del proyecto utilizado para la simulación se representa en la Figura 5-20.

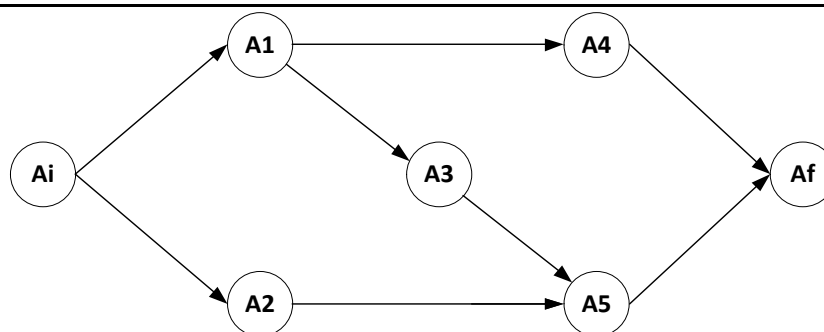


Figura 5-20 Diagrama AON. Fuente (Elmaghraby et al., 1999).

5.3.1 Sensibilidad de los parámetros de coste del proyecto en función de la duración esperada de las actividades

Representamos en la Figura 5-21 la variación del valor esperado del coste total del proyecto, el coste medio de cada actividad, el coste relativo de cada actividad, el índice de sensibilidad de costes y el *Cost Sensitivity Index* de las actividades del proyecto al modificar la duración esperada de la actividad A2.

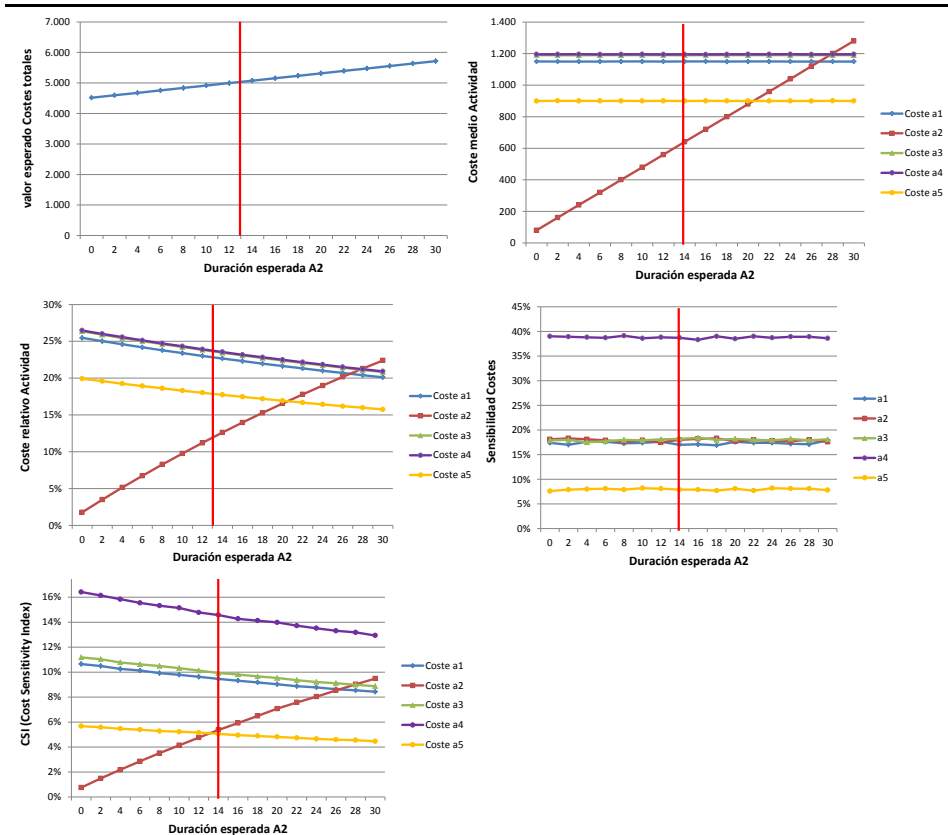


Figura 5-21 Parámetros del coste del proyecto en función de la duración esperada de la actividad A2

Para cualquier actividad del proyecto, al aumentar la duración esperada de la actividad “j”:

- aumenta el coste total del proyecto.
- Aumenta el coste medio de la actividad “j” y se mantienen constantes los costes medios del resto de actividades.

- Aumenta el coste relativo de la actividad “j” y disminuye el coste relativo del resto de actividades.
- Se mantiene constante la Crucialidad de coste de todas las actividades.

5.3.2 Sensibilidad de los parámetros de coste del proyecto en función de la variabilidad de las actividades

Representamos en la Figura 5-22 la variación del valor esperado del coste total del proyecto, el coste medio de cada actividad, el coste relativo de cada actividad, el índice de sensibilidad de costes y el *Cost Sensitivity Index* de las actividades del proyecto al modificar la varianza de la actividad A2.

Para cualquier actividad del proyecto, al aumentar la varianza de la actividad “j”:

- el coste total del proyecto permanece constante.
- Aumenta la varianza de los costes totales del proyecto.
- Se mantienen constantes los costes relativos de las actividades.
- Aumenta el Índice de Crucialidad de coste de la actividad “j” y disminuye el Índice de Crucialidad de coste del resto de actividades.
- Aumenta el Índice CSI de la actividad “j” y disminuye el Índice CSI del resto de actividades.

En el ejemplo mostrado podemos observar como la actividad A2 es la actividad menos prioritaria si consideramos el Índice Coste relativo de la actividad, ya que su coste, respecto del coste total del proyecto, es el menor del total de las actividades.

También observamos que tiene un valor medio de Índice de crucialidad de coste, inferior a la actividad A4. No obstante, si aumenta la varianza de la actividad A2, llega a obtener el mayor índice de crucialidad, siendo la más prioritaria si considerásemos este indicador. En este supuesto caso, habría que prestar especial atención a esta actividad, a pesar de no tener un elevado coste relativo, ya que esta actividad A2 tiene mucha influencia en la variabilidad total de los costes del proyecto.

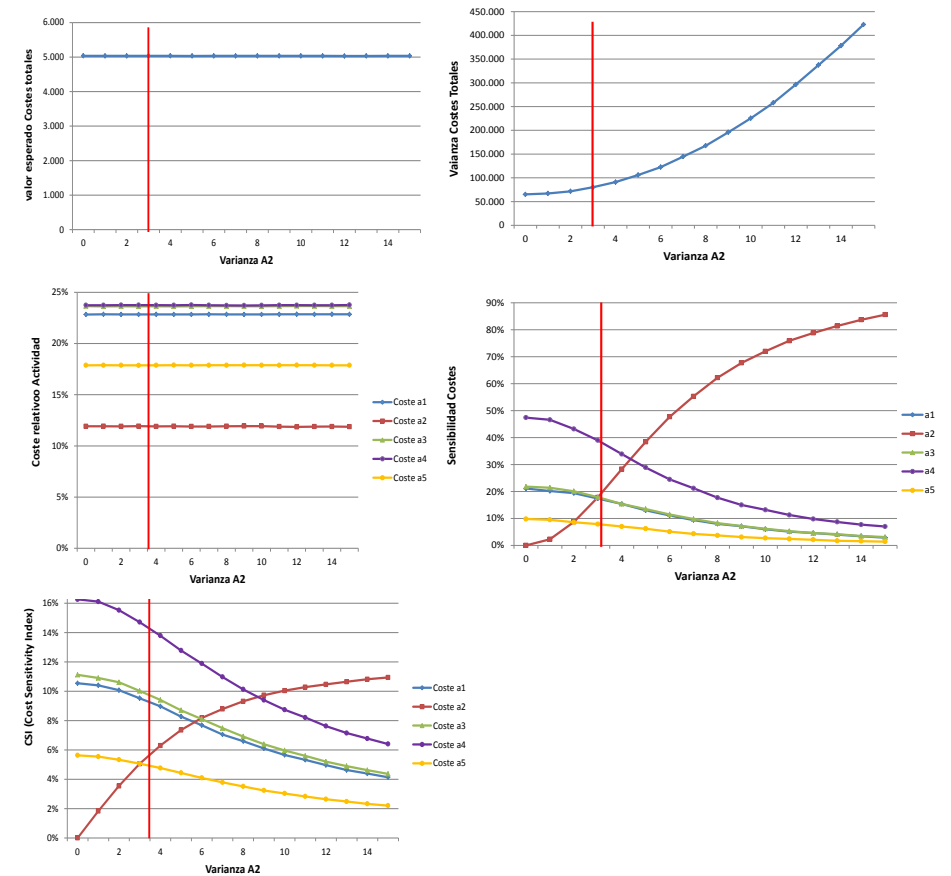


Figura 5-22 Parámetros del coste del proyecto en función de la variabilidad de la actividad A2

Si el director del proyecto quiere tener controlados los costes del proyecto, evitando que puedan desviarse de su objetivo, tendrá que tener en cuenta las actividades más cruciales en costes ya que son las que más variabilidad aportan a los costes totales del proyecto.

En Figura 5-23 se representa la variación del índice *Cost Sensitivity Index* (CSI) de cada actividad del proyecto al modificar la varianza de cada una de sus actividades. La variación que se lleva a cabo en cada actividad parte desde su posición de valor planificado y se aumenta y disminuye hasta llegar a la estabilización de las variables.

Estos nuevos índices propuestos deben cumplimentar a los tradicionales Índices utilizados para la duración de las actividades, teniendo en cuenta no sólo

la incertidumbre asociada a la duración del proyecto sino también a los costes de las actividades que lo componen.

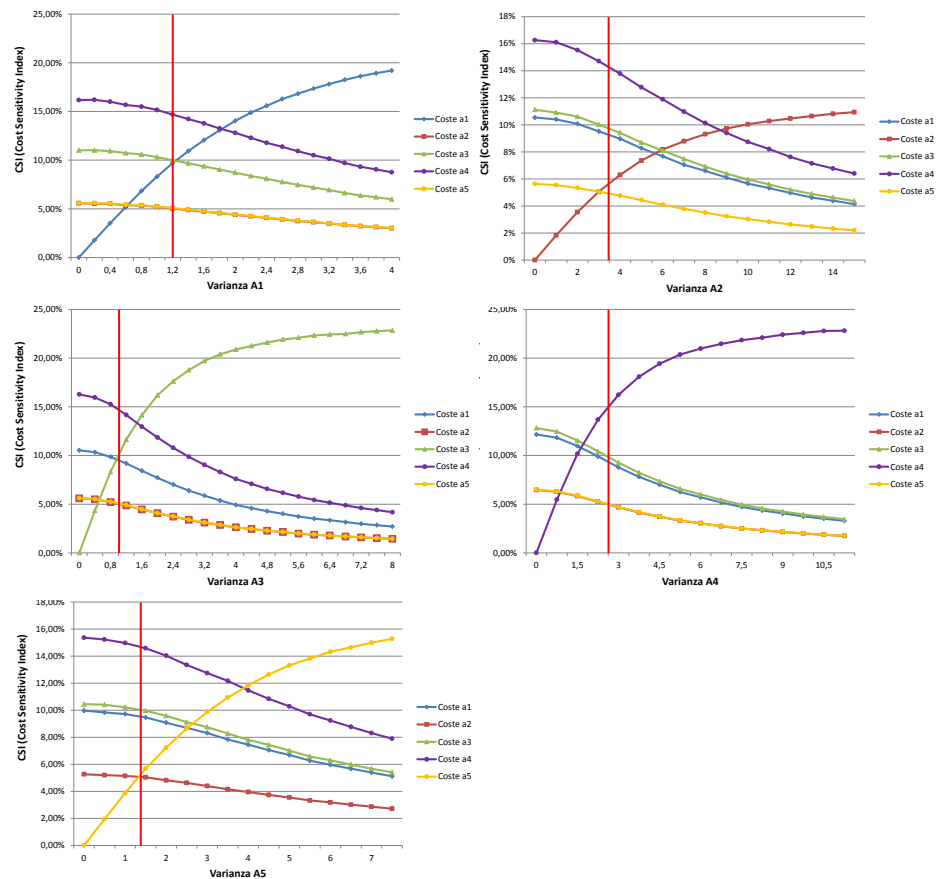


Figura 5-23 CSI frente al Aumento de la Varianza de las Actividades

La utilización de estos índices puede estar indicada para priorizar actividades o paquetes de trabajo que básicamente consistan en la aportación de un bien material, que pueda implicar un alto porcentaje del presupuesto del proyecto. O también para aquellas otras actividades cuya evolución del coste de las mismas no vaya en relación directa con su duración y dependa de otros parámetros externos al proyecto, con sus propias funciones de distribución. Utilizando los indicadores de coste, podremos priorizar y prestar la atención necesaria a cada actividad en función de sus características.



6

Control estadístico de los Proyectos



6 Control estadístico de los Proyectos

En este capítulo desarrollamos una novedosa metodología para el seguimiento y control de proyectos, integrando la incertidumbre que presentan las actividades que lo componen.

Después de los capítulos iniciales introductorios hemos dedicado un apartado a recordar la metodología del Valor Ganado.

Posteriormente hemos explicado la Metodología SCoI/CCoI que integra la incertidumbre de las actividades en el control del plazo y coste del proyecto.

En el presente capítulo desarrollamos el procedimiento para la obtención de los nuevos indicadores que nos permiten realizar el control del plazo y coste del proyecto. Aplicamos simulación de Monte Carlo para obtener un entorno gráfico de control donde se representarán los márgenes estadísticos de confianza y donde se integrará la representación del proyecto en tiempo real. Esta representación de las curvas de plazo y coste permitirá conocer el estado del proyecto (avance / retraso, infracoste / sobrecoste) y además se podrá conocer sobre qué curva de confianza se está ejecutando el proyecto, considerando la incertidumbre que presentan las actividades.

Una vez hemos desarrollado la novedosa metodología que denominamos “Triad” y hemos configurado el entorno gráfico de seguimiento y control de proyectos, contrastamos su validez realizando una simulación comparando esta metodología con la EVM y con SCoI / CCoI. Simularemos distintas situaciones posibles y obtendremos las representaciones gráficas correspondientes a cada metodología, comparando los resultados obtenidos.

6.1 Percentiles de coste del proyecto

Un sistema de seguimiento y control nos ayuda a detectar si surgen problemas durante la ejecución del proyecto, para activar acciones correctivas si fuera

necesario. La sinergia y concurrencia del análisis de los aspectos relativos al pasado, tratados con la utilización de la metodología EVM, así como un correcto análisis de riesgos que detecte los puntos débiles en la programación pendiente de ejecutar, deberían facilitar al director de proyecto la toma de decisiones en cualquier momento del proyecto.

Con la implementación de los índices de control SCoI y CCoI por parte de Pajares & López-Paredes (2011) y la incorporación posterior del gráfico de control propuesto por Acebes et al. (2013a) logramos identificar las oscilaciones del proyecto respecto de la planificación inicial y además conseguimos estimar la magnitud de dicha variación, determinando si se exceden los límites de control que fije de antemano el director de proyecto.

A pesar de la bondad de la metodología citada, Acebes et al. (2014a) proponen una nueva metodología para el seguimiento y control de proyectos en entorno con incertidumbre.

Utilizando simulación de Monte Carlo desarrollamos una metodología para el control estadístico del proyecto, representando para cada periodo de tiempo los distintos percentiles en los que puede oscilar el proyecto teniendo en cuenta la incertidumbre de las actividades que lo componen.

El control estadístico de los procesos se basa en observaciones periódicas de una medida durante la ejecución del proyecto que se representan junto con un límite superior de control y un límite inferior de control.

Colin & Vanhoucke (2014) realizan un breve repaso a la bibliografía que trata sobre el control estadístico de los proyectos, proponiendo los mismos autores un procedimiento de trabajo específico basado en esta metodología.

Nuestro objetivo es crear un entorno gráfico para realizar el control estadístico del proyecto, donde se incluyan las diferentes curvas de control y donde se representará finalmente la ejecución real del proyecto. Las curvas de control se corresponderán con los distintos percentiles de posibles ejecuciones del proyecto, que representaremos en la fase de planificación y que obtendremos gracias a la simulación de Monte Carlo.

Para el desarrollo de esta teoría, vamos a utilizar dos tipos de redes distintas, con objeto de contrastar los resultados ofrecidos por ambas redes. Para ello, la

configuración de la red será distinta, al igual que la función de distribución asignada a cada actividad.

La primera red sobre la que aplicaremos las simulaciones es la red propuesta por Lambrechts et al. (2008), representada en la Figura 6-1.

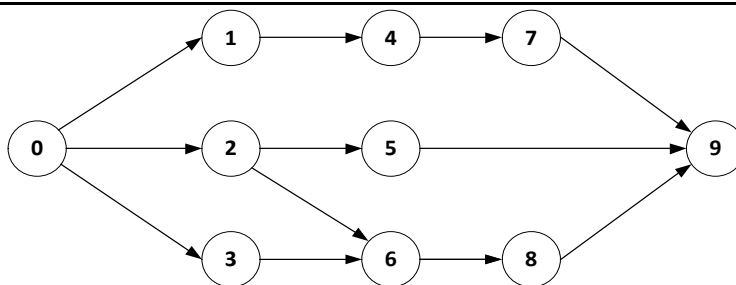


Figura 6-1 Diagrama AON. Red de proyecto utilizada. Actividades programadas con función de distribución normal

La red está formada por 9 actividades, donde la actividad 1 y 9 son las actividades inicial y final, con tres caminos paralelos y una bifurcación en la actividad 2 que conecta dos de los caminos paralelos. Las actividades se programarán según funciones de distribución normal, cuyos parámetros son la duración media y la varianza, conforme a los datos recogidos en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1

Descripción de actividades. Funciones de distribución normal

Id. Activity	Duration	Variance	Variable Cost	Fixed Cost
A1	2	0,15	555	200
A2	4	0,83	1300	450
A3	7	1,35	48	45
A4	3	0,56	880	36
A5	6	1,72	14	20
A6	4	0,28	1210	40
A7	8	2,82	725	150
A8	2	0,14	100	150

Acorde con la metodología PERT de programación de proyectos, la duración total planificada del proyecto es de 13 unidades temporales.

El coste de las actividades está dividido en un coste fijo, independiente de la duración de la actividad y de un coste variable, que dependerá de su duración. Según la misma metodología PERT, el coste total planificado del proyecto será de 24613 unidades monetarias.

La segunda red utilizada será la representada en la Figura 6-2.

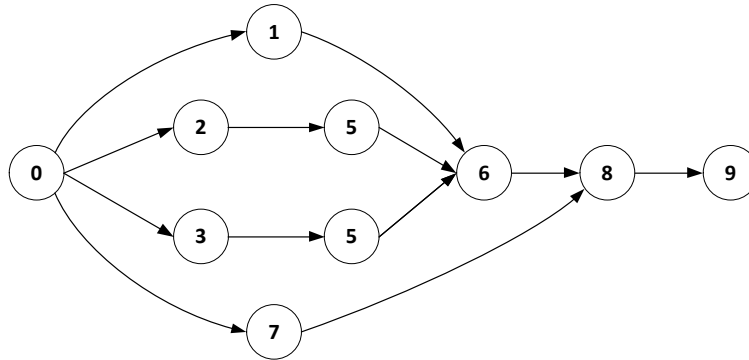


Figura 6-2 Diagrama AON. Red de proyecto utilizada. Actividades programadas con función de distribución exponencial

Esta red, compuesta por 9 actividades (incluyendo las actividades inicial y final), presenta la característica de tener una alta relación de caminos paralelos frente a caminos en serie. Las actividades están programadas utilizando los parámetros reflejados en la Tabla 6-2:

Tabla 6-2
Descripción de actividades. Funciones de distribución exponencial

Id. Activity	Duration (Mean Time) $1/\lambda_i$	Rate λ_i	Variance $(1/\lambda_i)^2$	Variable Cost	Fixed Cost
A1	5	0,20	25,00	380	50
A2	1	1,00	1,02	430	40
A3	3	0,33	9,09	370	40
A4	4	0,25	16,11	450	70
A5	2	0,50	4,03	350	50
A6	3	0,33	9,07	300	40
A7	8	0,13	64,38	280	30
A8	3	0,33	8,96	320	30

En este caso, la duración de las actividades está modelada siguiendo funciones de distribución exponencial. Al igual que las investigaciones conducidas por Mummolo (1997) y Pontrandolfo (2000), la razón que existe detrás de esta suposición se basa en el alto nivel de incertidumbre de este tipo de distribución, que pone de relieve la diferencia en el pronóstico de la duración total del proyecto existente entre el resultado obtenido tras la simulación de Monte Carlo con respecto al obtenido tras aplicar metodología PERT. Hazir & Shtub (2011) también utilizan este tipo de función de distribución para mostrar cómo afecta el formato de presentación de la información sobre el control del proyecto.

Acorde con la metodología PERT, la duración planificada de la duración total del proyecto será de 11 unidades temporales. El coste total planificado será de 8970 unidades monetarias.

Contrastar la naturaleza optimista de la metodología PERT no es el objetivo principal de este trabajo. No obstante, hemos obtenido resultados donde se ha subrayado lo que la literatura de Investigación de Operaciones y en la Gestión de Proyectos ya se había demostrado muchas veces, como por ejemplo en Klingel (1966), MacCrimmon & Ryavec (1964) y Schonberger (1981).

Para la primera red propuesta (actividades programadas con función de distribución normal), la duración planificada según metodología PERT es de 13 unidades temporales. Aplicamos simulación de Monte Carlo y obtenemos los estadísticos de la función de salida “duración total del proyecto”, tanto la representación gráfica del histograma de valores resultantes tras la simulación, así como los propios datos estadísticos de la función de distribución de salida (Figura 6-3). Analizando los datos observamos que el valor medio de la duración de las simulaciones es de 14,34 uds temporales. La probabilidad de acabar el proyecto en 13 uds de tiempo o menos es de 18,60%. La aplicación informática con la que realizamos la simulación nos permite obtener también los percentiles de dicha simulación. Dos percentiles que tomamos como referencia serán los percentiles P10 y P90, cuyos valores respectivos son 8,59 y 26,86. Esto significa que el 10% de los proyectos simulados ha concluido con una duración inferior a 8,59 uds temporales y que el 90% de los proyectos simulados ha concluido con una duración inferior a 26,86 uds temporales respectivamente.

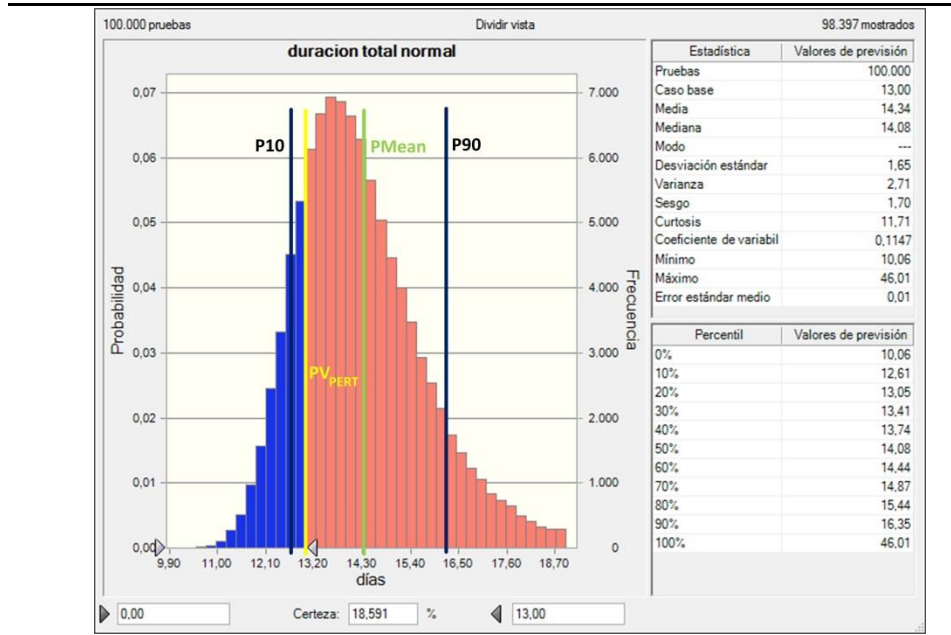


Figura 6-3 Función de distribución Duración Total del Proyecto (Distribución normal). Estadísticos.

Para la segunda red, con actividades modeladas según funciones de distribución exponencial, la duración planificada aplicando metodología PERT es de 11 uds temporales. Se representa en la Figura 6-4 la función de distribución de la duración total del proyecto, junto con los estadísticos de la simulación.

Tras aplicar simulación de Monte Carlo, la duración media de la duración total del proyecto es de 16,89 uds temporales. La probabilidad de acabar el proyecto en 11 uds de tiempo o menos, es del 22,26%.

En este caso, los valores correspondientes al P10 y P90 son 8,59 y 26,86 uds temporales, respectivamente.

Es importante darse cuenta de que nuestra contribución no es un método de programación alternativa a PERT sino una manera de incluir la incertidumbre y los procesos estocásticos en la metodología de Valor Ganado, una técnica destinada a control y vigilancia (no a programar), por lo que nuestro enfoque no es ni pesimista ni optimista.

Nuestra propuesta es general para cualquier curva de valor planificado que queremos considerar como punto de referencia en la EVM, por lo que para

ilustrar el proceso vamos a incluir varias curvas PV (PV medios obtenidos por simulación de Monte Carlo y también PV obtenido por metodología PERT) y analizaremos el resultado. El análisis subraya que PERT es optimista, pero el método puede ser utilizado para cualquier curva de PV obtenidos por algún proceso de programación.

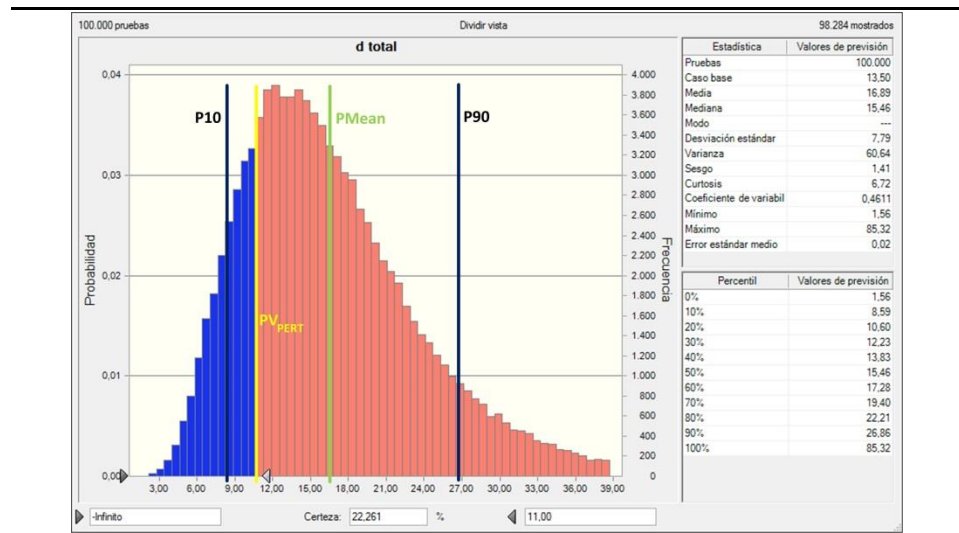


Figura 6-4 Función de distribución Duración Total del Proyecto (Distribución exponencial). Estadísticos.

El primer intento de conseguir un gráfico para poder realizar el control estadístico de los procesos con incertidumbre se basó en obtener, para cada periodo de tiempo de ejecución del proyecto, los costes resultantes en cada uno de dichos periodos de tiempo. En tabla 6-3 se muestra un ejemplo de proyecto simulado, donde se recogen los datos de los costes totales por periodo de tiempo. También se obtienen las duraciones de las actividades, coste total y duración total del proyecto.

Utilizando simulación de Monte Carlo, aplicada a la red de proyecto de estudio, se obtienen los costes que se contabilizan en cada periodo de tiempo, de cada una de las simulaciones.

En cada simulación se asigna una duración aleatoria a cada actividad. El coste de cada actividad se obtiene como suma de los costes fijos y de los costes variables, dependientes de la duración asignada a dicha actividad.

Tabla 6-3
Coste acumulado del proyecto por cada periodo de ejecución

Id. Actividad	Inicio	Duración	Fin	Mano obra	Coste fijo	Tasa	Coste	Id. Act	min	medio	max				
A1	0,00	2,98	2,98	555,00	134,15	689,15	2054,86	A1	1,16	2,07	7,48				
A2	0,00	4,06	4,06	1300,00	443,69	1743,69	7074,00	A2	2,27	4,17	22,06				
A3	0,00	6,94	6,94	48,00	45,37	93,37	648,28	A3	4,13	7,17	85,48				
A4	2,98	3,14	6,12	880,00	34,39	914,39	2871,92	A4	1,63	3,14	75,88				
A5	4,06	6,14	10,20	14,00	19,54	33,54	205,99	A5	3,32	6,23	43,45				
A6	6,94	3,77	10,71	1210,00	42,43	1252,43	4722,48	A6	2,62	4,07	8,52				
A7	6,12	10,34	16,46	725,00	116,08	841,08	8694,69	A7	4,61	8,29	33,88				
A8	10,71	2,07	12,79	100,00	144,66	244,66	507,39	A8	1,19	2,06	6,70				
Periodo	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00
Coste a1	0,00	689,15	1378,30	2054,86	2054,86	2054,86	2054,86	2054,86	2054,86	2054,86	2054,86	2054,86	2054,86	2054,86	2054,86
coste a2	0,00	1743,69	3487,37	5231,06	6974,74	7074,00	7074,00	7074,00	7074,00	7074,00	7074,00	7074,00	7074,00	7074,00	7074,00
coste a3	0,00	93,37	186,73	280,10	373,47	466,83	560,20	648,28	648,28	648,28	648,28	648,28	648,28	648,28	648,28
coste a4	0,00	0,00	0,00	16,70	931,09	1845,47	2759,86	2871,92	2871,92	2871,92	2871,92	2871,92	2871,92	2871,92	2871,92
coste a5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,63	65,16	98,70	132,24	165,77	199,31	205,99	205,99	205,99	205,99
coste a6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,86	1323,29	2575,73	3828,16	4722,48	4722,48	4722,48	4722,48
coste a7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	738,00	1579,08	2420,17	3261,25	4102,33	4943,41	5784,49	6625,58
coste a8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	69,96	314,61	507,39	507,39	507,39
coste total por periodo	0,00	2526,20	5052,40	7582,72	10334,16	11472,80	12514,09	13556,64	15683,69	17810,74	19937,79	21749,83	22835,57	23869,43	24710,51
Duración Total		16,46					Coste total	26779,63							

El coste asignado a cada periodo de tiempo dependerá de la secuenciación de las actividades así como de la duración asignada a cada actividad.

En cada periodo de tiempo se contabiliza, para cada actividad, el coste de ejecución de dicha actividad. Si la actividad no ha iniciado su ejecución, el coste asignado de dicha actividad es nulo. Si solo se ha ejecutado en parte, el coste asignado en cada periodo de tiempo se corresponderá con el coste acumulado correspondiente a la parte de actividad ejecutada. Si la actividad ya ha sido ejecutada, el coste en cualquier periodo de tiempo posterior a su ejecución será el coste total asignado a dicha actividad.

Si repetimos el proceso para cada actividad, obtendremos los costes de cada una de las actividades en cada periodo de tiempo.

Si sumamos los costes de todas las actividades, en cada periodo de tiempo, obtendremos los costes totales del proyecto por periodo de tiempo.

Al utilizar simulación de Monte Carlo, repetiremos el proceso un número suficientemente elevado de veces para obtener una función de distribución de costes en cada periodo de tiempo.

Con la función de distribución podemos extraer los estadísticos correspondientes a los percentiles de coste en cada periodo de tiempo y el valor medio de dicho coste.

Una vez obtenidos los datos anteriores, podemos unir los puntos correspondientes a un percentil concreto (por ejemplo el percentil 10%, P10), que se produce en cada uno de los periodos de tiempo. Obtenemos la curva P10.

Lo mismo podemos hacer para la curva de percentil 30 (P30), P50,..., incluso la curva de valor medio del coste en cada periodo de tiempo (Pmed).

Para la primera red de proyecto, donde las actividades han sido programadas según función de distribución normal, obtenemos el gráfico de la Figura 6-5.

En el mismo gráfico hemos incluido la representación de la curva de valor planificado según la metodología PERT. La gráfica representa distintos percentiles de costes del proyecto para cada periodo de tiempo. A partir de cierto periodo de tiempo, los costes de cada una de las curvas permanecen constantes, como puede observarse en la Figura 6-5.

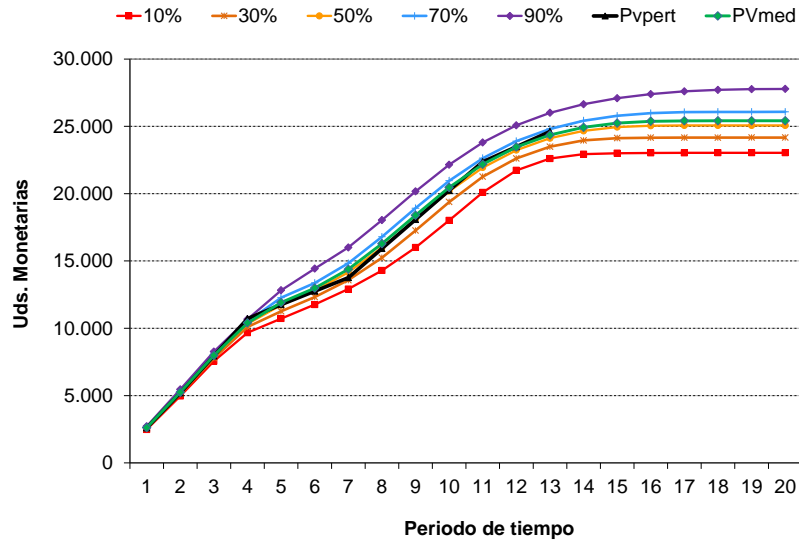


Figura 6-5 Percentiles de coste del proyecto por periodo de ejecución. Distribución normal

Cada una de las actividades del proyecto tiene asignada una incertidumbre, que viene representada por su varianza. La incertidumbre de cada actividad provoca la variabilidad del proyecto, que generará un coste máximo del proyecto y una duración máxima. A partir de dicha duración, los costes representados en la gráfica, serán constantes.

Al aplicar simulación de Mote Carlo, hemos obtenido también la función de distribución de probabilidad de la duración total del proyecto, y con ella, extraemos los datos estadísticos de los percentiles de duración del proyecto y de coste total (Figura 6-6).

Así, por ejemplo, el percentil 10% (P10) de duración total del proyecto es de 12,59 uds temporales, mientras que el P90 vale 16.35 uds temporales. Por otra parte, de la tabla de percentiles de coste obtenemos que el P10 = 23035,23 uds monetarias, mientras que el P90 = 27780,04 uds monetarias.

Estos valores de percentiles de duración los incorporamos en la gráfica de percentiles de coste y los cruzamos con los valores correspondientes del coste para obtener las gráficas finales de control estadístico de procesos con incertidumbre (por ejemplo, el P10 de duración, con valor 12,59 uds temporales, lo cruzamos con el P10 de coste, de valor 23035,23; en ese punto cortamos la curva P10) (Figura 6-7)

Percentile	Forecast values	Percentile	Forecast values
0%	10,30	0%	19.519,37
10%	12,59	10%	23.035,23
20%	13,04	20%	23.673,39
30%	13,41	30%	24.165,27
40%	13,74	40%	24.620,83
50%	14,07	50%	25.065,42
60%	14,44	60%	25.539,20
70%	14,87	70%	26.073,99
80%	15,43	80%	26.739,41
90%	16,35	90%	27.780,04
100%	50,63	100%	60.942,95

Figura 6-6 Percentiles de duración total y coste total del proyecto extraídos de simulación de Monte Carlo. Distribución normal.

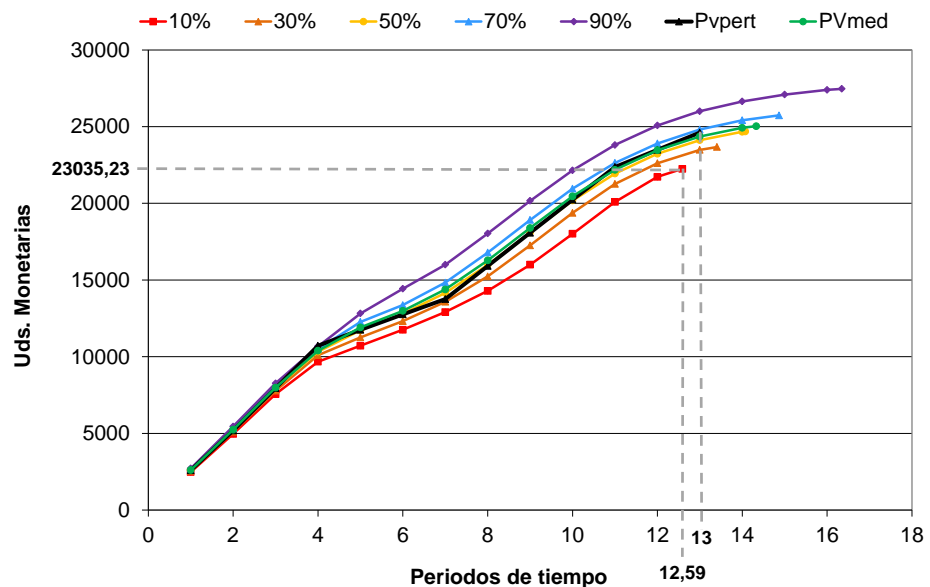


Figura 6-7 Percentiles de coste del proyecto por periodo de ejecución. Distribución normal

En la gráfica, observamos cómo la curva de valor planificado aplicando metodología PERT, tiene una duración estimada de 13 uds temporales, situándose entre los percentiles P10 y P20 de tiempo. Así mismo, tiene un coste planificado de 24613 uds monetarias, situándose entre los percentiles P60 y P70 de costes.

Seguimos el mismo proceso descrito para la segunda red de proyecto, donde las actividades han sido programadas según función de distribución exponencial.

Utilizando simulación de Monte Carlo obtenemos, para cada periodo de tiempo, las curvas percentiles de coste del proyecto (Figura 6-8).

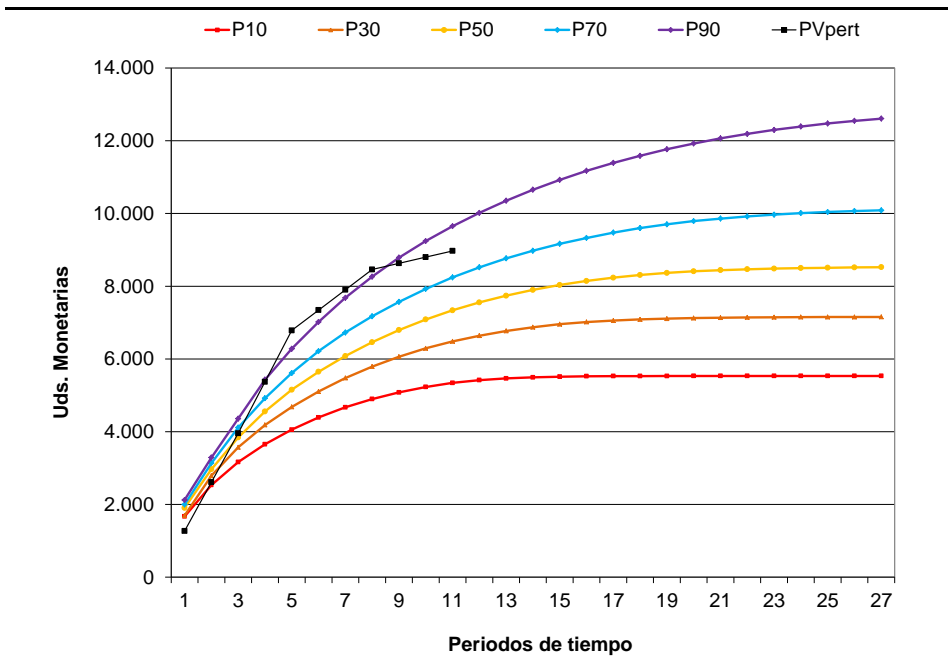


Figura 6-8 Percentiles de coste del proyecto por periodo de ejecución. Distribución exponencial

De la misma manera extraemos los datos estadísticos de las funciones de distribución de probabilidad de coste y duración total del proyecto (Figura 6-9).

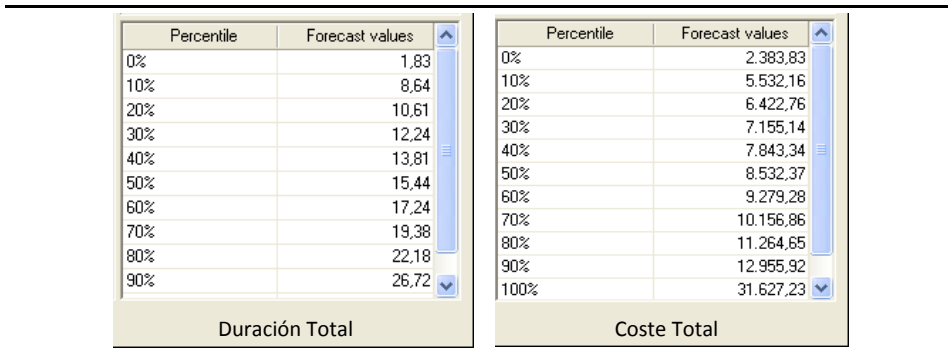


Figura 6-9 Percentiles de duración total y coste total del proyecto extraidos de simulación de Monte Carlo. Distribución exponencial

Los datos de los percentiles de duración total del proyecto los utilizamos para trasladarlos a las curvas de percentiles de coste y cortar las curvas hasta dicho periodo de tiempo y obtener las curvas finales donde realizaríamos el control estadístico del proyecto según la red de proyecto dada.

En este caso hemos incluido igualmente la curva de valor planificado aplicando metodología PERT.

La duración estimada del proyecto según esta metodología es de 11 uds temporales. De los resultados de la simulación comprobamos que se sitúa entre los percentiles P20 y P30 de la duración total del proyecto.

En cuanto a costes, el coste total planificado es de 8970 uds monetarias. Este coste se sitúa entre el percentil P60 y P70 de los costes totales del proyecto.

Al igual que hemos procedido con la red de funciones de distribución normal, realizamos las operaciones con la red de funciones de distribución uniforme. Cada curva percentil se interrumpe en los valores correspondientes al percentil de plazo y de coste (Figura 6-10).

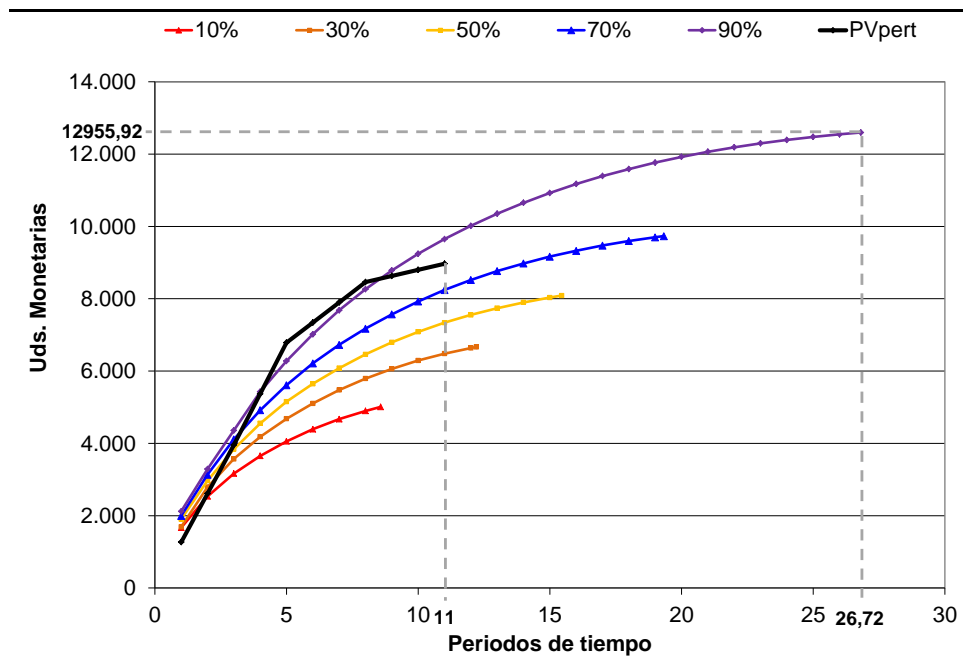


Figura 6-10 Percentiles de coste del proyecto por periodo de ejecución. Distribución exponencial

Por ejemplo, la curva P90 se interrumpe en el periodo de tiempo relativo a su percentil 90 (26,72) y le corresponderá un valor en coste correspondiente a su percentil 90 (12955,92). Repetimos la operación para cada una de las curvas.

Parecería lógico pensar que hemos conseguido el objetivo de obtener un marco gráfico de control estadístico de los proyectos, donde se incluyen distintas curvas percentiles de probabilidad, conseguidas mediante simulación de Monte Carlo, y donde podemos incluir la representación de nuestro proyecto real ejecutado, al igual que incluimos la representación de la curva de valor planificado según metodología PERT.

Conforme se sitúe la curva de valor real sobre el gráfico, nos permitiría saber sobre qué percentil de coste se está ejecutando el proyecto, es decir, si existen sobrecostes o infracostes respecto del valor planificado, por simple comparación con respecto a las curvas percentiles.

Además, una vez representado el proyecto a su finalización, nos permitirá saber si el proyecto se ha retrasado o si se ha ejecutado antes de lo previsto.

Para contrastar y validar las curvas obtenidas como curvas de control se realiza un nuevo ejercicio de simulación. En este caso, utilizando nuevamente simulación de Monte Carlo, generamos proyectos y cada proyecto generado lo comparamos con cada una de las curvas percentiles (P10, P30, P50,..) así como con la curva de valor medio (PVmed). Realizamos los cálculos según metodología EVM para obtener los indicadores de coste y programación que nos indiquen el estado de adelanto (retraso) y sobrecoste (infracoste) de los proyectos frente a las curvas percentiles. Como hemos simulado un número determinado de proyectos con Monte Carlo, representaremos el valor medio de los resultados obtenidos.

Así, para la primera red de proyecto, modelada con función de distribución normal, los resultados obtenidos de las gráficas de CV, CPI son los mostrados en la Figura 6-11; SV, SPI son los mostrados en la Figura 6-12 y, por último, SV(t), SPI(t) son los mostrados en la Figura 6-13. Recordamos que, aplicando metodología de Valor Ganado, CV ($CV=EV-AC$) representa la Varianza de costes. Valores positivos indican infracoste mientras que valores negativos representan proyectos con sobrecoste.

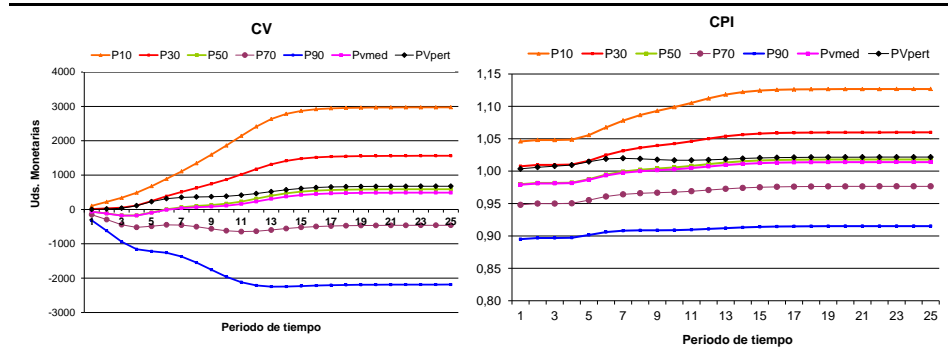


Figura 6-11 CV, CPI simulaciones red de proyecto distribución normal

De la misma manera, CPI ($CPI=EV/AC$) representa el Índice de Rendimiento en Costes. Valores mayores que 1 indican infracoste mientras que valores por debajo de 1 representan proyectos con sobrecoste.

Igualmente, según metodología de Valor Ganado, SV ($SV=EV-PV$) representa la Varianza en programación. Valores positivos indican adelanto sobre el proyecto planificado, mientras que valores negativos representan proyectos con retraso.

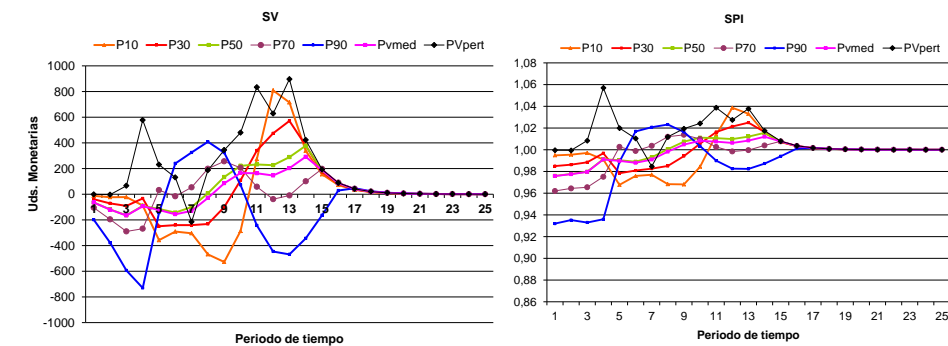


Figura 6-12 SV, SPI simulaciones red de proyecto distribución normal

SPI ($SPI=EV/PV$) representa el Índice de Rendimiento en Programación. Valores mayores que 1 indican adelanto sobre la planificación, mientras que valores por debajo de 1 representan proyectos con retraso.

Calculamos la Programación Ganada media de la simulación con respecto a cada una de las curvas percentiles.

Y finalmente, con los datos de Programación Ganada, calculamos la Varianza de Programación Ganada $SV(t)$ ($SV(t)=ES-AT$). Valores positivos indican adelanto sobre el proyecto planificado, mientras que valores negativos representan proyectos con retraso.

$SPI(t)$ representa el Índice de Rendimiento de Programación ($SPI(t)=ES/AT$). Valores mayores que 1 indican adelanto sobre la planificación, mientras que valores por debajo de 1 representan proyectos con retraso.

Observamos que los valores de las gráficas no concuerdan con los valores esperados para todas las representaciones.

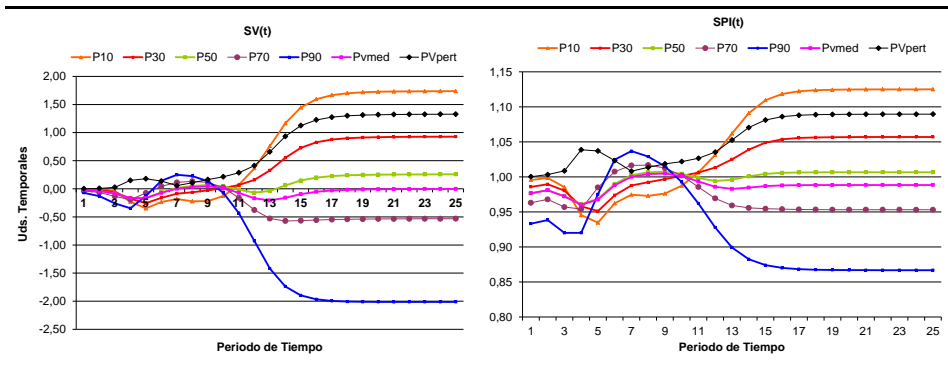


Figura 6-13 $SV(t)$, $SPI(t)$ simulaciones red de proyecto distribución normal

En la gráfica de programación, la varianza (SV) tiende a 0 por definición, al igual que el índice de rendimiento tiende a 1. Si bien antes de llegar a la situación final pasa por unos estados anómalos con continuos cambios de signo.

En cuanto a la Varianza de Programación Ganada ($SV(t)$), los valores finales coinciden con los resultantes de la simulación inicial. No obstante, para los periodos intermedios existe una oscilación entre las distintas gráficas muy acusadas.

Para la segunda red de proyecto, modeladas las actividades según función de distribución exponencial, realizamos la simulación análoga para la obtención de los resultados y poder representarlos.

Las gráficas de CV, CPI son los mostrados en la Figura 6-14; SV , SPI son los representadas en la Figura 6-15 y, por último, $SV(t)$, $SPI(t)$ son los mostrados en la Figura 6-16

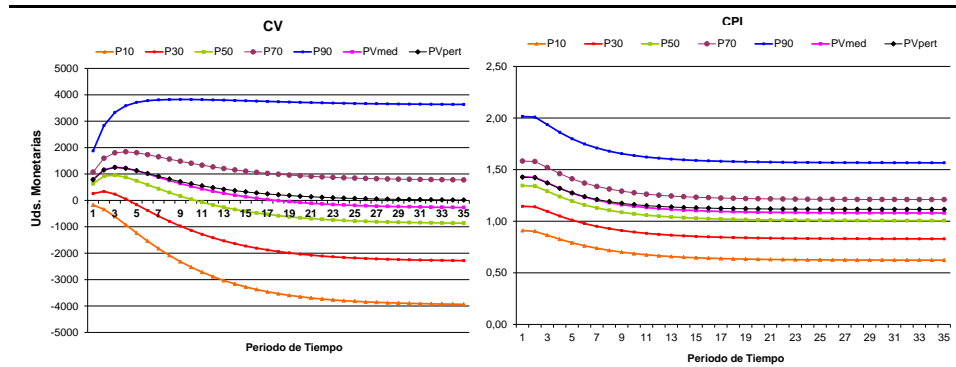


Figura 6-14 Varianza en Costes (CV) e índice de rendimiento de costes (CPI). Proyecto modelado con función de distribución exponencial

En este caso también observamos que no se cumple la metodología de Valor Ganado. En el gráfico de CV, la curva PV toma el valor 0 mientras que en el gráfico CPI, el valor adquirido es distinto de 1, no correspondiéndose con la definición de esta metodología.

Lo mismo ocurre con la curva PVmed en los gráficos SV(t) y SPI(t).

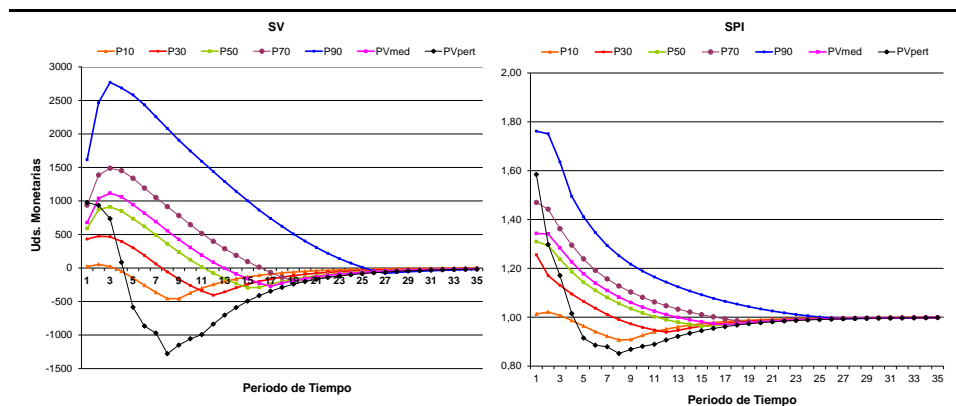


Figura 6-15 Varianza de Programación (SV) e Índice de Rendimiento de programación. Proyecto modelado con función de distribución exponencial

Por otra parte, las curvas de percentiles (tanto para el gráfico modelado con funciones de probabilidad normal como para el gráfico modelado con funciones de probabilidad exponencial) son válidas para realizar el control del proyecto una vez que hemos representado el proyecto completo, una vez finalizado.

En esta situación, podemos observar cómo se ha comportado el proyecto para cada periodo de ejecución. Podemos observar, para cada periodo de tiempo, si

ha habido retraso, sobrecostes, adelantos, sobre qué percentil se encuentra el proyecto en cada periodo de tiempo,..., así hasta su finalización.

El problema surge si queremos realizar el control del proyecto en tiempo real. Podemos representar para el tiempo de ejecución actual (AT) el coste real del proyecto e ir representando la evolución del proyecto. Podemos comprobar sobre qué percentil de coste se ejecuta el proyecto pero surge un problema. No somos capaces de saber en qué porcentaje de ejecución del proyecto se encuentra en cada periodo de tiempo.

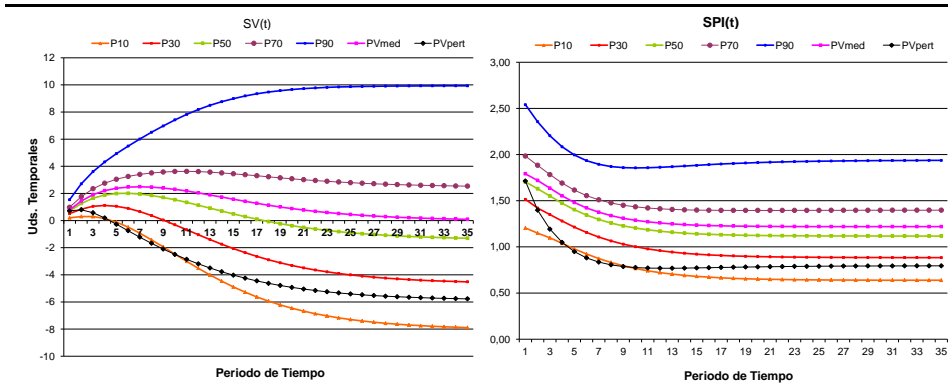


Figura 6-16 Varianza de Programación (SV) e Índice de Rendimiento de programación (SPI(t)). Proyecto modelado con función de distribución exponencial

Por otra parte, podemos conocer el percentil de ejecución del proyecto en cuanto a costes del proyecto, pero estos gráficos no nos ofrecen información en cuanto a la programación. No podemos conocer sobre qué percentil de tiempo se ejecuta el proyecto hasta que no ha finalizado.

6.2 Metodología Triad (x,t,c)

Por todo ello, Acebes et al. (2014a) proponen un procedimiento diferente, utilizando simulación de Monte Carlo, para conseguir un entorno gráfico de seguimiento y control de proyectos donde se representen diferentes márgenes de confianza (que coincidirán con los percentiles de los estadísticos de las funciones de distribución del proyecto en cada punto) y donde, al incluir la representación del proyecto que se desea monitorizar, se podrá observar su comportamiento y

se podrá analizar qué grado de desviación presenta el proyecto en cada punto de control.

La metodología comienza por obtener un “universo” de posibles proyectos diferentes (al menos un número suficientemente grande). Para cada “posible” ejecución de proyecto simulado, se define una terna o triad (x, T_{xj}, C_{xj}) , donde $x\%$ es el porcentaje de proyecto completado ($x\% = EV / BAC$), EV es el Valor Ganado, BAC es el coste presupuestado del proyecto, $C_{xj} = x * C_j$ es el coste total cuando el proyecto ha completado un $x\%$ (para cada simulación j), y T_{xj} es el tiempo de ejecución del proyecto cuando el coste invertido ha sido C_{xj} . C_j es el coste total del proyecto para la simulación “ j ”. La Figura 6-17 representa gráficamente la filosofía de la Metodología Triad.

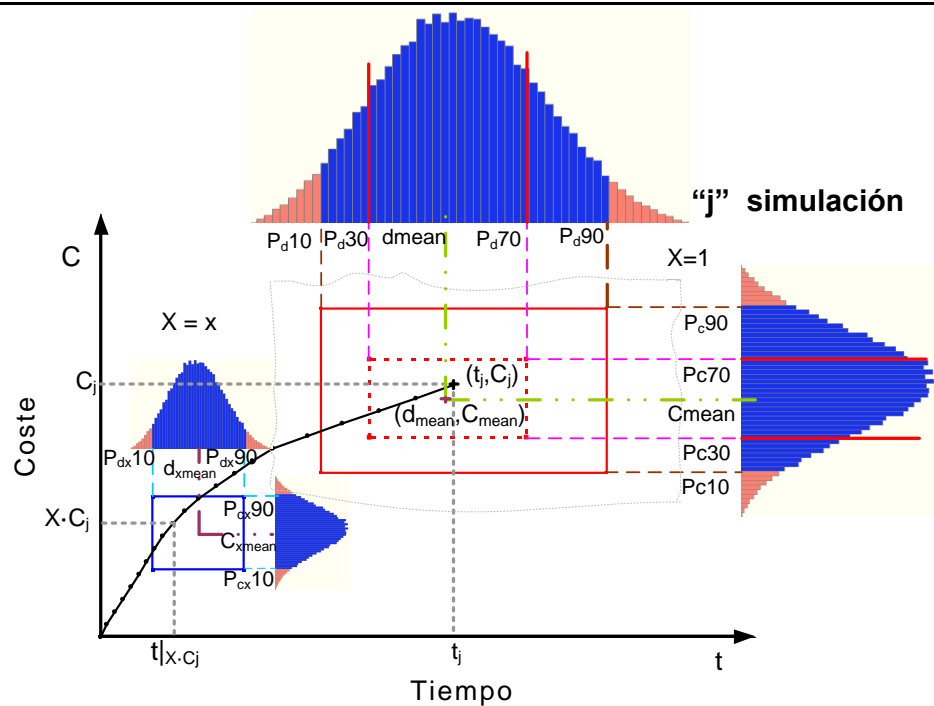


Figura 6-17 Metodología Triad

Para el caso particular de $x=1$, obtenemos un conjunto de puntos de coste y duración que se corresponden con el proyecto finalizado (proyecto ejecutado al 100%). Si representamos en un eje cartesiano (t,c) dichos proyectos particularizados por su coste y duración final obtendremos un área con j puntos

distintos (correspondientes a las j simulaciones). Analizando estadísticamente los puntos obtenidos, conseguiremos los datos estadísticos de las funciones de distribución de probabilidad para cada uno de los ejes: tiempo y coste.

Para cada función de distribución (de tiempo y de coste), que han sido obtenidas considerando $x=1$, es decir, para los j -ésimos proyectos finalizados de la simulación, podremos obtener los valores estadísticos siguientes: valor medio, mediana, percentiles (P10, P30,...), tanto para la función de tiempo como para la función de coste.

Continuando con la posición de $x=1$ (proyecto ejecutado al 100%), podemos unir las parejas de puntos obtenidos al proyectar los percentiles de plazo en el eje vertical y de coste en el horizontal. Así obtenemos un posible rectángulo de puntos donde se podría situar el proyecto finalizado según las probabilidades de coste y plazo del proyecto resultante. Si, por ejemplo, fijamos como líneas de control los percentiles 90% y 10%, tanto de coste como de programación, obtendremos el rectángulo formado por los puntos P_c10 , P_c90 , P_d10 , P_d90 . Lo mismo podemos hacer, por ejemplo para los percentiles 30% y 70% y así sucesivamente.

Para cada porcentaje de ejecución del proyecto en costes (en este primer caso para $x=100\%$), obtenemos una serie de “rectángulos”, determinados por los percentiles de probabilidad.

Una vez que hemos obtenido los resultados de los estadísticos de probabilidad de las funciones de distribución de coste y plazo considerando $x=1$, es decir, en la finalización del proyecto, seguimos el mismo procedimiento para obtener los resultados para otros porcentajes de ejecución del proyecto (para otros valores de x), sabiendo que $x=EV/BAC$.

La definición de x_{AT} establecido como el Valor Ganado dividido por el coste total presupuestado es una suposición central de la metodología EVM y ha sido previamente utilizada en diversa literatura (Vanhoucke, 2011). Desde que EV representa el coste presupuestado del trabajo ejecutado y BAC es el presupuesto final del trabajo programado, EV/BAC mide el porcentaje de proyecto completado normalizado por el coste presupuestado.

Para cada x , y para cada “ j ” proyecto simulado mediante simulación de Monte Carlo, obtenemos los valores de la terna (x, T_{xj}, C_{xj}) . $C_{xj} = x * C_j$; C_j es el coste

total del proyecto en la simulación j y T_{xj} es el tiempo de ejecución del proyecto cuando el coste invertido ha sido C_{xj} .

Así pues, para cada x , volveremos a obtener los datos estadísticos (percentiles) para representar los límites de control del proyecto en dicho porcentaje de ejecución “ x ”.

En la Figura 6-18 representamos el diagrama de bloques para la obtención de las distintas curvas percentiles de la Metodología Triad.

Si, por ejemplo, tomamos como valor $x=0,5$, estamos considerando los proyectos al 50% de su ejecución en costes.

Si la metodología EVM representa en un gráfico los parámetros PV, EV y AC y posteriormente utiliza las gráficas de las varianzas o índices de rendimiento para realizar el seguimiento y control del proyecto, análogamente, con la metodología Triad, hemos obtenido la terna (x, T_x, C_x) e implementamos dos nuevas gráficas donde se realizará el seguimiento y control del proyecto, una para el plazo y otra para el coste (Figura 6-19).

En el primer caso, para cada valor de x situado en el eje de ordenadas, proyectamos en el eje de abscisas los valores de los percentiles de probabilidad de las funciones de distribución de la duración del proyecto en dicho porcentaje de ejecución del proyecto.

Así, para el valor $x=1$ (o $x=100\%$) proyectamos los valores de los percentiles de probabilidad de la función de distribución de la duración total del proyecto (P10, P30,...) sobre la recta de porcentaje de 100%. Lo mismo hacemos para otros porcentajes por ejemplo para el 80%, 60%,...

Una vez proyectados todos los percentiles que pretendemos representar en cada uno de los porcentajes de ejecución del proyecto, unimos los percentiles equivalentes de cada porcentaje de ejecución (por ejemplo $P10_{x=5\%}$, $P10_{x=10\%}$,, $P10_{x=100\%}$) y obtenemos la curva de control Pd10, del 10% de probabilidad, para cada porcentaje de ejecución del proyecto.

Lo mismo hacemos para el resto de valores percentiles, representando el conjunto de curvas de control Pd30, Pd50,..., Pd90 (Figura 6-19c).

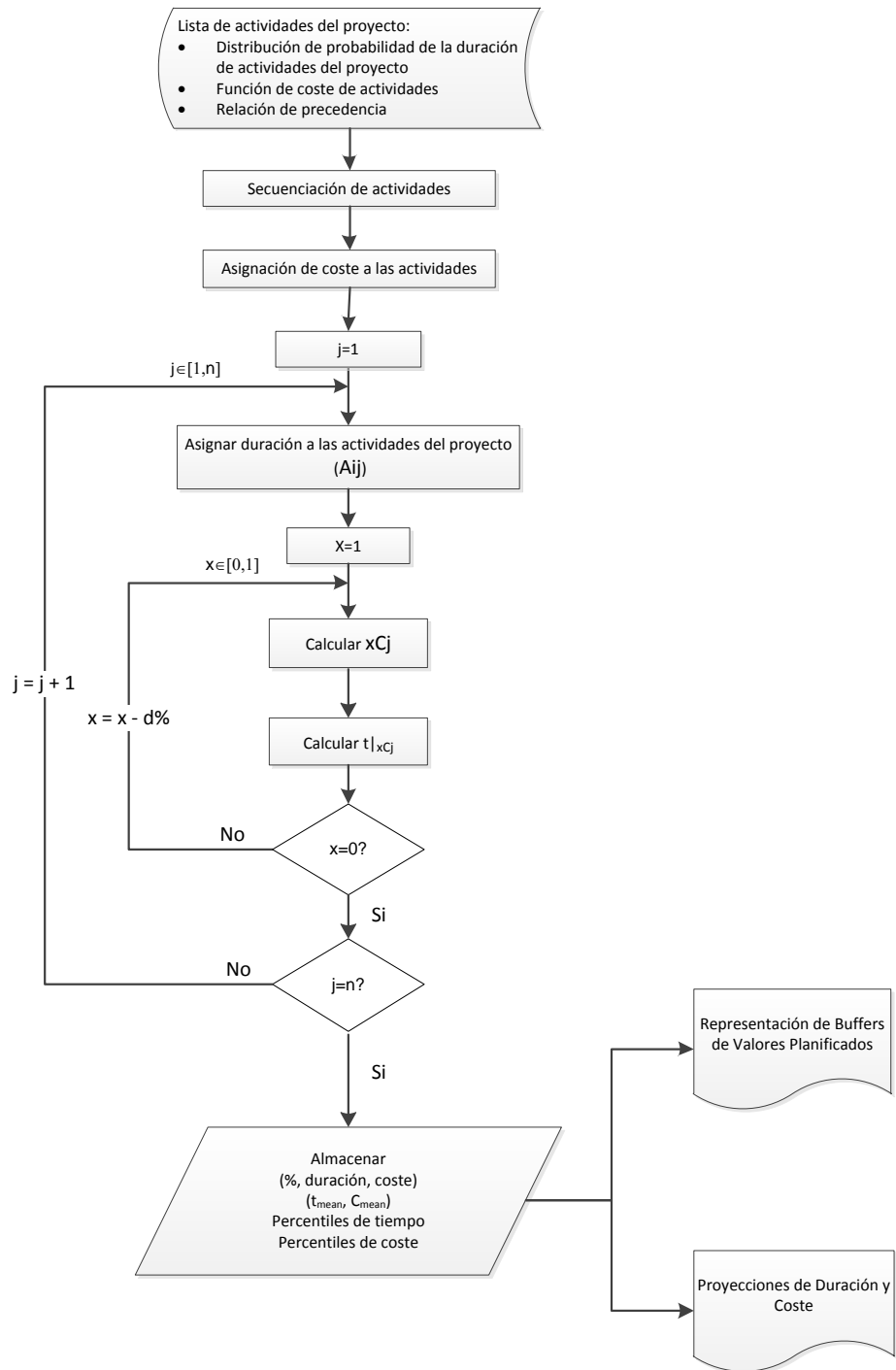


Figura 6-18 Diagrama de bloques Metodología Triad

En el caso del coste, proyectamos en otro gráfico de control distinto los percentiles de probabilidad de las funciones de distribución del coste del proyecto, para cada porcentaje de ejecución del proyecto. En este gráfico, el porcentaje de ejecución se encuentra en el eje de abscisas y las proyecciones de costes se encuentran en el eje de ordenadas (para cada x distinto).

Igualmente, unimos los percentiles equivalentes de cada porcentaje de ejecución y tendremos como resultado las curvas de control de costes Pc10, Pc30, ..., Pc90 (Figura 6-19b).

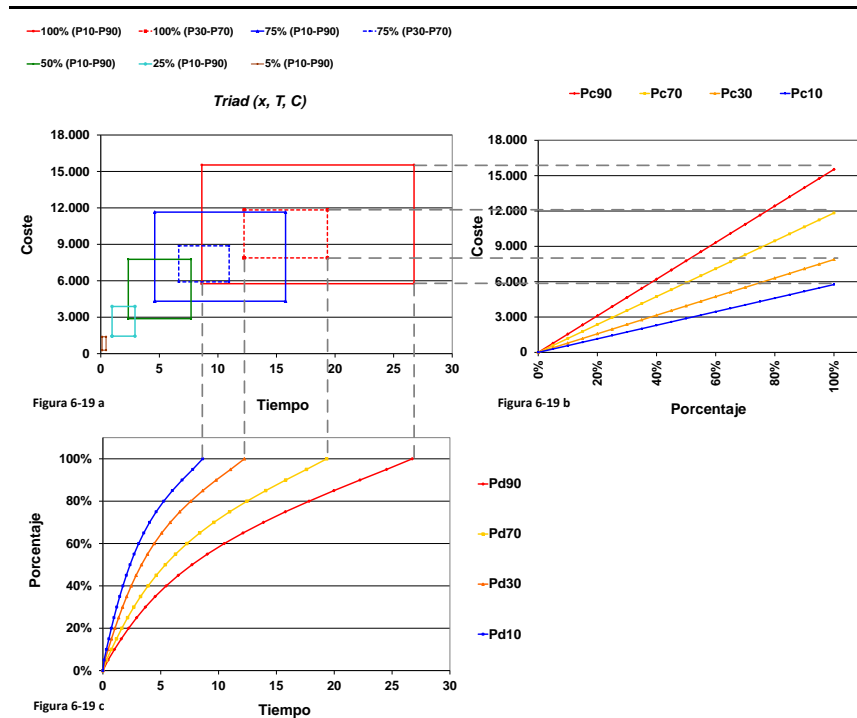


Figura 6-19 Metodología Triad. Terna y Proyecciones de tiempo y coste

Observamos como la representación de las curvas de control de costes son líneas rectas. Esto es así debido a que los porcentajes de ejecución del proyecto están referidos al % del coste total del proyecto, por lo tanto, existe una proporcionalidad en las curvas de percentiles con respecto al coste.

Las gráficas de control se obtienen en fase de Planificación, previo al comienzo de la ejecución del proyecto.

En fase de planificación podemos incluir en los gráficos de control la curva de valor planificado (PV). Proyectamos la curva PV en el gráfico de tiempo y en el gráfico de costes. Para cada instante de tiempo particular t , el valor planificado es PV_t , por tanto $x_t = PV_t / BAC$, siendo BAC el presupuesto planificado del proyecto. Así pues, podemos representar los puntos (t, x_t) en el gráfico de programación y los puntos (x_t, PV_t) en el gráfico de costes.

Una vez comienza el proyecto, en las gráficas obtenidas se incluye la representación del proyecto en ejecución. En cada periodo de control del proyecto representamos la terna (x, AT, C_{AT}) donde x se calcula como EV_{AT} / BAC , AT es el tiempo actual de ejecución del proyecto y C_{AT} es el coste actual del proyecto. En la gráfica de control de programación representamos (AT, x) y en la gráfica de control de costes representamos (x, C_{AT}) .

Esta metodología proporciona otras dos gráficas de control de plazo y coste, equivalentes a las anteriores y construidas de forma análoga a las gráficas de la varianza que podemos obtener con la metodología EVM (Figura 6-20).

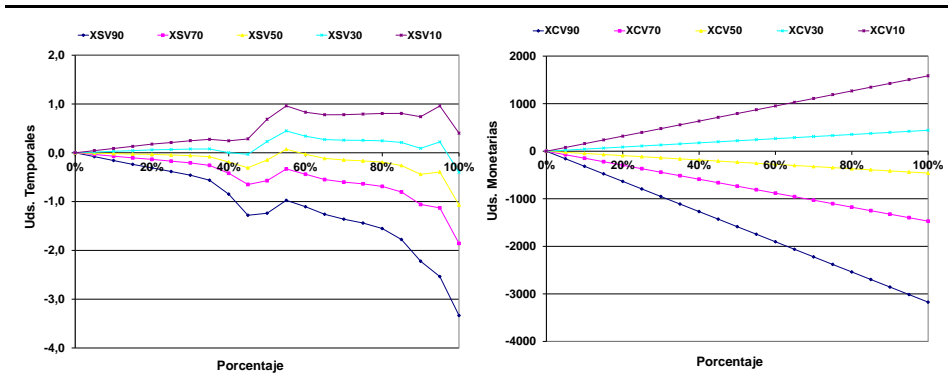


Figura 6-20 Varianza de coste XCV y varianza de tiempo XSV

Para su construcción, nos basamos en los gráficos de curvas percentiles (de programación y costes) y en la curva del valor planificado, que habíamos incluido junto con las curvas de control.

Utilizamos la curva de valor planificado PV como línea del eje-x en cada uno de los gráficos (programación y costes) y representamos la desviación de cada curva de control (de cada curva percentil) con respecto a la curva PV, para cada porcentaje de ejecución del proyecto.

Utilizamos la notación XCV P y XSV P para nombrar las varianzas de los percentiles de coste y programación, respectivamente.

Durante la ejecución del proyecto, los valores de CV y SV(t), utilizados en la metodología EVM, pueden ser directamente representados en estas gráficas, proporcionándonos el valor absoluto del sobrecoste (infracoste) y adelanto (retraso) del proyecto. También nos permitirá conocer sobre qué límites de probabilidad de adelanto (retraso) y sobrecoste (infra coste) se encuentra el proyecto en ejecución, teniendo en cuenta la variabilidad aleatoria esperada del proyecto.

Si el proyecto está dentro de los límites o intervalos de confianza, asumimos que las varianzas se pueden explicar por la variabilidad estocástica normal, pero si el proyecto está fuera de estos límites, el director del proyecto tiene razones objetivas para considerar que puede estar sucediendo algo fuera de lo planificado. Los límites apropiados para enviar señales de alerta y aplicar medidas correctivas dependen del contexto específico del proyecto, por ejemplo, los plazos estrictos y fechas de vencimiento pueden necesitar *buffers* de control más pequeños.

Durante el trabajo realizado para el desarrollo de la metodología de control Triad se pudo certificar que el método PERT de programación de proyectos es optimista en cuanto a la duración total del proyecto. Esta conclusión había sido ya resuelta en la Gestión de Proyectos y referenciada en la literatura de investigación de operaciones muchas veces, por ejemplo, en los citados trabajos de Klingel (1966), MacCrimmon & Ryavec (1964) y Schonberger (1981).

Es importante darse cuenta de que nuestra contribución no es un método de programación alternativa a PERT sino una manera de incluir la incertidumbre y los procesos estocásticos en la metodología de Valor Ganado, una técnica destinada al seguimiento, control y vigilancia de los proyectos. No se trata de un método de programación que genere resultados ni optimistas ni pesimistas con respecto a la curva de valor planificado.

En nuestra propuesta se puede utilizar cualquier curva de valor planificado que queramos considerar como punto de referencia en la EVM. Para ilustrar el proceso incluimos varias curvas PV (PV obtenidos por simulación de Monte Carlo y también la curva PV obtenida por el método PERT). El análisis

subraya que el método PERT de programación es optimista, pero el método puede ser utilizado para cualquier curva de PV obtenidos por algún proceso de programación.

Hemos simulado dos modelos de proyecto utilizando distintas funciones de distribución asignadas a las duraciones de las actividades. El proyecto puede tener cualquier posible rendimiento, mejor o peor de lo esperado, y podría situarse en cualquier percentil. La metodología no depende de las distribuciones utilizadas para modelar las duraciones de coste y de actividad. No obstante, en uno de los casos hemos elegido funciones de distribución exponencial basado en investigaciones anteriores realizadas por Mummolo, Digiesi, & Ranieri (2003), Mummolo (1994, 1997) y Pontrandolfo (2000).

El razonamiento de la utilización de función de distribución exponencial para nuestro supuesto se basa en el alto nivel de incertidumbre de este tipo de distribución que pone de relieve la diferencia en el pronóstico del proyecto con respecto al enfoque PERT. Hazir & Shtub (2011) también utilizan distribuciones exponenciales para mostrar cómo la forma de la presentación de información afecta el control del proyecto.

Por todo lo anterior, con este trabajo proponemos una nueva metodología para el control de los proyectos en condiciones de incertidumbre, integrando la metodología EVM con toda la literatura relativa a la actividad y la variabilidad del proyecto.

La metodología EVM se desarrolló bajo los supuestos de certeza, por lo tanto, los directores de proyecto saben si el proyecto está retrasado o se ejecuta antes de lo previsto, si tiene sobrecostes o infracostes, en función de la comparación con los valores planificados. Pero cuando introducimos la variabilidad dentro del análisis, estamos más interesados en saber cuál es la magnitud de las desviaciones respecto del valor planificado (desde el punto de vista estadístico). De esta manera, los Directores de Proyectos sabrán si las desviaciones respecto de los valores previstos están o no de acuerdo con las desviaciones asumidas por la variabilidad de las actividades y, por lo tanto, se deben tomar acciones correctivas tempranas.

Para poner en práctica la metodología, no se necesita más información que los datos necesarios para la realización de la metodología EVM, información sobre

las funciones de distribución de probabilidad de las actividades y conocimientos básicos acerca de simulación de Monte Carlo.

El marco gráfico de control confirma las programaciones optimistas obtenidas al utilizar los métodos de programación PERT. Desde el punto de vista estadístico, en la mayoría de los casos, la probabilidad de lograr el tiempo de finalización del proyecto obtenido según metodología PERT es inferior al 30%.

6.3 Ejemplos de aplicación

Mostramos los resultados obtenidos aplicándolos en las redes de proyecto utilizadas en el ejemplo del punto anterior: red propuesta por Lambrechts et al. (2008), con actividades modeladas según función de distribución normal y utilizando la red con actividades modeladas según función de distribución exponencial.

Para el primero de los casos, en fase de planificación, aplicamos simulación de Monte Carlo para poder calcular y representar las curvas percentiles de seguimiento y control del proyecto (Figura 6-21). En la Figura 6-21a se representa la gráfica “Triad” con el tiempo en el eje de abscisas y el coste en el eje de ordenadas. Hemos representado las zonas comprendidas por los percentiles P10/P90 y P30/P70 para los porcentajes de ejecución 100% y 75% del proyecto. También hemos incluido las zonas comprendidas por los percentiles P10/P90 para los porcentajes de ejecución 50%, 25% y 5% del proyecto. Finalmente hemos incluido la representación de la curva PV_{PERT}, obtenida según la metodología de programación PERT de proyectos así como la curva PV_{med}, obtenida con la simulación de Monte Carlo y se corresponde con los valores medios de las simulaciones. En la figura 6-21b se representan las proyecciones de los percentiles para cada % de ejecución del proyecto. Uniendo todos los puntos de cada correspondiente percentil obtenemos las curvas percentiles de coste. Por último, en la figura 6-21c se representan las proyecciones de los percentiles de tiempo en función del porcentaje de ejecución del proyecto.

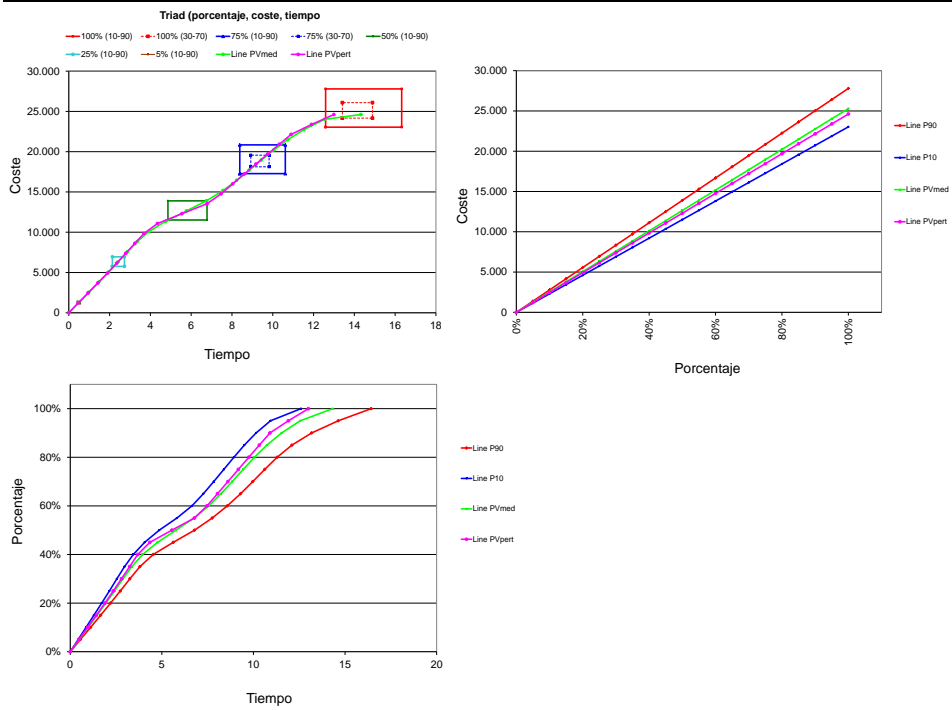


Figura 6-21 Triad y proyecciones de coste y tiempo. Actividades modeladas según función de distribución normal.

Posteriormente calculamos y representamos, en fase de planificación, los gráficos de control de varianzas de coste y programación XCV y XSV (Figura 6-22).

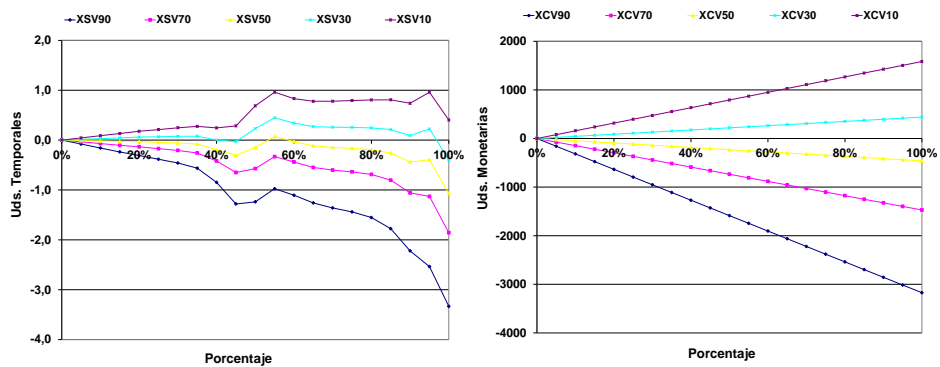


Figura 6-22 Varianza de coste XCV y de tiempo XSV. Actividades modeladas según función de distribución normal.

Recordamos que estos gráficos se obtienen como la diferencia de cada curva percentil (de coste y de plazo respectivamente) con respecto a la curva de valor planificado según metodología Pert (PVpert). Esta curva coincidirá con el eje de abscisas en este gráfico.

Durante la etapa de ejecución del proyecto, suponemos que el proyecto se encuentra en el periodo $t=10$ de ejecución. Para ese periodo de tiempo, $AC=21555$ uds. monetarias.

Introducimos los datos de nuestro proyecto en ejecución dentro de las gráficas de control estadístico del proyecto (Figura 6-23).

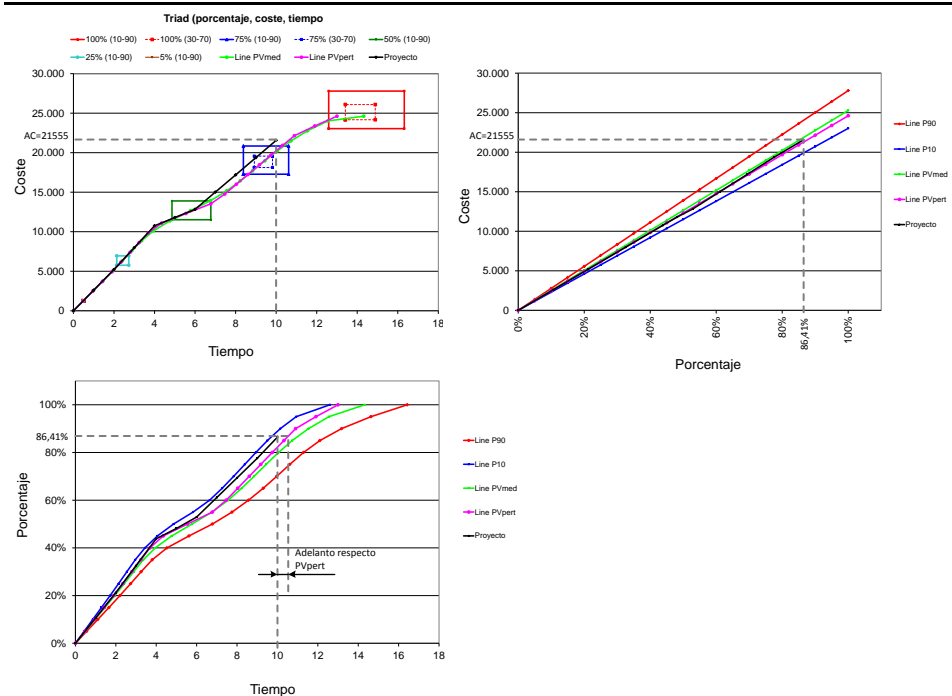


Figura 6-23 Triad y proyecciones de coste y tiempo. Actividades modeladas según función de distribución normal. Periodo de control $t=10$ ud. Temporales

En la figura 6-23a situamos directamente el punto de ejecución del proyecto ya que conocemos el tiempo de control ($t=10$) y el coste actual del proyecto en dicho periodo.

Si hemos calculado el Valor Ganado en $t=10$ y hemos obtenido $EV=21269,25$, sabiendo que $BAC=24613$, podemos calcular el porcentaje de ejecución en coste

en el instante actual de ejecución, $x\% = EV/BAC*100 = 21269,25/24613*100 = 86.41\%$.

Con este dato de porcentaje de ejecución podemos proyectar la curva de ejecución de nuestro proyecto modelo del gráfico terna, a los gráficos correspondientes de costes y tiempo. En la figura 6-23b situamos el punto de seguimiento en el valor de abscisas 86,41% de ejecución del proyecto y 21555 uds monetarias de coste. En la figura 6-23c, para un tiempo de $t=10$ uds monetarias, situado en el eje de abscisas, situamos el punto de seguimiento que coincida con el 86,41% de ejecución del proyecto, en el eje de ordenadas.

En las proyecciones de tiempo observamos que el proyecto se encuentra entre la curva de percentil 10 y la curva de valor planificado PV_{pert}. En cuanto al coste, el proyecto se está ejecutando entre las curvas de valor planificado PV_{pert} y la curva de valor medio PV_{med}.

Representamos los gráficos de varianzas para nuestro instante de control $t=10$, para coste y plazo (Figura 6-24).

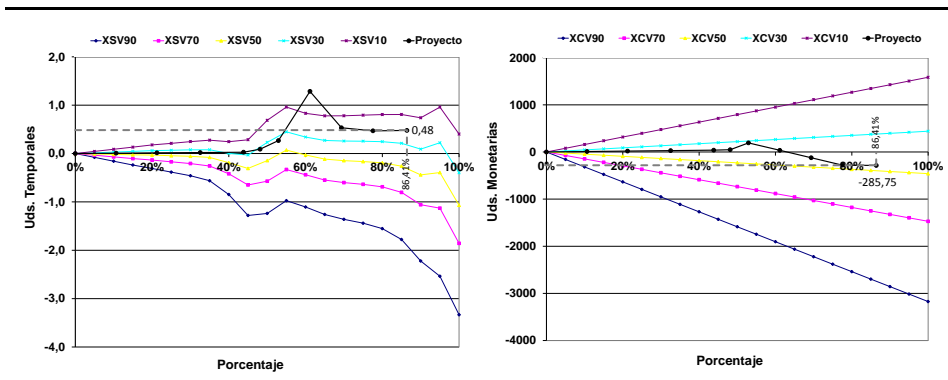


Figura 6-24 Varianza de tiempo XSV y de coste XCV. Actividades modeladas según función de distribución normal. Periodo de control $t=10$ ud. temporales

En estos gráficos de varianzas de coste y programación obtenemos una representación semejante al gráfico de proyecciones donde la curva de ejecución real del proyecto se sitúa entre las curvas percentiles.

En cuanto al plazo, en la primera parte de ejecución del proyecto (hasta el 50% aproximadamente), la curva de ejecución está muy próxima al percentil XSV30, presentando un adelanto notable en el periodo de tiempo 7, para volver a una situación de adelanto entre las curvas percentiles XSV10 y XSV30 en el

periodo de control $t=10$. Esto significa que el proyecto se encuentra adelantado 0,48 unidades de tiempo respecto de la planificación inicial (realizada según metodología PERT) en el periodo de control. Además este adelanto producido se encuentra próximo al XSV30 de los proyectos simulados, es decir, únicamente el 30% de los proyectos simulados ha tenido ese tiempo de adelanto o superior, en ese punto.

En cuanto al coste, la curva se desarrolla muy próxima al valor planificado hasta la mitad de la ejecución del proyecto, existiendo un ligero sobrecoste en el periodo de control 10, situándose la curva entre el valor planificado (PV_{PERT}) y el valor XCV50. Para el $t=10$ el sobrecoste acumulado es de 285,75 unidades monetarias.

Estos valores obtenidos, tanto de sobrecoste como de tiempo de adelanto, los habríamos obtenido también, en el periodo de ejecución $t=10$, con la metodología EVM. El dato de coste se hubiera calculado con la varianza en coste CV y el dato de tiempo con la Varianza en Programación Ganada SV(t). Son valores absolutos que hubiéramos podido trasladar directamente a nuestro gráfico de control de varianzas de la terna.

Realizamos el mismo ejercicio con la red cuyas actividades hemos programado según función de distribución exponencial.

En fase de planificación utilizamos simulación de Monte Carlo para obtener las curvas percentiles y los gráficos de control estadístico específicos para dicha red.

Durante la etapa de ejecución del proyecto, suponemos que el proyecto se encuentra en el periodo $t=15$ de ejecución. Para ese periodo de tiempo, AC=10240 uds monetarias.

Si hemos calculado el Valor Ganado en $t=15$ y hemos obtenido EV=7710, sabiendo que BAC=10280, podemos calcular el porcentaje de ejecución en coste en el instante actual de ejecución, $x\% = EV/BAC * 100 = 75\%$.

Introducimos los datos de nuestro proyecto en ejecución dentro de las gráficas de control estadístico del proyecto (Figura 6-25).

Una vez que disponemos de los datos periodo de control ($t=15$), coste actual (AC=10240) y porcentaje de ejecución del proyecto en el periodo de control ($\%=75\%$), podemos representar en la gráfica triad (figura 6-25a), en la proyección de coste (figura 6-25b) y en la proyección de tiempo (figura 6-25c) el

punto de control y comparar con los valores percentiles extraídos en fase de planificación utilizando simulación de Monte Carlo.

En las proyecciones de tiempo observamos que el proyecto se encuentra muy próximo a la curva del percentil P_d90 , sin llegar a sobrepasarla. En la proyección de coste, el proyecto se está ejecutando entre las curvas P_c70 y P_c90 .

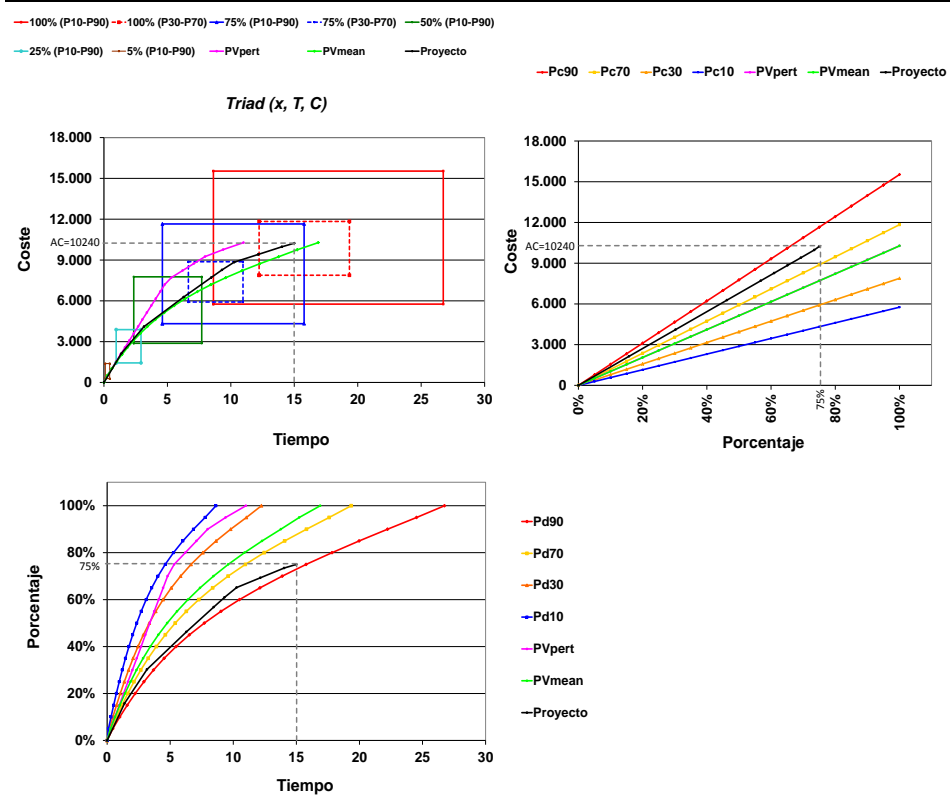


Figura 6-25 Triad y proyecciones de coste y tiempo. Actividades modeladas según función de distribución exponencial. Periodo de control $t=15$ ud. temporales

Representamos los gráficos de varianzas para nuestro instante de control $t=15$, para coste y plazo (Figura 6-26).

Podemos obtener los mismos resultados en las gráficas de varianzas que los representados en las proyecciones correspondientes. En ambos casos, para coste y programación, la curva de proyecto en ejecución se encuentra situada entre los percentiles $X_{SV}70$ y $X_{SV}90$ ($X_{CV}70$ y $X_{CV}90$ para coste). En estas gráficas podemos traducir al eje de ordenadas tanto el adelanto o retraso absoluto del

proyecto así como el sobrecoste o infracoste que tenga acumulado el proyecto en el periodo de control.

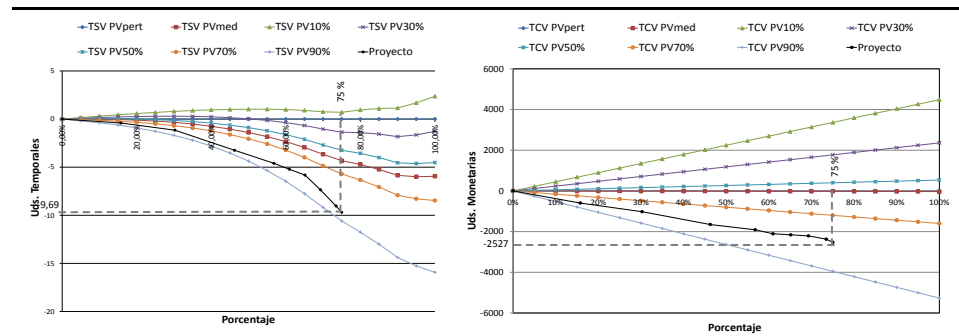


Figura 6-26 Varianza de tiempo XSV y de coste XCV. Actividades modeladas según función de distribución exponencial. Periodo de control $t=15$ ud. temporales

Una vez calculado y representado el gráfico de control de varianzas, para cada porcentaje de ejecución del proyecto, basta con trasladar los datos de Varianza en Coste y Varianza de Programación Ganada, correspondientes a la metodología de Valor Ganado para poder controlar el proyecto.

6.4 Comparación de metodologías de seguimiento y control de proyectos con incertidumbre

Monitorizar y controlar el proyecto es el proceso de dar seguimiento, revisar e informar del avance del proyecto a fin de cumplir los objetivos de desempeño definidos en la etapa de planificación (Project Management Institute, 2013).

Esta tarea, que se realiza a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto, permite a los Directores de Proyecto revisar las medidas adoptadas y establecer proyecciones de futuro en cuanto a alcance, plazos y costes.

Una vez identificadas las áreas que requieren una atención especial, se adoptarán las acciones preventivas o correctivas que se estimen necesarias para resolver los problemas.

Un sistema efectivo de seguimiento y control debe definir claramente las estrategias de monitorización (cuándo y cómo monitorizar) y las estrategias de

intervención (cuándo y cómo intervenir). La variable más decisiva para concretar estas estrategias es la frecuencia y la cantidad de actividades de seguimiento y control (Hazir & Schmidt, 2013).

A lo largo de los capítulos anteriores hemos realizado un recorrido por distintas metodologías de seguimiento y control de proyectos, partiendo de la metodología tradicionalmente más utilizada por los investigadores (EVM) hasta otras nuevas metodologías que incorporan incertidumbre en su proceso.

Tradicionalmente se ha utilizado la metodología del Valor Ganado para realizar el seguimiento de los proyectos, en programación y costes. Esta metodología tiene sentido bajo la hipótesis de entorno determinista, con información completa de las actividades. Sin embargo, durante la ejecución del proyecto, la incertidumbre y la variabilidad son hechos comunes en todas las actividades reales de los proyectos (Pajares & López-Paredes, 2011).

La incertidumbre (para plazo y coste) es un aspecto importante en proyectos complejos. Existe incertidumbre procedente de la tecnología, productividad, recursos humanos, condiciones económicas y otros riesgos y eventos (Khodakarami & Abdi, 2014).

S. Ward & Chapman (2003) establecen distintas áreas donde pueden aparecer incertidumbres en el ciclo de vida del proyecto. Jaafari (2006) redacta un listado de posibles incertidumbres que pueden aparecer en los proyectos de envergadura.

En general, la incertidumbre ocurre por distintas razones, que puede ser por realizar proyectos únicos (sin experiencia), por la variabilidad existente en la medida de costes, plazo y calidad, o por la ambigüedad del proyecto, por falta de claridad, de datos,... (Khodakarami & Abdi, 2014).

Es por esto que, recientemente, varios autores comienzan a tener en cuenta la incertidumbre de las actividades para realizar el seguimiento y control de proyectos (véase (Hazir & Schmidt, 2013), (Pajares & López-Paredes, 2011), (Vanhoucke, 2012), (Aliverdi et al., 2013), (Acebes et al., 2013a, 2014a)).

Acebes, Pajares, Galán, & López-Paredes (2014c) presentan un trabajo cuyo objetivo es realizar el seguimiento y control de un proyecto modelo utilizando la metodología EVM y se compara con dos metodologías que incorporan

incertidumbre en las actividades, para exponer las ventajas e inconvenientes de cada una de las metodologías mostradas.

Para ello representamos las gráficas de control que ofrece cada metodología, realizamos una comparación entre ellas y comprobamos cuál de ellas puede ser la más útil para que el Director de Proyecto pueda realizar el seguimiento y control de su proyecto de manera eficaz.

Las metodologías que se han comparado frente a EVM son las propuestas por Pajares & López-Paredes (2011) y la propuesta por Acebes et al. (2014a).

Para realizar la comparación entre las distintas metodologías de seguimiento y control de proyectos y poder representar las gráficas resultantes de cada una de ellas, se ha utilizado el modelo de proyecto utilizado por Lambrechts et al. (2008) en sus trabajos de investigación.

La duración de las actividades ha sido modelada como función de distribución de probabilidad normal. Podría haber sido elegida cualquier otro tipo de distribución, según el comportamiento que siga la actividad, por ejemplo beta, triangular, uniforme,... Igualmente, se han considerado actividades independientes pero podrían haber sido consideradas correlaciones entre las actividades del proyecto.

En cuanto a los resultados obtenidos, el control de la programación del proyecto con metodología EVM se completa utilizando la Programación Ganada (ES).

Se representan cuatro ejemplos de ejecución de proyecto. En el primero de ellos el proyecto se ejecuta según la planificación prevista, el segundo ejemplo de proyecto se corresponde con un proyecto que retrasa su ejecución respecto a la planificación inicial, el siguiente ejemplo que representamos se corresponde con un proyecto que parte de una situación de retraso según la planificación inicial pero que finalmente recupera el tiempo perdido y concluye según se había planificado, y por último, un proyecto que parte con una situación de adelanto respecto de la planificación inicial pero que finaliza con retraso.

6.4.1 Proyecto ejecutado según su planificación

En un proyecto ejecutado en todo periodo de tiempo según la curva de valor planificado, cumpliendo con la definición de la metodología de Valor Ganado, las curvas de PV, AC y EV son coincidentes (Figura 6-27).

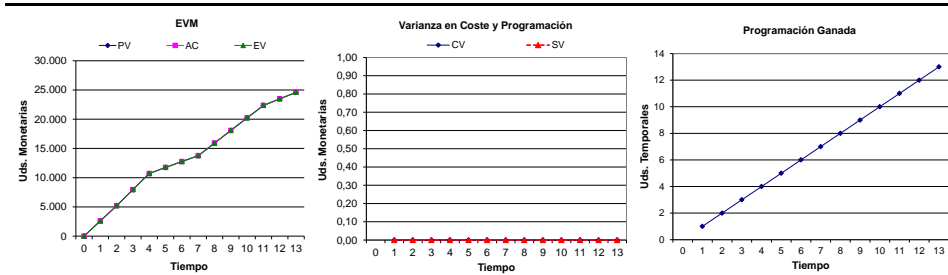


Figura 6-27 Gráficas metodología del Valor Ganado. Proyecto ejecutado según planificación

De esta manera, tanto la curva CV como la curva SV coinciden con el eje de abscisas y, por último, la curva de Programación Ganada es una recta donde los valores de abscisas coinciden con los valores de ordenadas.

Aplicando metodología CCoI/SCoI, para proyecto ejecutado según planificación, los valores de CCoI y SCoI, coinciden en cada periodo con la curva del ACBf y ASBf, respectivamente (Figura 6-28).

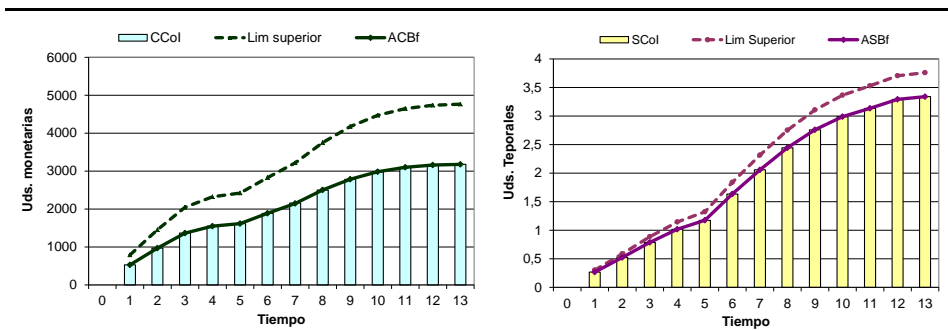


Figura 6-28 Metodología CCoI / SCoI. Proyecto ejecutado según planificación

Por último, aplicando metodología Triad (Figura 6-29), la curva de ejecución de proyecto coincide con la curva de valor planificado, en cualquiera de las gráficas (triad y proyecciones de tiempo y coste).

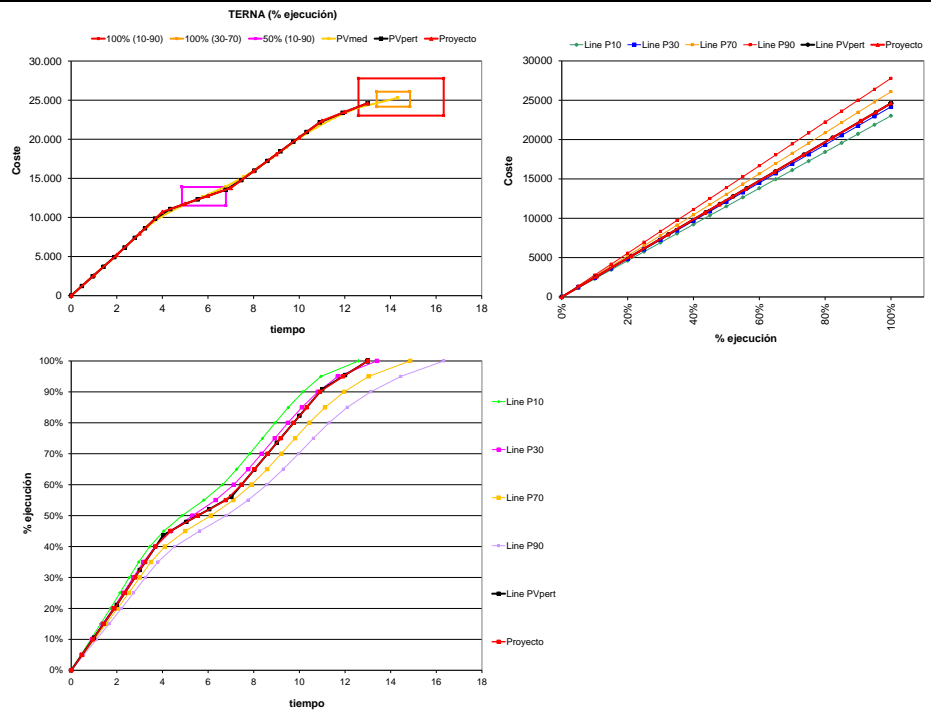


Figura 6-29 Metodología Triad. Proyecto ejecutado según planificación

Si nos fijamos en las gráficas de varianzas (Figura 6-30), la curva de ejecución del proyecto coincide con el eje de abscisas (que coincide con la curva PV).

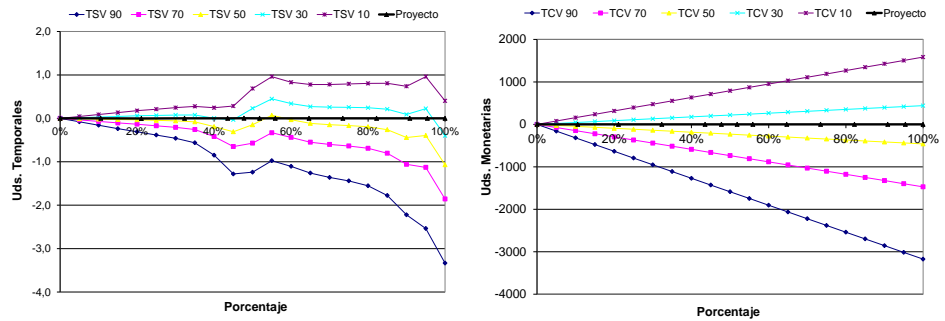


Figura 6-30 Varianzas tiempo y coste (XSV / XCV). Proyecto ejecutado según planificación

6.4.2 Proyecto ejecutado con retraso respecto de su planificación

En la Figura 6-31 representamos las gráficas resultantes de aplicar metodología de Valor Ganado a un proyecto que sufre un retraso en su ejecución respecto de lo que inicialmente se había planificado.

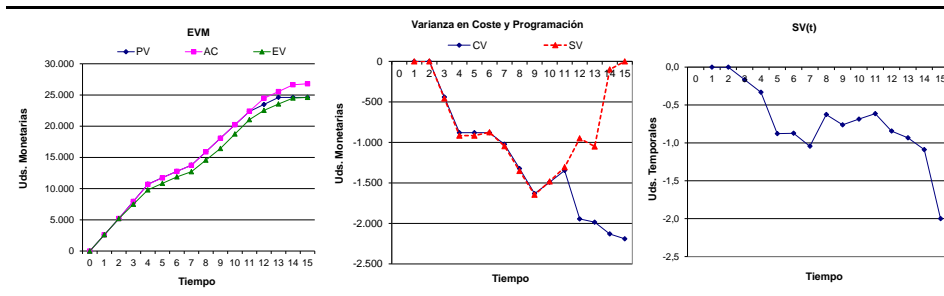


Figura 6-31 Gráficas metodología del Valor Ganado. Proyecto ejecutado con retraso respecto de su planificación

En el ejemplo propuesto, a pesar de obtener el resultado del retraso del proyecto en cada periodo de tiempo, EVM no incorpora incertidumbre por lo que no sabemos si el retraso obtenido es mucho o poco, ni si está dentro del retraso que podríamos esperar debido a la incertidumbre de las actividades. No podemos fijar un margen de tolerancia o *buffer* de control en el proyecto a la hora de realizar el seguimiento.

Si utilizamos la metodología SCoI/CCoI, se ha elegido como margen de confianza o *buffer* de control el margen entre el 10% y el 90% (para costes y para programación) (Figura 6-32).

Si el Director quisiera ser más riguroso y ejercer un control más preciso sobre el proyecto y decidiese elegir unos márgenes más estrechos (por ejemplo 25% y 75%), deberíamos rehacer los cálculos de nuestro gráfico de control y de los índices, obteniendo unas nuevas curvas de control (ACBf y SCBf) y unos nuevos índices (CCoI y SCoI).

En este caso, esta metodología nos ofrece la posibilidad de controlar el proyecto en un entorno con incertidumbre. Una vez fijado el *buffer* de control, podemos realizar el seguimiento del proyecto en cada periodo de tiempo, observando su evolución.

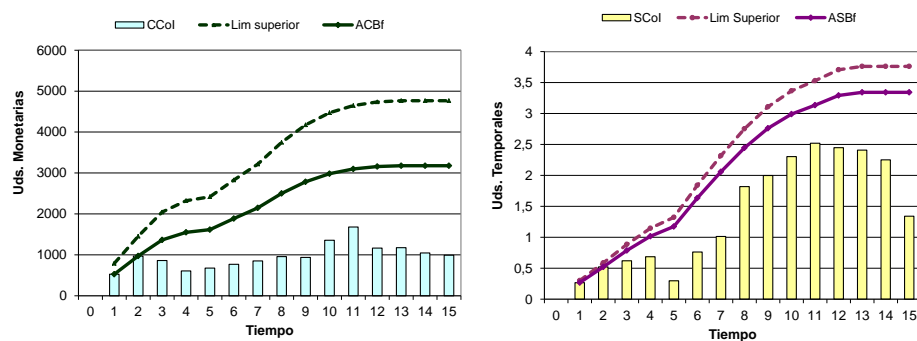


Figura 6-32 Metodología CCoI / SCoI. Proyecto ejecutado con retraso respecto de su planificación

No obstante, esta metodología debe ir acompañada de la metodología EVM, tanto para realizar el cálculo de los índices, como para saber el valor absoluto del adelanto/retraso (infracoste/sobrecoste) del proyecto, ya que los índices SCoI/CCoI por sí solos no nos proporcionan esos datos absolutos y necesitamos la representación de las gráficas CV y SV(t) para obtenerlos.

Por último hemos utilizado, para el mismo modelo de proyecto y las mismas condiciones de simulación la metodología TRIAD (Figura 6-33).

Cuando representamos el proyecto real dentro del gráfico de control (que incluye las curvas percentiles), observaremos en todo momento sobre que percentil se encuentra la ejecución del mismo, tanto para costes como para programación. Al estar representados todos los percentiles, podremos saber si nuestro proyecto ha sobrepasado el margen de control prefijado inicialmente por el Director de Proyecto o incluso si el proyecto, aun encontrándose en zona de ejecución prevista según la incertidumbre de las actividades, pudiera acercarse peligrosamente a zona de riesgo y le permita al Director de Proyecto estar alerta para poder adoptar medidas correctivas. También nos permite cambiar el rigor de control por parte del Director de Proyecto durante la ejecución del proyecto ya que tenemos representado todos los posibles percentiles.

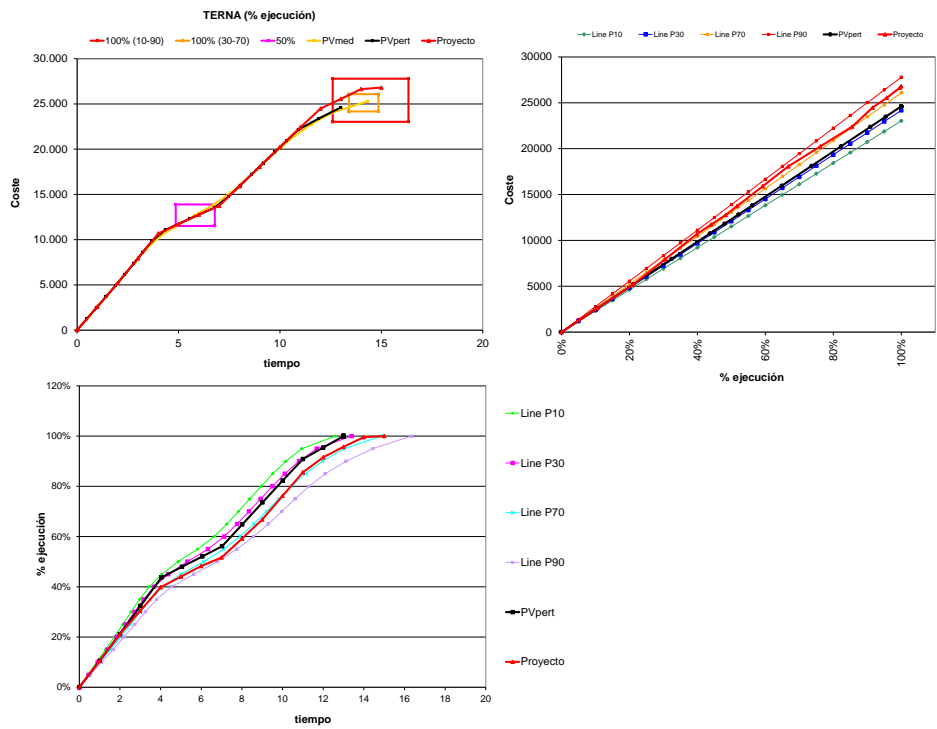


Figura 6-33 Metodología Triad. Proyecto ejecutado con retraso respecto de su planificación

Por otra parte, en las gráficas varianzas de tiempo y coste, los valores representados son absolutos, por lo que podemos determinar el adelanto/retraso y el infracoste/sobrecoste existente entre el proyecto en ejecución respecto de cualquiera de las restantes curvas.

Si además representamos las curvas de la varianza (TSV / TCV), es muy interesante observar como en la Figura 6-34, en los gráficos de tiempo (TSV y $SV(t)$), los valores de retraso del proyecto coinciden, por un lado ($SV(t)$) medidos en función del periodo de ejecución del proyecto y por otro lado (TSV) medidos en función del % de ejecución del proyecto.

Lo mismo sucede para las gráficas de coste (TCV y CV), donde se llega a los mismos resultados en cuanto a valores absolutos de sobrecoste (Figura 6-35). Cada vértice de la curva de proyecto en ejecución de las gráficas TSV y TCV se corresponde con un periodo de ejecución del proyecto.

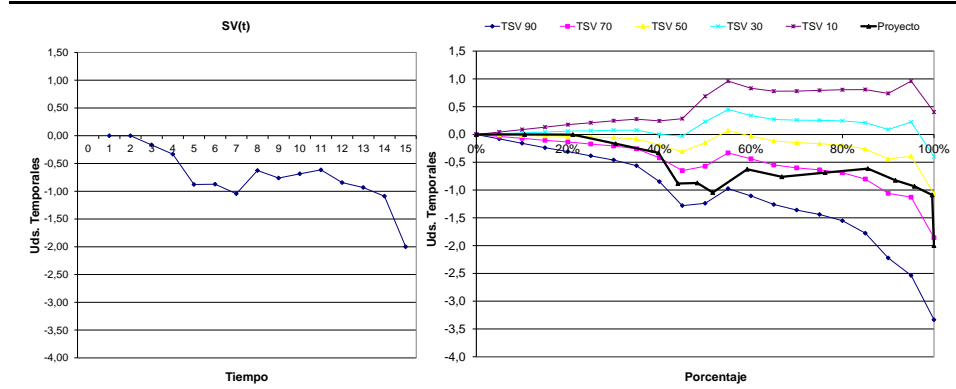


Figura 6-34 SV(t) frente a XSV. Proyecto ejecutado con retraso respecto de su planificación

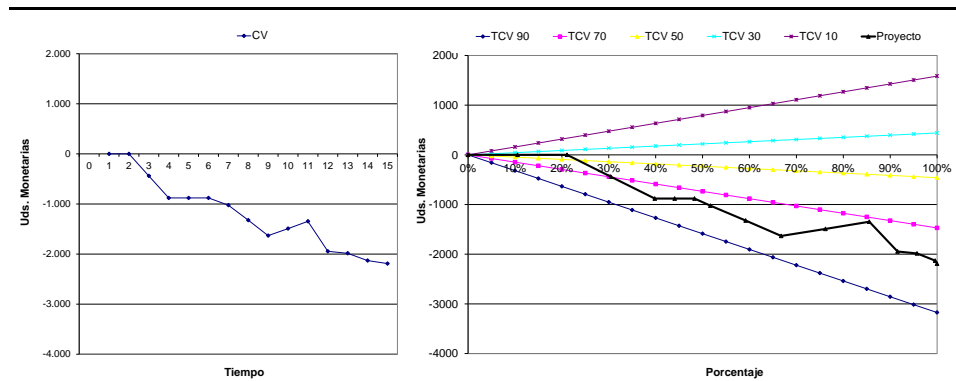


Figura 6-35 CV frente a XCV. Proyecto ejecutado con retraso respecto de su planificación

6.4.3 Proyecto que comienza con retraso y finaliza según planificación

En el gráfico de Valor Ganado se observa claramente cómo el coste real es muy superior al coste planificado (Figura 6-36). También se observa cómo se iguala siempre el valor planificado con el Valor Ganado, a la finalización del proyecto.

En la curva de varianzas, se comprueba como la curva de varianza en programación finaliza en 0. Esto ocurre siempre así, por definición, ya que hemos indicado que el valor planificado y el Valor Ganado se igualan. En este caso, no obstante, el proyecto finaliza según su planificación y esto queda

reflejado en la curva de Varianza de Programación Ganada, donde la curva finaliza en el periodo 13, con un valor de 0.

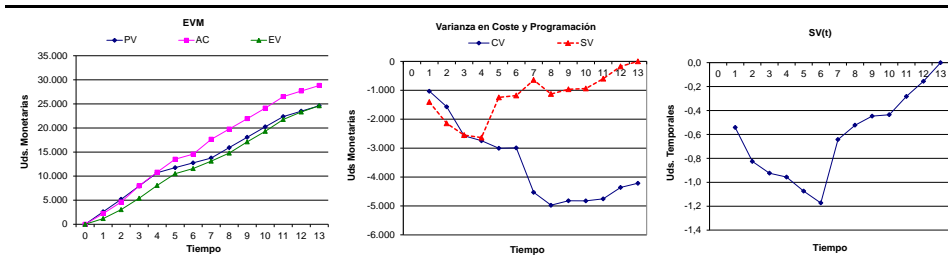


Figura 6-36 Gráficas metodología del Valor Ganado. Proyecto que comienza con retraso y finaliza según planificación

Las curvas de CCoI/SCoI incorporan incertidumbre. En el gráfico CCoI observamos que el coste del proyecto es superior a lo esperado según la incertidumbre de las actividades, siendo superior al margen de percentil 90% que habíamos fijado como límite de control (Figura 6-37). Esta situación se mantiene desde el inicio del proyecto hasta su finalización, a pesar de que finalice en la fecha planificada.

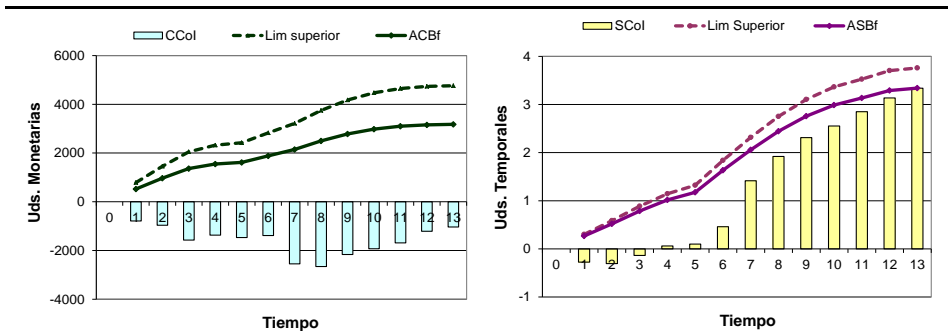


Figura 6-37 Metodología CCoI / SCoI. Proyecto que comienza con retraso y finaliza según planificación

En la gráfica de SCoI, comienza el proyecto con un retraso superior a la variabilidad esperada, respecto del margen de confianza fijado por el P90. A partir del periodo 4, el proyecto sigue con retraso, aunque dentro de los márgenes de variabilidad esperados, para finalizar en el plazo previsto.

Similar resultado podemos observar en las gráficas Triad, especialmente en las proyecciones de Coste y Tiempo (Figura 6-38). En la gráfica de coste

observamos como la curva del proyecto en ejecución es superior a la curva de control del percentil P90. Existe un sobrecoste muy por encima de la variabilidad esperada.

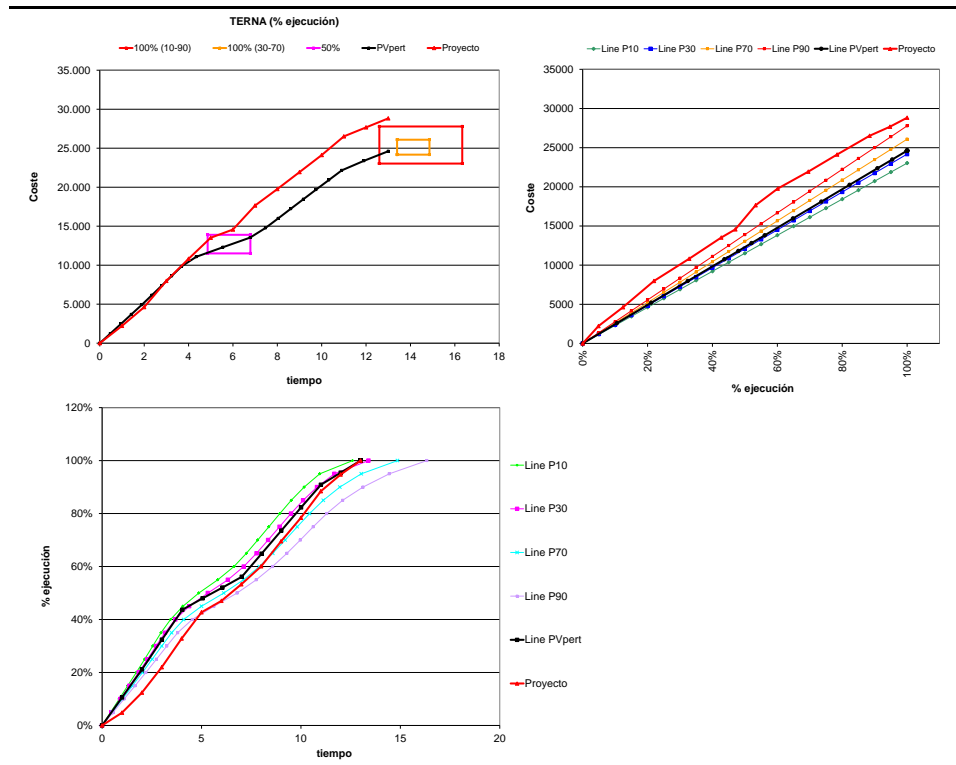


Figura 6-38 Metodología Triad. Proyecto que comienza con retraso y finaliza según planificación

En cuanto a la curva de proyección de tiempo, el proyecto parte con una situación de retraso superior a la variabilidad indicada por la curva percentil P90 pero se recupera según avanza el proyecto, para finalizar según estaba planificado inicialmente, por encima de la curva percentil P30.

Podemos observar la evolución del proyecto más claramente en las curvas de varianzas (Figura 6-39).

En el gráfico de programación observamos la evolución del proyecto pasando desde una situación de retraso por encima de la variabilidad marcada por el P90 hasta concluir según la planificación, coincidiendo la curva de ejecución del proyecto con el eje de abscisas (curva planificación) en el 100% de ejecución del

proyecto (proyecto finalizado). Se observa cómo se va retrasando progresivamente el proyecto y como, cambia de tendencia para adquirir una tendencia de adelanto, recuperando el tiempo perdido.

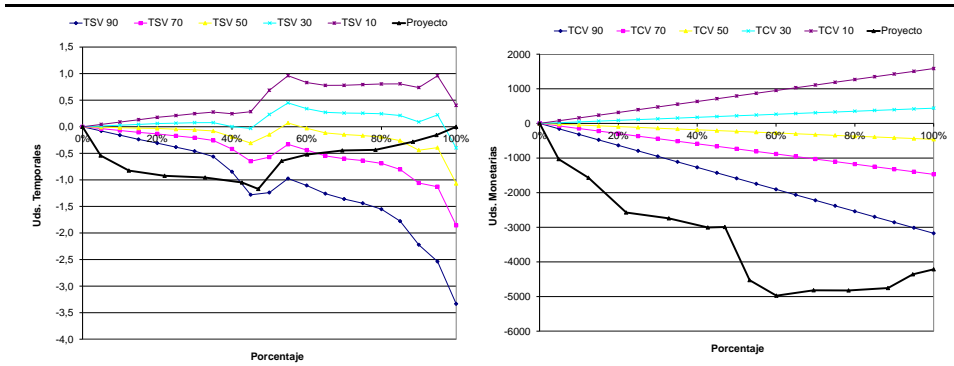


Figura 6-39 Varianzas tiempo y coste (XSV / XCV). Proyecto que comienza con retraso y finaliza según planificación

6.4.4 Proyecto que comienza con adelanto respecto de su planificación y que finaliza con retraso

En las gráficas de Valor Ganado observamos como a la finalización del proyecto, el coste AC es superior al PV (Figura 6-40). Esto se traduce en la curva de varianzas de coste con un sobrecoste de unas 4000 uds monetarias respecto de lo planificado.

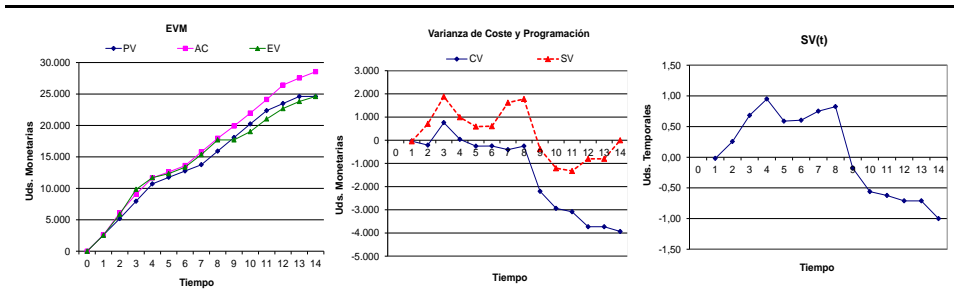


Figura 6-40 Gráficas metodología del Valor Ganado. Proyecto que comienza con adelanto respecto de su planificación y que finaliza con retraso

La varianza en programación termina con valor nulo en el periodo $t=14$. Si observamos la gráfica de Varianza de Programación Ganada, comprobamos como el retraso acumulado final del proyecto es de 1 periodo de tiempo.

Hemos supuesto que en el periodo de tiempo $t=8$ el proyecto se retrasa una unidad temporal (por ejemplo un día de huelga, una jornada de trabajo perdida,...). No hay avance material en el proyecto, aunque se contabilizan los costes fijos correspondientes a esa jornada. En la gráfica de Valor Ganado esta situación se refleja con una línea horizontal entre los periodos $t=8$ y $t=9$. Esto es así ya que el Valor Ganado permanece constante en los periodos citados, ya que el trabajo ejecutado en dicho periodo ha sido nulo.

En la gráfica $SV(t)$ observamos un descenso brusco en la gráfica en el periodo $t=8$ hasta $t=9$, con un valor negativo de 1 ud temporal. Esto se corresponde con esa jornada de trabajo perdida sin producir.

En las gráficas de la metodología CCoI/SCoI, si nos fijamos en el coste, observamos un ahorro en el coste del proyecto en los periodos iniciales, que se igualan con los planificados para periodos sucesivos y que, a partir del periodo $t=8$ desciende bruscamente (Figura 6-41). Posteriormente, se obtienen sobrecostes ligeramente por encima de lo esperado, según la variabilidad que aportan las actividades del proyecto.

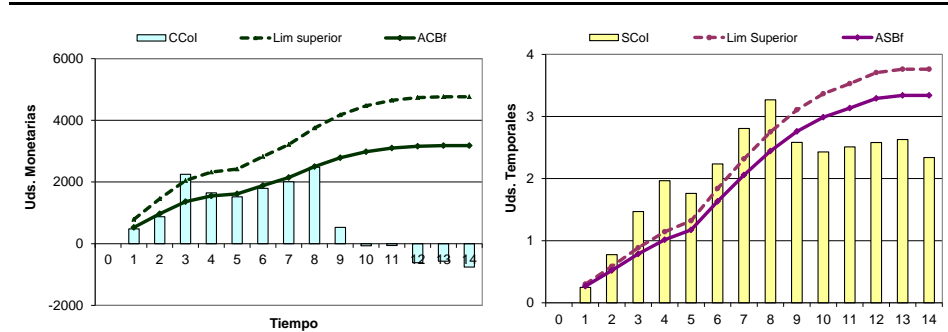


Figura 6-41 Metodología CCoI / SCoI. Proyecto que comienza con adelanto respecto de su planificación y que finaliza con retraso

En cuanto al plazo, la tendencia inicial es de ahorro de tiempo por encima de lo previsto, según la incertidumbre de las actividades. A partir del periodo $t=8$, se pasa a un proyecto ejecutado con ligero retraso sobre la planificación inicial, dentro de la variabilidad esperada. Esta situación se mantiene hasta la finalización del proyecto.

En la gráfica de la terna y de sus proyecciones de coste y tiempo podemos observar la evolución del proyecto desde el inicio del mismo, con un adelanto por encima de la curva P10 hasta que el proyecto concluye, con un retraso que se establece muy próximo a la curva P50 (Figura 6-42).

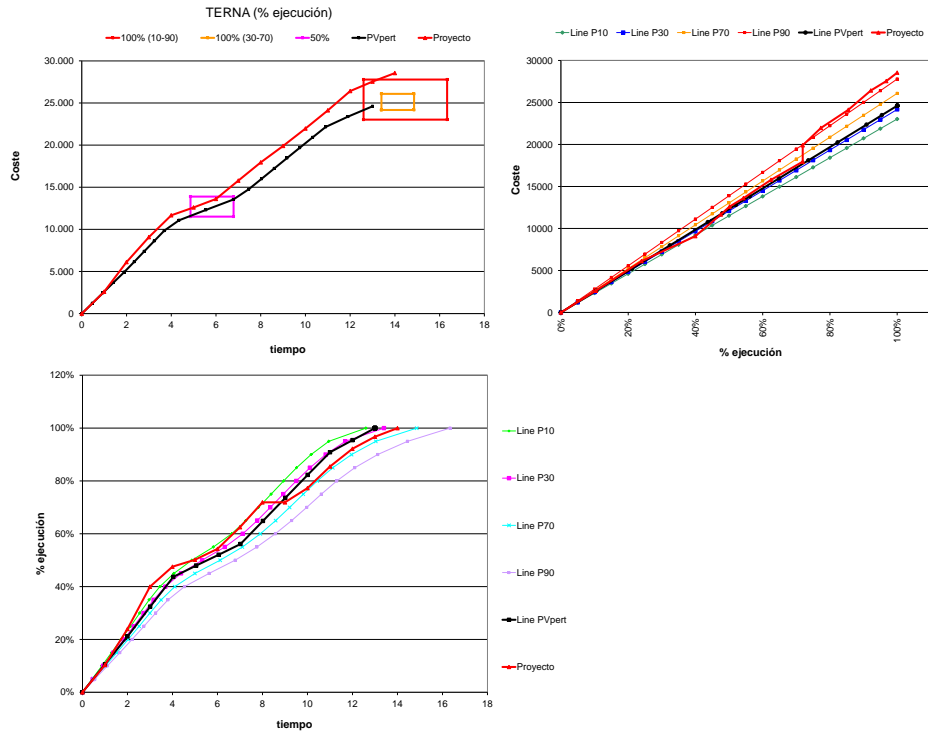


Figura 6-42 Metodología Triad. Proyecto que comienza con adelanto respecto de su planificación y que finaliza con retraso

En la proyección de tiempo observamos el mismo efecto que se producía en la gráfica de Valor Ganado. Entre el $t=8$ y $t=9$, la gráfica de ejecución del proyecto es constante, no hay avance en el proyecto. En este caso en el eje de ordenadas representamos el grado de ejecución del proyecto ($x\%$) y vemos que se mantiene constante. Si no hay ejecución del proyecto, en ese periodo de tiempo no ha habido avance, por lo que $x\%$ es constante.

En la gráfica de coste observamos que se produce un aumento de coste, para un determinado porcentaje de ejecución del proyecto. En este caso para $x=71,91\%$ de ejecución del proyecto la curva pasa de tener un coste de 17954 a

tener un coste de 19903. Este porcentaje de ejecución se corresponde con el periodo $t=8$ y $t=9$. Al no haber habido ejecución en ese periodo de tiempo, el valor x permanece constante. Pero el coste ha aumentado en unas unidades monetarias que se corresponderán con costes fijos, al no haber habido producción (según nuestra suposición).

De forma similar lo observamos en la gráfica de varianzas (Figura 6-43).

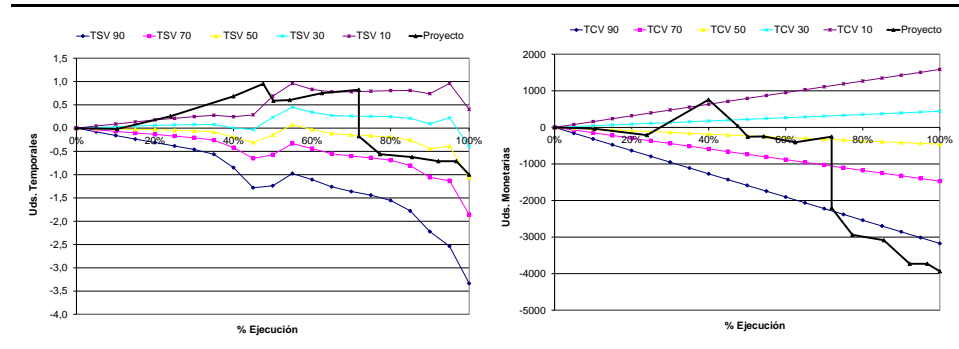


Figura 6-43 Varianzas tiempo y coste (XSV / XCV). Proyecto que comienza con adelanto respecto de su planificación y que finaliza con retraso

En la gráfica TSV comprobamos como la curva parte de una situación de adelanto por encima de la curva TSV 10, es decir, por encima de la variabilidad esperada para el 10% de los proyectos. Básicamente se mantiene en esa situación hasta el porcentaje de ejecución $x=71.91\%$ donde se produce un descenso vertical, manteniendo constante el $x\%$, y alcanzando un valor negativo de -0.18 unidades temporales, próximo a la curva de percentil P50. El proyecto sigue retrasándose ligeramente hasta concluir con 1 periodo de retraso respecto de lo planificado.

En cuanto a los costes, observamos que inicialmente el proyecto se ejecuta por situaciones de infracoste en periodos iniciales, ligeros sobrecostes en instantes intermedios para concluir con sobrecostes, por encima de la curva P90 en la finalización del proyecto. Cada vértice de la curva se corresponde con un periodo de control del proyecto.

Si el porcentaje de ejecución del proyecto ($x\%$, en el eje de abscisas) es elevado entre periodo de control y siguiente periodo de control, significa que el proyecto ha avanzado en ese periodo de tiempo. Si, por el contrario, el porcentaje $x\%$

entre dos puntos sucesivos de control es pequeño, significa que el proyecto ha avanzado poco.

Si observamos tramos de curva muy verticales (por ejemplo descendentes) significa que, entre dos periodos de ejecución, el proyecto se ha retrasado considerablemente (viceversa si la curva es ascendente). Lo mismo podríamos indicar para el coste.

Si, al contrario, entre dos puntos sucesivos de control, la curva se mantiene horizontal, el proyecto se ha mantenido constante durante ese periodo de control, en cuanto a adelanto o retraso (infracoste / sobrecoste), según se encontrase en la situación inicial.

Representamos conjuntamente las gráficas SV(t) y TSV (Figura 6-44). Volvemos a comprobar como el valor del eje de ordenadas, que representa el tiempo de adelanto/retraso del proyecto, en ambas gráficas coincide.

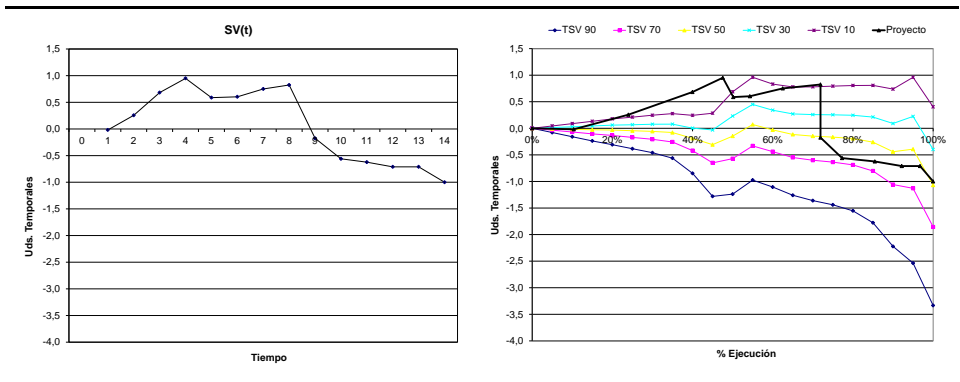


Figura 6-44 SV(t) frente a XSV. Proyecto que comienza con adelanto respecto de su planificación y que finaliza con retraso

Las dos gráficas tienen ejes de abscisas distinto ya que la magnitud del eje de abscisas de la gráfica SV(t) es el tiempo, mientras que en la gráfica TSV la magnitud es x% (porcentaje de ejecución del proyecto)

Representamos igualmente las gráficas CV y TCV en la figura 6-45. Es interesante observar también como se produce el avance en la ejecución del proyecto. Se produce un gran avance en los primeros periodos de ejecución (el 50% de ejecución en los 5 primeros periodos de tiempo), mientras que a partir de ese periodo, la ejecución es más lenta, finalizando el proyecto con retraso y, en este caso, con sobrecoste.

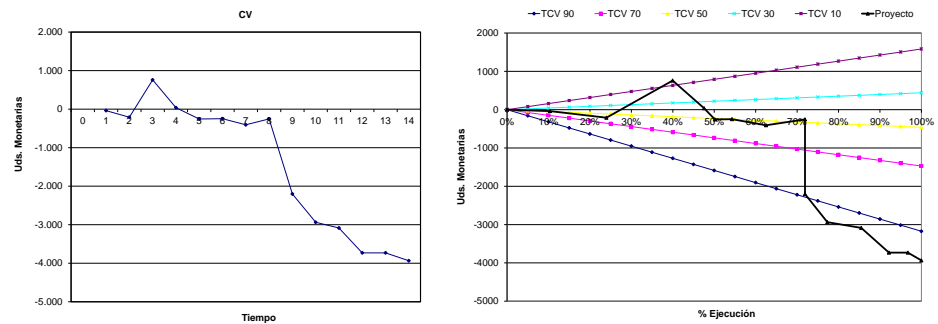


Figura 6-45 CV(t) frente a XCV. Proyecto que comienza con adelanto respecto de su planificación y que finaliza con retraso

Una vez realizados los cálculos de la gráfica de control, tanto de plazo (TSV) como de coste (TCV), podemos utilizar los datos de la metodología de Valor Ganado (CV y SV(t), respectivamente), para realizar el control del proyecto. Simplemente tenemos que tener en cuenta el porcentaje de ejecución de proyecto ($x\%$) en el que se encuentra el proyecto ($x\% = EV/BAC$).

Una vez representados los resultados gráficos que proporcionan cada una de las metodologías utilizadas, podemos llegar a la conclusión de que la metodología Triad propuesta por (Acebes et al. 2014a) es la más completa y potente de las utilizadas.

La primera razón es debido a que incorpora en su análisis el riesgo del proyecto, traducido en forma de incertidumbre en la duración de las actividades. Con esto permite al Director de Proyecto fijar un margen de confianza para realizar el seguimiento y control del proyecto, en base al rigor y precisión con el que quiera realizar el control antes de llegar a adoptar medidas correctivas sobre el proyecto.

Además de ello, permite obtener los valores absolutos de desvío del proyecto ejecutado, tanto en coste como en plazo con respecto a la planificación inicial así como con respecto a cualquiera de las curvas de control que fije como guía.

Finalmente, indicar que el esfuerzo necesario para la utilización de esta metodología no es superior al necesario si se utiliza la metodología EVM. Simplemente es necesario un conocimiento básico sobre simulación de Monte Carlo y conocimientos básicos estadísticos de los procesos y actividades.



7

Conclusiones



7 Conclusiones

El hilo conductor de esta investigación ha sido desarrollar un marco metodológico para integrar la incertidumbre existente en toda actividad que forma parte del proyecto dentro del control del plazo y del coste del proyecto.

En el conjunto de este trabajo:

- **Se ha implementado un marco gráfico de control para realizar el seguimiento y control del proyecto, en el cual hemos integrado la representación de los indicadores SCoI y CCoI.**

En una primera fase de la investigación, hemos utilizado los índices de control propuestos por Pajares y López-Paredes y a partir de los mismos hemos propuesto un entorno gráfico simple para el control del proyecto.

- **Hemos validado y verificado la robustez de la metodología SCoI y CCoI.**

Utilizando una red modelo de proyecto, hemos simulado distintos supuestos para comprobar si los indicadores se comportan como deberían en cada una de los casos. Pretendemos con este estudio facilitar a los directores de proyectos la toma de decisiones conforme sea la evolución de sus proyectos, de manera que gráficamente puedan observar si dicho proyecto se encuentra dentro de los márgenes de variabilidad estimados o si se encuentra fuera de estos límites, tanto por retraso como por adelanto.

Para ello hemos definido las posibles situaciones en las que podemos encontrar nuestro proyecto en cada instante de tiempo. Representando el indicador en el gráfico de control, nos ayudará a deducir en cuales de las posibles situaciones nos encontramos y con qué variabilidad, alertándonos de si se han producido cambios profundos que pueden poner en peligro el buen desarrollo del proyecto, para adoptar, si procede, medidas correctivas encaminadas a reconducir el proyecto.

- **Hemos perfeccionado el marco gráfico de control, adecuándolo a la posible forma asimétrica de la función de distribución de salida del proyecto.**

En este marco gráfico hemos representado dos nuevas medidas: el *buffer* máximo acumulado y la suma del *buffer* mínimo acumulado y el búfer máximo acumulado, que serán calculadas en la etapa de planificación. Incorporamos a este gráfico, para cada periodo de tiempo de control, la representación del valor calculado de cada uno de los índices, de tal manera que, con estas nuevas medidas, el director del proyecto puede determinar gráficamente si el proyecto se retrasa o no y si la salida de los valores previstos permanece dentro de la variabilidad esperada o prevista (se aplica un razonamiento similar al coste).

Si los índices de control superan los valores permitidos, deben tomarse medidas correctivas con el fin de impulsar el proyecto de control. Si se logra una buena ejecución del proyecto, la metodología alerta al director del proyecto acerca de las posibilidades de mejora.

El gráfico de control utiliza información extraída del análisis EVM, pero además integra análisis de riesgo y el concepto de variabilidad del proyecto planificado. Es una metodología simple, ya que no necesitamos más datos que los datos que utilizamos para realizar análisis EVM, a los que añadimos simulación de Monte Carlo.

No solo hemos conseguido desarrollar una metodología sencilla que permite determinar si el proyecto se encuentra en una situación de avance o retraso (infracoste o sobrecoste en el caso de hablar de gestión económica) sino que, además, nos permite identificar la magnitud de esa desviación.

- **Hemos desarrollado una nueva metodología de seguimiento y control de proyectos en entorno de incertidumbre, que hemos denominado Metodología Triad.**

Hemos aplicado simulación de Monte Carlo en cada uno de los periodos de ejecución del proyecto, además de hacerlo también en el instante final del mismo. Para ello hemos integrado la metodología EVM con toda la literatura referente a la variabilidad de la actividad y del proyecto.

Sabemos que EVM se desarrolló bajo condiciones de certeza, por lo tanto, los Directores de Proyectos saben si el proyecto se retrasa o se ejecuta antes de lo

previsto, o bien si los costes están por encima o por debajo de los costes previstos, según las comparaciones con los valores planificados. Pero cuando introducimos la incertidumbre dentro de los análisis, estamos más interesados en saber la magnitud de las desviaciones respecto del valor previsto (desde el punto de vista estadístico). De esta manera, los Directores de proyecto podrán saber si las desviaciones respecto de los valores planificados están o no acuerdo con las desviaciones asumidas por la variabilidad de las actividades y, por lo tanto, se deben tomar acciones correctivas tempranas.

Con el fin de implementar la metodología, no hemos necesitado más información que los datos utilizados para el uso de EVM, las funciones de distribución de probabilidad de las actividades (utilizadas por la mayoría de las metodologías de programación como PERT) y conocimientos básicos sobre simulación de Monte Carlo.

Durante la aplicación de esta metodología hemos ratificado como, al utilizar la metodología PERT para la programación del proyecto, las previsiones de plazo y coste final del proyecto son muy optimistas. Si el proyecto ha sido planificado utilizando programación PERT, desde el punto de vista estadístico, en la mayoría de los casos, la probabilidad de lograr el tiempo planificado conforme esta metodología es menor del 30%.

Aunque la Metodología Triad es una metodología nueva e innovadora, sólo hemos retrocedido a los fundamentos de las simulaciones de proyecto, ya que generamos el "universo" de todos los proyectos posibles, y sólo reorganizamos y ordenamos los datos simulados en un lenguaje coherente con la metodología de Valor Ganado.

- Hemos comparado las distintas metodologías de control de proyectos (EVM, SCoI/CCoI, Triad).

Para poder comprobar las prestaciones de la nueva metodología desarrollada, hemos realizado una comparación de varias metodologías de seguimiento y control de proyectos utilizando un mismo modelo de proyecto y un mismo supuesto de proyecto ejecutado.

Las metodologías utilizadas han sido, en primer lugar, la metodología del Valor Ganado, por su amplia y reconocida utilización por parte de los Directores de Proyecto. Debido a las limitaciones que presenta esta metodología, hemos

elegido otras dos metodologías para compararlas con la anterior, en este caso considerando la presencia de incertidumbre en las actividades que componen el proyecto.

Una vez representados los resultados gráficos que proporcionan cada una de las metodologías utilizadas, hemos llegado a la conclusión de que la metodología TRIAD es la más completa y potente de las utilizadas. La primera razón es debido a que incorpora en su análisis el riesgo del proyecto, traducido en forma de incertidumbre en la duración de las actividades. Con esto permite al Director de Proyecto fijar un margen de confianza para realizar el seguimiento y control del proyecto, en base al rigor y precisión con el que quiera realizar el control antes de llegar a adoptar medidas correctivas sobre el proyecto.

Además de ello, permite obtener los valores absolutos de desvío del proyecto ejecutado, tanto en coste como en plazo con respecto a la planificación inicial así como con respecto a cualquiera de las curvas de control que fije como guía.

Indicar que el esfuerzo necesario para la utilización de esta metodología no es superior al necesario si se utiliza la metodología EVM. Simplemente es necesario un conocimiento básico sobre simulación de Monte Carlo y conocimientos básicos estadísticos de los procesos y actividades.

- Hemos estudiado y modelado la línea base de riesgos. Hemos observado cuál es el impacto que la fecha de inicio del proyecto ejerce sobre la línea base de riesgos.

Aprovechando el estudio de la incertidumbre presente en las actividades del proyecto, hemos realizado un estudio paralelo, analizando la posible influencia que tendría sobre las actividades y sobre el proyecto total, la presencia de variabilidad manifestada en forma de incertidumbre estacional o temporal (que puede presentarse aleatoriamente en unos periodos de tiempo y en otros no).

La existencia de este tipo de riesgo estacional puede tener un impacto negativo en algunas de las actividades del proyecto. Hemos estudiado la variación en el nivel de riesgo del proyecto, y hemos representado a la variación de la SRB (Línea Base de Riesgo) del proyecto, dependiendo de la fecha de comienzo del proyecto.

El nivel del riesgo del proyecto, representado por el gráfico SRB, aumenta cuando la actividad afectada por la incertidumbre estacional se ejecuta total o

parcialmente en períodos con mayor probabilidad de que se produzca dicha incertidumbre.

Nuestros resultados muestran que proyectos que están sujetos a incertidumbres estacionales de cualquier tipo pueden impactar negativamente en el proyecto (en cuanto a los objetivos principales de plazo y/o coste). El estudio nos permite determinar la fecha de inicio del proyecto que presenta la menor probabilidad de que el proyecto sobrepase la fecha prevista de ejecución conforme a su planificación inicial.

- Hemos estudiado los indicadores de programación para la priorización de actividades del proyecto (criticidad, crucialidad, índice de sensibilidad) en función de fecha de inicio del proyecto, en presencia de incertidumbre estacional.

Al mismo tiempo que se ha estudiado la línea base de riesgos hemos analizado la contribución individual de las actividades al riesgo del proyecto, dependiendo de la fecha de inicio de este. Hemos realizado un análisis de sensibilidad calculado algunos de los índices de priorización más comunes utilizados en la literatura, como el Índice de Criticidad, Índice de Crucialidad y SSI. Hemos confirmado que el uso aislado de cualquiera de los índices no nos da la información completa de la gestión de riesgos. Nuestro análisis sugiere que algunos indicadores deben combinarse para entender la contribución individual de las actividades en términos de riesgo.

- Hemos estudiado los efectos que la criticidad y crucialidad tienen al realizar modificaciones en los parámetros de las actividades del proyecto.

Continuando con el estudio de la sensibilidad de las actividades que forman parte del proyecto hemos confirmado con un caso de estudio y aplicando simulación de Monte Carlo, que un análisis de los diferentes escenarios posibles para el desarrollo del proyecto puede ser muy útil para apoyar la toma de decisiones del Director de proyecto. Una vez que el modelo de proyecto está debidamente formalizado, se pueden identificar características específicas de las actividades en términos de Criticidad y Crucialidad. Esta información nos permite detectar las actividades clave que son determinantes en el desarrollo del proyecto y a las que los Directores de Proyecto deben prestar especial atención.

Hemos demostrado que modificando su duración prevista o reduciendo la variabilidad de su duración, se puede reducir la incertidumbre sobre la duración total del proyecto.

Además, hemos confirmado igualmente que en el caso anterior, que el Índice de Criticidad no es un indicador significativo completo para evaluar cómo una modificación de la duración de una actividad influye en la duración del proyecto total, por lo cual debemos apoyarnos en el Índice de Crucialidad que proporciona información complementaria útil.

- Hemos propuesto unos indicadores de coste para la priorización de actividades del proyecto.

Finalmente, hemos propuesto unos indicadores para poder priorizar actividades en función de la variación que sufre este parámetro en cada una de las actividades que forman un proyecto. A la vez, hemos analizado la variación que sufren los parámetros característicos del proyecto en función del coste. Este estudio de priorización de actividades en función del coste nos ayudará a tomar decisiones en aquellos proyectos en los que necesitemos tener controlado este parámetro y pueda ser independiente de la duración del proyecto.

7.1 Extensiones y líneas futuras

Esta investigación se ha centrado en el estudio de un marco gráfico de seguimiento y control de proyectos en entornos con incertidumbre. Hemos logrado crear un entorno gráfico donde poder representar los indicadores SCoI y CCoI de la Metodología propuesta por Pajares y López-Paredes. Avanzando un paso adelante, hemos diseñado una metodología basada en simulación de Monte Carlo con la que poder controlar y monitorizar los proyectos con incertidumbre de un modo más preciso y más completo, incluyendo en el mismo gráfico los distintos percentiles de control para nuestro proyecto.

No obstante, si queremos comparar nuestra investigación con la metodología EVM, que nos ha servido de guía durante todo este recorrido, podemos afirmar que falta por diseñar el último paso, que consiste en la implementación de una

metodología para la estimación de estados futuros del proyecto, teniendo en cuenta el estado y las condiciones presentes.

Consideramos necesario la creación de unos indicadores de predicción, tanto de coste como de plazo, que sean aplicables a entornos con incertidumbre, de igual manera que hemos podido crear el marco gráfico de control.

En la actualidad estamos trabajando en la obtención de estos indicadores, utilizando técnicas de aprendizaje estadístico (*Statistical Learning Techniques*).

Utilizando simulación de Monte Carlo, generamos multitud de proyectos compatibles con la definición y características de las actividades que lo componen. A partir de los datos extraídos en la simulación, el proyecto puede ser analizado como un problema de detección, clasificación y regresión. Aplicando estas técnicas estadísticas avanzadas conseguiremos obtener los indicadores de predicción buscados, para plazo y para coste.

Un avance muy importante en la investigación debería ser la posibilidad de poder incluir la metodología Triad dentro de un paquete informático de simulación de Monte Carlo, que al incluir la descripción de las actividades que forman el proyecto (duración, relación de coste, precedencias, incertidumbre,...), automáticamente nos genere el marco gráfico de control con las curvas percentiles propias de la metodología Triad.

Por supuesto, avanzando un poco más, sería muy deseable si, además, el paquete informático generase las distintas estimaciones futuras de coste y plazo a la conclusión del proyecto.

Finalmente, es nuestro deseo que este trabajo constituya un punto y seguido en las investigaciones sobre la incertidumbre de las actividades en los proyectos, cómo afectan a los resultados finales del proyecto, cómo pueden manejarse y cómo podemos utilizar las herramientas descritas para que los Directores de Proyecto puedan ejecutar sus proyectos cumpliendo los objetivos que tengan establecidos.

Bibliografía

- Abba, W., & Niel, F. A. (2010). *Integrating technical performance measurement with Earned Value Management*. *The Measurable News*, 4, 6–8.
- Acebes, F., Pajares, J., Galán, J. M., & López-Paredes, A. (2013a). *Beyond Earned Value Management: A Graphical Framework for Integrated Cost, Schedule and Risk Monitoring*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 74, 231–239.
- Acebes, F., Pajares, J., Galán, J. M., & López-Paredes, A. (2013b). *Exploring the Relations between Project Duration and Activity Duration*. In XVII International Congress on Project Management and Engineering. *Logroño: AEIPRO*.
- Acebes, F., Pajares, J., Galán, J. M., & López-Paredes, A. (2014a). *A new approach for project control under uncertainty. Going back to the basics*. *International Journal of Project Management*, 32, 423–434.
- Acebes, F., Pajares, J., Galán, J. M., & López-Paredes, A. (2014b). *Exploring the Influence of Seasonal Uncertainty in Project Risk Management*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 119, 329–338.
- Acebes, F., Pajares, J., Galán, J. M., & López-Paredes, A. (2014c). *Monitorización y Control de proyectos utilizando metodología de Valor Ganado y simulación de Monte Carlo*. In XVIII International Congress on Project Management and Engineering. *Alcañiz (Teruel)*.
- Acebes, F., Pajares, J., & López-Paredes, A. (2010a). *Estudio del Schedule Control Index para el control integrado de plazo en proyectos*. In XIV International Congress on Project Management and Engineering. *Madrid - España*.
- Acebes, F., Pajares, J., & López-Paredes, A. (2010b). *Estudio del SCoI para el control integrado del plazo en los proyectos*. In XIV International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. *San Sebastián - España*.
- Acebes, F., Pajares, J., & López-Paredes, A. (2010c). *Integrating Risk within the Cost-Schedule integrated project control system*. In 2nd International Construction and Engineering Project Management Workshop (pp. 111–124). *Valladolid - España*.
- Acebes, F., Pajares, J., & López-Paredes, A. (2011a). *Influencia del Riesgo Estacional en la Línea Base de Riesgos del Proyecto*. In XV International Conference on

- Industrial Engineering and Industrial Management. *Cartagena (Murcia) - España.*
- Acebes, F., Pajares, J., & López-Paredes, A. (2011b). *Integración del riesgo estacional a la incertidumbre en los proyectos.* In XV International Congress on Project Management and Engineering. *Huesca - España.*
- Acebes, F., Pajares, J., & López-Paredes, A. (2012a). *Seguimiento y Control de Proyectos con Incertidumbre.* In XVI International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. *Vigo - España.*
- Acebes, F., Pajares, J., & López-Paredes, A. (2012b). *Un entorno gráfico para el control de proyectos con incertidumbre.* In XVI International Congress on Project Management and Engineering. *Valencia - España.*
- Acebes, F., Paz, M., Pajares, J., & López-Paredes, A. (2012a). *Duración del Proyecto e Incertidumbre.* In XVI International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. *Vigo - España.*
- Acebes, F., Paz, M., Pajares, J., & López-Paredes, A. (2012b). *Sensibilidad de la duración del Proyecto respecto a la duración de las Actividades.* In 3rd International Construction and Engineering Project Management Workshop (pp. 111–118). *Valladolid - España.*
- Ackermann, F., Eden, C., Williams, T. M., & Howick, S. (2007). *Systemic risk assessment: a case study.* *Journal of the Operational Research Society*, 58(1), 39–51.
- Adlakha, V. G., & Kulkarni, V. G. (1989). *A classified bibliography of research on stochastic PERT networks: 1966- 1987.* *INFOR*, 27(3), 272–296.
- AEIPRO. (2009). *NCB Bases par la Competencia en Dirección de Proyectos. Ver 3.1. Universidad de Valencia.*
- Agirre Pérez, I. (2007). *Sistema de planificación estocástico de proyectos: Implicaciones en la gestión de riesgos.* *Universidad de La Rioja.*
- Aguilera Ontiveros, A. (2002). *Ciudades como tableros de ajedrez: introducción al modelado de dinámicas urbanas con autómatas celulares.* *San Luis Potosí: El Colegio de San Luis.*
- Aguilera Ontiveros, A., & López-Paredes, A. (2001). *Modelado multiagente de sistemas socioeconómicos: una introducción al uso de la inteligencia artificial en la investigación social.* *San Luis Potosí: El Colegio de San Luis.*
- Aguilera Ontiveros, A., & López-Paredes, A. (2004). *Sociedades Artificiales: Aplicación de la simulación en la teoría social.* *San Luis Potosí: Fac.de Ciencias-UASLP, INSISOC.*

- AIRMIC/ALARM/IRM. (2002). *A Risk Management Standard*. London: Association of Insurance and Risk Managers, Association of Local Authority Risk Managers, Institute of Risk Management.
- Aliverdi, R., Moslemi Naeni, L., & Salehipour, A. (2013). *Monitoring project duration and cost in a construction project by applying statistical quality control charts*. *International Journal of Project Management*, 31(3), 411–423.
- Al-Jibouri, S. H. (2003). *Monitoring systems and their effectiveness for project cost control in construction*. *International Journal of Project Management*, 21(2), 145–154.
- Anbari, F. T. (2003). *Earned Value Project Management method and extensions*. *Project Management Journal*, 34(4), 12–23.
- Ansell, J., & Wharton, F. (1992). *Risk: Analysis, Assessment and Management*. (J. Ansell & F. Wharton, Eds.). New York: Wiley.
- Araújo, J. A., de Benito, J. J., Sanz Angulo, P., & del Olmo, R. (2006). *Diseño de subastas para la programación Job Shop*. In X Congreso de Ingeniería de Organización Valencia.
- Araújo, J. A., Galán, J. M., Pajares, J., & López-Paredes, A. (2009). *Gestión eficiente de carteras de proyectos. Propuesta de un sistema inteligente de soporte a la decisión para oficinas técnicas y empresas consultoras*. *DYNA Ingeniería E Industria*, 84(9)(9), 761–772.
- Araújo, J. A., López-Paredes, A., & Pajares, J. (2010). *An Agent Based Information System for Project Portfolio Management*. In Á. Ortiz, R. Franco, & P. Gasquet (Eds.), *Balanced Automation Systems for Future Manufacturing Networks (Vol. 322, pp. 235–242)*. Springer Boston.
- Araújo, J. A., Pajares, J., & López-Paredes, A. (2010). *Simulating the dynamic scheduling of project portfolios*. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(10), 1428–1441.
- AS/NZS 4360. (1999). *Risk Management*. Strathfield: Standards Association of Australia. Retrieved from www.standards.com.au
- Assaf, S., & Al-Hejji, S. (2006). *Causes of delay in large construction projects*. *International Journal of Project Management*, 24, 349–357.
- Atkinson, R., Crawford, L., & Ward, S. (2006). *Fundamental uncertainties in projects and the scope of project management*. *International Journal of Project Management*, 24(8), 687–698.

- Aytug, H., Lawley, M. A., McKay, K., Mohan, S., & Uzsoy, R. (2005). *Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions*. *European Journal of Operational Research*, 161, 86 – 110.
- Baccarini, D. (1996). *The concept of project complexity - a review*. *International Journal of Project Management*, 14, 201–204.
- Baloi, D., & Price, A. D. F. (2003). *Modelling global risk factors affecting construction cost performance*. *International Journal of Project Management*, 21, 261–269.
- Baraldi, P., & Zio, E. (2008). *A combined Monte Carlo and possibilistic approach to uncertainty propagation in event tree analysis*. *Risk Analysis*, 28(5), 1309–1325.
- Barber, R. B. (2005). *Understanding internally generated risks in projects*. *International Journal of Project Management*, 23(8), 584–590.
- Barraza, G. A., Back, W. E., & Mata, F. (2004). *Probabilistic forecasting of project performance using stochastic S curves*. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(1), 25–32.
- Barraza, G. A., & Bueno, R. A. (2007). *Probabilistic control of project performance using control limit curves*. *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(12), 957–965.
- Betts, M., & Lansley, P. (1995). *International Journal of Project Management: a review of the first ten years*. *International Journal of Project Management*, 12(4), 207–17.
- Bidot, J., Vidal, T., Laborie, P., & Beck, J. C. (2009). *A theoretic and practical framework for scheduling in a stochastic environment*. *Journal of Scheduling*, 12, 315–344.
- Blanco, V. D. (2013). *Earned Value Management: a predictive analysis tool*. *Navy Supply Corps Newsletter*, 66(2), 24–27.
- BS6079-3. (2000). *British Standard BS6079-3:2000. Project Management—Part 3: Guide to the Management of Business Related Project Risk*. London: British Standards Institute.
- Burke, R. (2003). *Project Management, Planning and Control Techniques*. 2003. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Cagno, E., Caron, F., & Mancini, M. (2008). *Dynamic analysis of project risk*. *International Journal of Risk Assessment and Management*, 10(1-2), 70–87.
- CAN/CSA-Q850-97. (1997). *Risk Management: Guidelines for Decision Makers*. Ontario: National Standards of Canada, Canadian Standards Association.

- Chapman, C. B. (1997). *Project risk analysis and management-- PRAM the generic process*. *International Journal of Project Management*, 15(5), 273–281.
- Chapman, C. B. (2006). *Key points of contention in framing assumptions for risk and uncertainty management*. *International Journal of Project Management*, 24, 303–313.
- Chapman, C. B., & Ward, S. (2000). *Estimation and evaluation of uncertainty: a minimalist first pass approach*. *International Journal of Project Management*, 18, 369–383.
- Chapman, C. B., & Ward, S. (2003a). *Constructively simple estimating: a project management example*. *Journal of the Operational Research Society*, 54(10), 1050–1058.
- Chapman, C. B., & Ward, S. (2003b). *Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights*. (Wiley, Ed.) (2nd ed., p. 408). Chichester.
- Chapman, C. B., & Ward, S. (2004). *Why risk efficiency is a key aspect of best practice projects*. *International Journal of Project Management*, 22, 619–632.
- Chapman, C. B., Ward, S. C., & Bennell, J. A. (2000). *Incorporating uncertainty in competitive bidding*. *International Journal of Project Management*, 18, 337–347.
- Chen, S., & Zhang, X. (2012). *An analytic review of earned value management studies in the construction industry*. In *Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World*, Proceedings of the 2012 Construction Research Congress (pp. 236–246).
- Chia, S. E. (2006). *Risk assessment framework for project management*. *IEEE*, 376–379.
- Cho, J. G., & Yum, B. J. (1997). *An Uncertainty Importance Measure of Activities in PERT Networks*. *International Journal of Production Research*, 35(10), 2737–2758.
- Christensen, D. (1993). *The estimate at completion problem: a review of three studies*. *Project Management Journal*, 24, 37–42.
- Cicmil, S. (2000). *Quality in Project Environments: a Nonconventional agenda*. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 17(4/5), 554–570.
- Cioffi, D. F. (2006). *Designing project management: a scientific notation and an improved formalism for Earned Value calculations*. *International Journal of Project Management*, 24(2), 136–144.
- Colin, J., & Vanhoucke, M. (2014). *Setting tolerance limits for statistical project control using earned value management*. *Omega*.

- Crawford, L., & Pollack, J. (2004). *Hard and soft projects: a framework for analysis*. International Journal of Project Management, 22(8), 645–653.
- Crawford, L., Pollack, J., & England, D. (2006). *Uncovering the trends in project management: Journal emphases over the last 10 years*. International Journal of Project Management, 24, 175–184.
- De Falco, M., & Macchiaroli, R. (1998). *Timing of control activities in project planning*. International Journal of Project Management, 16(1), 51–58.
- Del Caño, A., & de la Cruz, P. (2000). *An integrated methodology for project risk management*. ASCE Journal of Construction Engineering and Management, 128, 473–485.
- Dowie, J. (1999). *Against risk*. Risk Decision and Policy, 4(1), 57–73.
- Elmaghraby, S. E. (2000). *On criticality and sensitivity in activity networks*. European Journal of Operational Research, 127, 220–238.
- Elmaghraby, S. E. (2005). *On the fallacy of averages in project risk management*. European Journal of Operational Research, 165(2), 307–313.
- Elmaghraby, S. E., Fathi, Y., & Taner, M. R. (1999). *On the sensitivity of project variability to activity mean duration*. Int. J. Production Economics, 62(June 1998), 219–232.
- Elms, D. G. (2004). *Structural safety: Issues and progress*. Progress in Structural Engineering and Materials, 6, 116–126.
- Enshassi, A., Mohamed, S., & Madi, I. (2005). *Factors affecting accuracy of cost estimation of building contracts in the Gaza Strip*. Journal of Financial Management of Property and Construction, 10(2), 115–124.
- Evaristo, R., & van Fenema, P. (1999). *A typology of project management: emergence and evolution of new forms*. International Journal of Project Management, 17(5), 275–81.
- Eve, A. (2007). *Development of Project Management Systems*. Industrial and Commercial Training, 39(2).
- Fazar, W. (1959). *Program evaluation and review technique*. The American Statistician, 13(2), 10.
- Fishburn, P. C. (1984). *Foundations of risk measurement. 1: Risk as probable loss*. Management Science, 30/4, 396–406.
- Fleming, Q. W., & Koppelman, J. M. (2005). *Earned Value Project Management*. Newtown Square. PA: Project Management Institute Inc.

- Fortin, J., Zielinski, P., Dubois, D., & Fargier, H. (2010). *Criticality analysis of activity networks under interval uncertainty*. *Journal of Scheduling*, 13(6), 609–627.
- Frank, M. (1999). *Treatment of uncertainties in space nuclear risk assessment with examples from Cassini mission implications*. *Reliab Eng Syst Safe*, 66, 203–221.
- Fuentes-Fernández, R., Galán, J. M., Hassan, S., & Villafañez, F. A. (2011). *Metamodelling for Agent-Based Modelling: An Application for Posted Pricing Institutions*. *Studies in Informatics and Control*, 20(1), 55–66.
- Galán, J. M. (2007). *Evaluación Integradora de Políticas de Agua: Modelado y Simulación con Sociedades Artificiales de Agentes*. *Universidad de Burgos*.
- Galán, J. M., del Olmo, R., & López-paredes, A. (2008). *Diffusion of Domestic Water Conservation Technologies in an ABM-GIS Integrated Model*. *System*, 5271, 567–574. doi:10.1007/978-3-540-87656-4
- Galán, J. M., & Izquierdo, L. R. (2005). *Appearances Can Be Deceiving: Lessons Learned Re-Implementing Axelrod's "Evolutionary Approach to Norms."* *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 8(3), 2.
- Galán, J. M., Izquierdo, L. R., Izquierdo, S. S., López-Paredes, A., Pascual, J. A., Posada, M., ... Villafañez, F. A. (2007). *LABEXNET: un Laboratorio de Economía Experimental en Internet*. *RELIEVE Revista Electrónica de Investigación Y Evaluación Educativa*, 13(1), 105–125.
- Galán, J. M., Latek, M. M., & Rizi, S. M. M. (2011). *Axelrod's Metanorm Games on Networks*. *PloS One*, 6(5), e20474. doi:10.1371/journal.pone.0020474
- Galán, J. M., López-Paredes, A., & del Olmo, R. (2005). *Simulación basada en agentes en Teoría de Juegos Evolutiva: ¿pueden las metanormas evitar el colapso de una norma social?* In IX Congreso de Ingeniería de Organización: 65-66. Oviedo: ADINGOR.
- Galán, J. M., López-Paredes, A., & del Olmo, R. (2009). *An agent-based model for domestic water management in Valladolid metropolitan area*. *Water Resources Research*, 45(5), 1–17. doi:10.1029/2007WR006536
- Godfrey, P. (1996). *Control of Risk: A Guide to the Systematic Management of Risk from Construction*. London: Construction Industry Research and Information Association.
- Gowan, J. A., Mathieu, R. G., & Hey, M. B. (2006). *Earned Value Management in a data warehouse project*. *Information Management & Computer Security*, 14(1), 37–50.

- Gutierrez, G., & Paul, A. (2000). *Analysis of the effects of uncertainty, risk-pooling, and subcontracting mechanisms on project performance*. *Operations Research*, 48, 927 – 938.
- Hanna, A. S. (2012). *Using the Earned Value Management system to improve electrical project control*. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(3), 449–457.
- Hazir, Ö., & Schmidt, K. W. (2013). *An integrated scheduling and control model for multi-mode projects*. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 25, 230–254.
- Hazir, Ö., & Shtub, A. (2011). *Effects of the information presentation format on project control*. *Journal of the Operational Research Society*, 62(12), 2157–2161.
- Henderson, K. (2003). *Earned Schedule: a breakthrough extension to earned value theory? A retrospective analysis of real project data*. *The Measurable News*, 1–16.
- Henderson, K. (2004). *Further developments in Earned Schedule*. *The Measurable News*, 15–22.
- Hernández, C., & López-Paredes, A. (1999). *Beyond Experimental Economics: Trading Institutions and Multiagent Systems*. *Computing in Economics and Finance 1999 from Society for Computational Economics*, 1–10.
- Hernández, C., López-Paredes, A., Pajares, J., & Posada, M. (2008). *Socially inspired decision making tool: from the Economy to Management Engineering*. In S. et al. (eds) (Ed.), *Insights in Current Organization Engineering* (pp. 37–39). *Burgos, Spain*.
- Herroelen, W., & Leus, R. (2002). *Project Scheduling Under Uncertainty Survey and Research Potentials*. *European Journal of Operational Research*, 165(2), 289–306.
- Hertz, D. B., & Thomas, H. (1994). *Risk Analysis and its Applications*. *Detroit: John Wiley & Sons, Inc.*
- Hillson, D. (2002). *Extending the risk process to manage opportunities*. *International Journal of Project Management*, 20, 235–240.
- Hillson, D. (2003). *Using a risk breakdown structure in project management*. *Journal of Facilities Management*, 2(1), 85–97.
- Hillson, D. (2004a). *Earned Value Management and Risk Management: a practical synergy*. In *PMI 2004 Global Congress Proceedings. Anaheim, California, USA*.
- Hillson, D. (2004b). *Effective opportunity management for projects – exploiting positive risk*. *New York: Marcel Dekker*.
- Hillson, D. (2011). *Risk Management Principles. Part 1: ISO 31000:2009*. Retrieved June 01, 2014, from www.risk-doctor.com

- Hillson, D. (2012a). *Defining Different Types of Risk*. Retrieved June 01, 2014, from www.risk-doctor.com
- Hillson, D. (2012b). *Risk is more than Uncertain future events*. Retrieved June 01, 2014, from (www.risk-doctor.com)
- Hillson, D. (2012c). *What causes Emerging Risks?* Retrieved June 01, 2014, from www.risk-doctor.com
- Hillson, D. (2013a). *Managing Risk across borders*. Retrieved June 01, 2014, from www.risk-doctor.com
- Hillson, D. (2013b). *Managing Risk in Complex Projects*. Retrieved June 01, 2014, from www.risk-doctor.com
- Hillson, D., & Simon, P. (2012). *Practical Project Risk Management: The ATOM Methodology (Second Edi., p. 253)*. Tysons Corner, Virginia: Management Concepts Inc.
- Hopkinson, M., Close, P., Hillson, D., & Ward, S. (Eds.). (2008). *Prioritising Project Risk.pdf*. Association for Project Management.
- Howell, D., Windahl, C., & Seidel, R. (2010). *A project contingency framework based on uncertainty and its consequences*. *International Journal of Project Management*, 28(3), 256–264.
- Huang, D., Chen, T., & Wang, M. J. (2001). *A fuzzy set approach for event tree analysis*. *Fuzzy Sets and Systems*, 118, 153–165.
- ICAEW. (1999). *Internal Control; Guidance for Directors on the Combined Code: Turnbull Report*. London: Institute of Chartered Accountants in England and Wales.
- IEEE. (2001). *IEEE Guide Adoption of PMI Standard A Guide to the Project Management Body of Knowledge. IEEE, Std 1490-2011*.
- Izquierdo, L. R., Galán, J. M., Santos, J. I., & del Olmo, R. (2008). *Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas*. *Empiria: Revista de Metodología de Ciencias Sociales*, (16), 85–112.
- Izquierdo, L. R., & Izquierdo, S. S. (2008). *Dynamics of the Bush-Mosteller Learning Algorithm in 2x2 Games*. Weber, Elshaw & Mayer (eds.) *Reinforcement Learning. Theory and Applications*, Vienna: I-Tech Education and Publishing.
- Izquierdo, L. R., Izquierdo, S. S., Galán, J. M., & Santos, J. I. (2009). *Techniques to Understand Computer Simulations: Markov Chain Analysis*. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12(1), 6.
- Izquierdo, S. S., & Izquierdo, L. R. (2006). *On the Structural Robustness of Evolutionary Models of Cooperation*. In E. Corchado, H. Yin, V. J. Botti, & C.

- Fyfe (Eds.), *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2006*. Lecture Notes in Computer Science (pp. 172 – 182). Berlin Heidelberg: Springer.
- Izquierdo, S. S., & Izquierdo, L. R. (2007). *The impact of quality uncertainty without asymmetric information on market efficiency*. Journal of Business Research, 60(8), 858–867. doi:10.1016/j.jbusres.2007.02.010
- Izquierdo, S. S., & Izquierdo, L. R. (2011). *Strictly Dominated Strategies in the Replicator-Mutator Dynamics*. Games 2011, 2(3), 355–364. doi:10.3390/g2030355
- Izquierdo, S. S., Izquierdo, L. R., Galán, J. M., & Hernández, C. (2006). *Market failure caused by quality uncertainty*. Artificial Economics, 564, 203–213. doi:10.1007/3-540-28547-4
- Izquierdo, S. S., Izquierdo, L. R., & Gotts, N. (2008). *Reinforcement Learning Dynamics in Social Dilemmas*. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 11(2).
- Jaafari, A. (2006). *Management of risks , uncertainties and opportunities on projects: time for a fundamental shift*. International Journal of Project Management, 19(2001), 89–101.
- Jacob, D. S. (2003). *Forecasting project schedule completion with earned value metrics*. The Measurable News, 7–9.
- Jacob, D. S., & Kane, M. (2004). *Forecasting schedule completion using Earned Value metrics revisited*. The Measurable News, 11–17.
- Jones, R., & Deckro, R. (1993). *The social psychology of Project management conflict*. European Journal of Operational Research, 64, 216–228.
- Jordan, G. B., Hage, J., Mote, J., & Hepler, B. (2005). *Investigating differences among research projects and implications for managers*. R&D Management, 35(5), 501–512.
- Jorgensen, T., & Wallace, S. W. (2000). *Improving project cost estimation by taking into account managerial flexibility*. European Journal of Operational Research, 127, 239– 251.
- Kartam, N. A., & Kartam, S. A. (2001). *Risk and its management in the Kuwaiti construction industry: a contactors' perspective*. International Journal of Project Management, 19, 325–335.
- Kelley, J. (1961). *Critical path planning and scheduling: mathematical basis*. Operations Research, 9(3), 296–320.
- Kelley, J., & Walker, M. (1989). *The origins of CPM: a personal history*. Project Management. Network, 3(2), 7–22.

- Kerzner, H. (2009). *Project Management. A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling. (I. John Wiley & Sons, Ed.) (Tenth edit., p. 1121). New York.*
- Khedr, M. K. (2006). *Project Risk Management Using Monte Carlo Simulation.* AACE International Transactions.
- Khodakarami, V., & Abdi, A. (2014). *Project cost risk analysis: A Bayesian networks approach for modeling dependencies between cost items.* International Journal of Project Management.
- Kim, E. H., Wells JR, W. G., & Duffey, M. R. (2003). *A model for effective implementation of Earned Value Management methodology.* International Journal of Project Management, 21, 375–382.
- Klingel, A. (1966). *Bias in pert project completion time calculations for a real network.* Management Science, 13(4), B194–B201.
- Kloppenborg, T., & Opder, W. (2002). *The current state of project management research: trends, interpretations and predictions.* Project Management Journal, 22(2), 5–19.
- Knight, F. (1964). *Risk, uncertainty and profit. (A. M. Kelley, Ed.). New York.*
- Kutsch, E., & Hall, M. (2005). *Intervening conditions on the management of project risk: Dealing with uncertainty in information technology projects.* International Journal of Project Management, 23(8), 591–599.
- Kutsch, E., & Hall, M. (2010). *Deliberate ignorance in project risk management.* International Journal of Project Management, 28(3), 245–255.
- Kwak, Y. H., & Anbari, F. T. (2009). *Analyzing project management research: Perspectives from top management journals.* International Journal of Project Management, 27(5), 435–446.
- Kwak, Y. H., & Anbari, F. T. (2012). *History, practices, and future of Earned Value Management in government: perspectives from NASA.* Project Management Journal, 43(1), 77–90.
- Lambrechts, O., Demeulemeester, E., & Herroelen, W. (2008). *Proactive and Reactive Strategies for Resource-Constrained Project Scheduling with Uncertain Resource Availabilities.* Journal of Scheduling, 11, 121–136.
- Lavios, J. J., del Olmo, R., Araúzo, J. A., & Galán, J. M. (2010a). *Combinatorial Auctions for Coordination of Manufacturing MAS - Updating Price Methods.pdf.*
- Lavios, J. J., del Olmo, R., Araúzo, J. A., & Galán, J. M. (2010b). *Price Updating in Combinatorial Auctions for Coordination of Manufacturing Multiagent Systems.* Trends in Practical Applications of Agents and Multiagent systems8th

- International Conference on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems, 71, 201–207.
- Lavios, J. J., Galán, J. M., Santos, J. I., & del Olmo, R. (2006). *Could TAC be a laboratory for economists?* In F. Díaz, J. M. Corchado, & F. Fdez-Riverola (Eds.), *Proceedings of the Fifth International Workshop on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (IWPAAMS'06)* (pp. 209–212).
- Lefley, F. (1997). *Approaches to risk and uncertainty in the appraisal of new technology capital projects*. *Int. J. Production Economics*, 53, 21–33.
- Leu, S. S., & Lin, Y. C. (2008). *Project performance evaluation based on statistical process control techniques*. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(10), 813–819.
- Lewin, C. (2002). *RAMP Risk Analysis and Management for Projects*. London: *Institution of Civil Engineers and the Faculty and Institute of Actuaries in association with Thomas Telford*.
- Lipke, W. (1999). *Applying management reserve to software project management*. *Journal of Defense Software Engineering*, 17–21.
- Lipke, W. (2003). *Schedule Is Different*. *The Measurable News*, Summer.
- Lipke, W. (2004a). *Connecting Earned Value to the Schedule*. *The Measurable News*, Winter, 1–16.
- Lipke, W. (2004b). *The probability of success*. *The Journal of Quality Assurance Institute*, (January), 14–21.
- Little, T. (2005). *Context adaptive agility: managing complexity and uncertainty*. *IEEE Software*, 22(3), 28–35.
- Liu, L., & Yetton, P. (2007). *The contingent effects on project performance of conducting project reviews and deploying project management offices*. *IEEE Trans. Eng. Manage*, 54(4), 789–799.
- Longman, A., & Mullins, J. (2004). *Project Management: key tool for implementing strategy*. *Journal of Business Strategy*, 25(5).
- López-Paredes, A. (2001). *Análisis e Ingeniería de la Instituciones Económicas. Una metodología basada en agentes*. Zatautz: *Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco*.
- López-Paredes, A. (2004). *Ingeniería de Sistemas Sociales. Diseño, Modelado y Simulación de Sociedades Artificiales de Agentes*. Valladolid: *Servicio de Publicaciones de la Universidad de Valladolid*.
- López-Paredes, A., & del Olmo, R. (1998). *The social dimension of economics and multiagent systems*. In B. Edmonds & K. Dautenhahn (Eds.), *Socially Situated*

- Intelligence: a workshop held at SAB'98 (pp. 73–79). Zürich: University of Zürich.
- López-Paredes, A., & Hernández, C. (2008). Agent-based Modelling in Natural Resource Management. Insisoc Madrid.
- López-Paredes, A., Hernández, C., & Pajares, J. (2002). Towards a new experimental socio-economics Complex behaviour in bargaining. *Journal of SocioEconomics*, 31(4), 423–429. doi:10.1016/S1053-5357(02)00131-2
- López-Paredes, A., Pajares, J., & Galán, J. M. (2010). La empresa como cartera de proyectos y programas. *DYNA Ingeniería E Industria*, 85(1), 41–48.
- MacCrimmon, K. R., & Ryavec, C. A. (1964). An analytical study of the PERT assumptions. *Operations Research*, 12(1), 16–37.
- Malcolm, D. G., Roseboom, J. H., Clark, C. E., & Fazar, W. (1959). Application of a technique for research and development program evaluation. *Operations Research*, 7(5), 646–669.
- Mark, W., Cohen, P. E., & Glen, R. P. (2004). Project Risk Identification and Management. *AACE International Transactions*, 01, 1–5.
- Martin, J. (1965). Distribution of the time through a directed, acyclic network. *Operations Research*, 13, 46–66.
- McAllister, R. R. J., Izquierdo, L. R., Janssen, M. A., & Stafford Smith, D. M. (2009). Research impact within the international arid literature: An Australian perspective based on network theory. *Journal of Arid Environments*, 73(9), 862–871.
- McKim, R., Hegazy, T., & Attalla, M. (2000). Project performance control in reconstruction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 126(2), 137–141.
- McLain, D. (2009). Quantifying Project Characteristics Related to Uncertainty. *Project Management Journal*, 40(4), 60–73. doi:10.1002/pmj
- Millington, D., & Stapleton, J. (2005). Developing a RAD standard. *IEEE Software*, 12(5), 54–55.
- Moon, S. W., Kim, J. S., & Kwon, K. N. (2007). Effectiveness of OLAP-based cost data management in construction cost estimate. *Automation in Construction*, 16, 336–344.
- Morris, P. W. G., & Hough, G. H. (1987). The anatomy of major projects. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, Inc.
- Mummolo, G. (1994). PERT-path network technique: a new approach to project planning. *International Journal of Project Management*, 12(2), 89–99.

- Mummolo, G. (1997). *Measuring uncertainty and criticality in network planning by PERT-path technique*. International Journal of Project Management, 15(6), 377–387.
- Mummolo, G., Digiesi, S., & Ranieri, L. (2003). *Simulating PERT-Path Networks for Resource Allocation*.
- Naderpour, A., & Mofid, M. (2011). *Improving construction management of an educational center by applying Earned Value technique*. Procedia Engineering, 14, 1945–1952.
- Naeni, L. M., Shadrokh, S., & Salehipour, A. (2011). *A fuzzy approach for the earned value management*. International Journal of Project Management, 29(6), 764–772. doi:10.1016/j.ijproman.2010.07.012
- Navon, R. (2005). *Automated project performance control of construction projects*. Automation in Construction, 14, 467–476.
- Nieto-Morote, A., & Ruz-Vila, F. (2011). *A fuzzy approach to construction project risk assessment*. International Journal of Project Management, 29(2), 220–231.
- Nowotny, H., Scott, P., & Gibbons, M. (2001). *Re-thinking science: knowledge and the public in an age of uncertainty*. Malden, MA: Blackwell Publishers Ltd.
- Nureg. (1975). *An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants (Reactor Safety Study, WASH-1400 (NUREG—75/014))*. Washington, DC: US: Nuclear Regulatory Commission.
- OGC. (2002). *Management of Risk: Guidance for Practitioners (Office of Government Commerce)*. London: The Stationery Office.
- Olsson, R. (2007). *In search of opportunity management: Is the risk management process enough?* International Journal of Project Management, 25(8), 745–752.
- Pajares, J. (2001). *Modelos evolucionistas en dinámica industrial: un enfoque cognitivo*. ETS de Ingenieros. Universidad del País Vasco.
- Pajares, J., Hernández, C., & López-Paredes, A. (2004). *Modelling Learning and R&D in Innovative Environments: a Cognitive Multi-Agent Approach*. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 7(2).
- Pajares, J., & López-Paredes, A. (2007). *Gestión integrada del coste y del plazo de proyectos . Más allá de la Metodología del Valor Ganado (EVM)*. In XI Congreso de Ingeniería de Organización (p. 10).
- Pajares, J., & López-Paredes, A. (2011). *An extension of the EVM analysis for project monitoring: The Cost Control Index and the Schedule Control Index*. International Journal of Project Management, 29(5), 615–621.

- Pajares, J., López-Paredes, A., & Hernández, C. (2003). *Industry as an organisation of agents: Innovation and R&D management*. JASSS, 6(2), 1–20.
- Pajares, J., Pascual, J. A., Hernández, C., & López-Paredes, A. (2003). *A behavioral, evolutionary and generative framework for modelling financial markets*. Online Proceedings of The First European Social Simulation Association Conference, ESSA'03. Groningen.
- Partovi, F., & Burton, J. (1993). *Timing of monitoring and control of CPM projects*. IEEE Trans. Eng. Manage, 40(1), 68–75.
- Pascual, J. A. (2006). *Modelado Multiagente de Mercados Financieros: Un Enfoque Basado en el Comportamiento Individual de los Inversores*. Universidad de Valladolid.
- Pascual, J. A., Galán, J. M., Izquierdo, L. R., Santos, J. I., Izquierdo, S. S., & González, J. (2009). *Una herramienta didáctica para la enseñanza de la teoría de juegos mediante internet*. EDUTEC Revista Electrónica de Tecnología Educativa, 29.
- Pascual, J. A., López-Paredes, A., Pajares, J., & Hernández, C. (2003). *Mercados Financieros Artificiales: un Paso más hacia la Comprensión de los Mercados Financieros Reales*. In A. Redondo & J. J. De Benito (Eds.), *Actas del V Congreso de Ingeniería de Organización*. Valladolid-Burgos.
- Pascual, J. A., & Pajares, J. (2007). *The role of risk aversion and technical trading in the behaviour of financial markets*. In H.-I. and T. Edmonds (Ed.), *Social Simulation: Technologies, Advances and New Discoveries*, Idea Group Inc.
- Pascual, J. A., Pajares, J., & López-Paredes, A. (2006). *Explaining the Statistical Features of the Spanish Stock Market from the Bottom-Up*. In C. Bruun (Ed.), (Vol. 584, pp. 283–294). Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/3-540-37249-0_20
- Pearson, A. W. (1990). *Innovation strategy*. Technovation, 10(3), 185–192.
- Pender, S. (2001). *Managing incomplete knowledge: Why risk management is not sufficient*, 19, 79–87.
- Perminova, O., Gustafsson, M., & Wikström, K. (2008). *Defining uncertainty in projects – a new perspective*. International Journal of Project Management, 26(1), 73–79.
- Perry, J. G., & Hayes, R. W. (1985). *Risk and its management in construction projects*. Proceeding of Institution Civil Engineers, 499–521.
- Pich, M. T., Loch, C. H., & Meyer, A. De. (2002). *On Uncertainty, Ambiguity, and Complexity in Project Management*. Management Science, 48(8), 1008–1023.

- Picken, D. H., & Mak, S. (2001). *Risk analysis in cost planning and its effect on efficiency in capital cost budgeting*. *Logistics Information Management*, 14(5/6), 318–327.
- Pinto, J., & Slevin, D. (1988). *Critical success factors across the project life cycle*. *Project Management Journal*, 19(3), 68–75.
- Portrandolfo, P. (2000). *Project duration in stochastic networks by the PERT-path technique*. *International Journal of Project Management*, 18, 215–222.
- Posada, M. (2005a). *Análisis y diseño de la subasta doble. Una aproximación basada en agentes*. *Universidad de Valladolid*.
- Posada, M. (2005b). *Análisis y diseño de la subasta doble. Una aproximación basada en agentes*. *Universidad de Valladolid*.
- Posada, M. (2006). *Strategic Software Agents in Continuous Double Auction under Dynamic Environment*. In *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2006*. *Lecture Notes in Computer Science 4224 (pp. 1223–1233)*. *Berlín: Berlin Heidelberg: Springer*.
- Posada, M., Hernández, C., & López-Paredes, A. (2004). *Aprendizaje Evolutivo en la Subasta Doble Continua. Un enfoque Multiagente*. In *VIII Congreso de Ingeniería de Organización (pp. 111–120)*. *Leganés*.
- Posada, M., Hernández, C., & López-Paredes, A. (2006). *Learning in Continuous Double Auction Market*. *Artificial Economics*, 41–51.
- Posada, M., Hernández, C., & López-Paredes, A. (2007). *Emissions Permits Auctions: An Agent Based Model Analysis*. (B. Edmonds, K. G. Troitzsch, & C. Hernández Iglesias, Eds.) *Social Simulation: Technologies, Advances and New Discoveries*. *IGI Global*. doi:10.4018/978-1-59904-522-1
- Posada, M., Hernández, C., & López-Paredes, A. (2008). *Testing Marshallian and Walrasian Instability with an Agent Based Model*. In *Advances in Complex Systems (pp. 249–260)*. *World Scientific Pu . Singapore*.
- Posada, M., & López-Paredes, A. (2008). *How to choose the bidding strategy in continuous double auctions: Imitation versus take-the-best heuristics*. *JASSS*, 11(1).
- Poza, D., Galán, J. M., Santos, J. I., & López-Paredes, A. (2010). *An Agent Based Model of the Nash Demand Game in Regular Lattices*. In *Á. Ortiz, R. D. Franco, & P. G. Gasquet (Eds.), Balanced Automation Systems for Future Manufacturing Networks IFIP Advances in Information and Communication Technology (Vol. 322/2010, pp. 243–250)*. *Springer Berlin Heidelberg*. doi:10.1007/978-3-642-14341-0

- Poza, D., Santos, J. I., Galán, J. M., & López-Paredes, A. (2011). *Mesoscopic Effects in an Agent-Based Bargaining Model in Regular Lattices*. PLoS ONE, 6(3), 11.
- Poza, D., Villafañez, F. A., & Pajares, J. (2009). *Impact of Tag Recognition in Economic Decisions*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 631(Part 7), 245–256. doi:10.1007/978-3-642-02956-1_20
- Project Management Institute. (2000). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge: PMBoK(R) Guide. Second Edition*. (Project Management Institute Inc., Ed.).
- Project Management Institute. (2005). *Practice Standard for Earned Value Management*. Pennsylvania - USA: Project Management Institute Inc.
- Project Management Institute. (2009). *Practice Standard for Project Risk Management (pp. 1–129)*. Newtown Square, Pennsylvania 19073-3299 USA: Project Management Institute, Inc.
- Project Management Institute. (2013). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge: PMBoK(R) Guide. Fifth Edition*. Project Management Institute Inc.
- Ratbe, D., King, W. R., & Kim, Y.-G. (1999). *The fit between project characteristics and application development methodologies: a contingency approach*. Journal of Computing Info. Syst, 40(2), 26.
- Raz, T., & Erel, E. (2000). *Optimal timing of project control points*. European Journal of Operational Research, 127(2), 252–261.
- Raz, T., & Hillson, D. (2005). *A Comparative Review of Risk Management Standards*. Risk Management: An International Journal, 7(4), 53–66.
- Raz, T., & Michael, E. (2001). *Use and benefits for tools for project risk management*. International Journal of Project Management, 19, 9–17.
- Ritchie, E. (1985). *Network base planning techniques: A critical review of published development*. In G. K. Rand & R. W. Eglise (Eds.), *Further Developments in Operational Research*. Pergamon.
- Rozenes, S., Vitner, G., & Spraggett, S. (2004). *MPCS: Multidimensional Project Control System*. International Journal of Project Management, 22(2), 109–118.
- Rozenes, S., Vitner, G., & Spraggett, S. (2006). *PROJECT CONTROL: LITERATURE REVIEW*. Project Management Journal, 37(4), 5–14.
- Ruiz-Martin, C., Ramirez-Ferrero, M., Gonzalez-Alvarez, J. L., & López-Paredes, A. (2015). *Modeling of a Nuclear Emergency Plan: Communication Management*. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, (21:5), 1152–1168. doi:10.1080/10807039.2014.955383

- Santos, J. I., del Olmo, R., & Pajares, J. (2005). Fenómenos de difusión de conocimiento y dimensión geográfica de la innovación, una aproximación multi-agente. In IX Congreso de Ingeniería de Organización. Oviedo.
- Santos, J. I., del Olmo, R., & Pajares, J. (2007). *The Emergence of Social Networks from Interactive Learning*. In S. Takahashi, D. Sallach & J. Rouchier (Eds), *Advancing Social Simulation. The First World Congress, XVI*; Berlin Heidelberg: Springer.
- Santos, J. I., Galán, J. M., & del Olmo, R. (2006). *An Agent-Based Model of Personal Web Communities*. In E. Corchado, H. Yin, V. Botti, & C. Fyfe (Eds.), *Intelligent Data Engineering and Automated Learning Lecture Notes in Computer Science (Vol. 4224, pp. 1242–1249)*. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/11875581
- Santos, J. I., Poza, D., Galán, J. M., & López-Paredes, A. (2012). *Evolution of Equity Norms in Small-World Networks*. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2012, 1–18. doi:10.1155/2012/482481
- Schafer, G. (1976). *A Mathematical Theory of Evidence (Princeton.)*. Princeton, NY.
- 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.
- Shenhar, A. J. (1996). *Project Management Theory: The road to better practice*. In Project Management Institute 27th Annual Seminar/Symposium.
- Shenhar, A. J., & Dvir, D. (2007). *Reinventing Project Management: The Diamond Approach to Successful Growth and Innovation*. Boston: Harvard Business School Press.
- Shepperd, M., & Schofield, C. (1997). *Estimating Software Project Effort Using Analogies*. *IEEE Transactions On Software Engineering*, 23(12), 736–743.
- Shtub, A., Bard, J. F., & Globerson, S. (1996). *Project Management - Engineering Technology and Implementation*. USA: Prentice Hall.
- Shtub, A., Bard, J. F., & Globerson, S. (2004). *Project Management: Processes, Methodologies, and Economics*. Prentice Hall.
- Simon, O. (1998). *RAMP Risk Analysis and Management for Projects: RAMP Guide*. London: Institution of Civil Engineers and the Faculty and Institute of Actuaries in association with Thomas Telford.
- Simon, P., Hillson, D., & Newland, K. (1997). *PRAM Project Risk Analysis and Management Guide*. (P. Simon, D. Hillson, & K. Newland, Eds.). Norwich, UK: Association for Project Management.

- Stamelos, I., & Angelis, L. (2001). *Managing uncertainty in project portfolio cost estimation*. *Information and Software Technology*, 43, 759–768.
- Statman, M., & Tyebee, T. T. (1984). *The risk of investment in technological innovation*. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 3/4, 165–171.
- Stretton, A. (1994). *A short history of Project Management: part two: the 1970s*. *Aust Project Manager*, 14(2), 48.
- Thamhain, H. (2013). *Managing Risks in Complex Projects*. *Project Management Journal*, 44(2), 20–35. doi:10.1002/pmj
- Themistocleous, G., & Wearne, S. (2000). *Project Management topic coverage in journals*. *International Journal of Project Management*, 18(1), 7–11.
- Turner, J. R., & Cochrane, R. A. (1993). *Goals and methods matrix: coping with projects with ill defined goals and/or methods of achieving them*. *International Journal of Project Management*, 11(2), 93–102.
- Vandevoorde, S., & Vanhoucke, M. (2006). *A comparison of different project duration forecasting methods using earned value metrics*. *International Journal of Project Management*, 24(4), 289–302.
- Vanhoucke, M. (2010). *Using activity sensitivity and network topology information to monitor project time performance*. *Omega*, 38(5), 359–370.
- Vanhoucke, M. (2011). *On the dynamic use of project performance and schedule risk information during project tracking*. *Omega*, 39(4), 416–426.
- Vanhoucke, M. (2012). *Measuring the efficiency of project control using fictitious and empirical project data*. *International Journal of Project Management*, 30(2), 252–263.
- Vanhoucke, M., & Vandevoorde, S. (2007). *A simulation and evaluation of earned value metrics to forecast the project duration*. *Journal of the Operational Research Society*, 58(10), 1361–1374.
- Villafañez, F. A. (2013). *Programación Multi-Proyecto con Restricciones de Financiación*. *Universidad de Valladolid*.
- Villafañez, F. A., & Poza, D. (2010). *Propuesta de Modelo MAS para la resolución del RCMPSP basado en Subastas Combinatorias*. In J. Gutiérrez Pajares, A. López-Paredes, & C. Iglesias Hernández (Eds.), *Best Practices in Project Management. Methodologies and case studies in Construction and Engineering*.
- Wadson, N. (2005). *Projects as search processes*. *International Journal of Project Management*, 26(6), 421–427.
- Warburton, R. D. H. (2011). *A time-dependent Earned Value model for software projects*. *International Journal of Project Management*, 29(8), 1082–1090.

- Ward, S. C. (1999). *Assessing and managing important risks*. International Journal of Project Management, 17(6), 331–336.
- Ward, S., & Chapman, C. B. (1995). *Risk-management perspective on the project lifecycle*. International Journal of Project Management, 13(3), 145–149.
- Ward, S., & Chapman, C. B. (2003). *Transforming project risk management into project uncertainty management*. International Journal of Project Management, 21(2), 97–105.
- White, D., & Fortune, J. (2002). *Current practice in project management - an empirical study*. International Journal of Project Management, 20.
- Williams, T. M. (1992). *Criticality in Stochastic Networks*. Journal of the Operational Research Society, 43(4), 353–357.
- Williams, T. M. (1995). *A classified bibliography of recent research relating to project risk management*. European Journal of Operational Research, 85, 18–38.
- Williams, T. M. (1999). *The need for new paradigms for complex projects*. International Journal of Project Management, 17(5), 269–273.
- Williams, T. M. (2002). *Modelling Complex Projects*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Williams, T. M. (2005). *Assessing and moving on from the dominant project management discourse in the light of project overruns*. IEEE Trans. Eng. Manage, 52(4), 497–508.
- Williams, T. M., & Samset, K. (2010). *Issues in Front-End Decision Making*. Project Management Journal, 41(2), 38–49.
- Wittgenstein, L. (1986). *On Certainty*. Oxford: Basil Blackwell.
- Zafra-Cabeza, A., Ridao, M. a., & Camacho, E. F. (2008). *Using a risk-based approach to project scheduling: A case illustration from semiconductor manufacturing*. European Journal of Operational Research, 190(3), 708–723.
- Zhang, H. (2011). *Two Schools of Risk Analysis: A Review of Past Research on Project Risk*. Project Management Journal, 42(4), 5–18. doi:10.1002/pmj
- Zobel, A., & Wearne, S. (2000). *Project Management topic coverage in recent conferences*. Project Management Journal, 31(2), 32–37.
- Zwikael, O., & Globerson, S. (2006). *Benchmarking: An International Journal*. Benchmarking of Project Planning and Success in Selected Industries, 13(6), 688–700.
- Zwikael, O., Globerson, S., & Raz, T. (2000). *Evaluation of models for forecasting the final cost of a project*. Project Management Journal, 31(1), 53–57.

Índice de Figuras

Figura 1-1	Líneas de investigación del grupo INSISOC	9
Figura 1-2	Proyectos en los que ha participado y participa en la actualidad el grupo INSISOC. Adaptado de (Galán Ordax, 2007).....	12
Figura 4-1	Parámetros característicos metodología del Valor Ganado.....	93
Figura 4-2	Parámetros característicos y Varianzas metodología Valor Ganado.....	94
Figura 4-3	Función de distribución de Duración Total del Proyecto. Datos estadísticos	105
Figura 4-4	Schedule Risk Baseline.....	106
Figura 4-5	Weight Schedule.....	108
Figura 4-6	Schedule Buffer / Accurate Schedule Buffer	109
Figura 4-7	Schedule Control Index.....	109
Figura 4-8	SPBf / CPBf.....	111
Figura 4-9	Variación del Percentil.....	111
Figura 4-10	Diagrama AON. Red de proyecto utilizada	112
Figura 4-11	Función de distribución Duración Total del Proyecto.....	115
Figura 4-12	Marco gráfico de control del proyecto.....	117
Figura 4-13	Supuestos de ensayo.....	119
Figura 4-14	Proyecto ejecutado según planificación. EVM y CCoI/SCoI.....	120
Figura 4-15	Proyecto ejecutado en Adelanto Mantenido. EVM y CCoI/SCoI.....	122
Figura 4-16	Proyecto ejecutado en Adelanto Perdido. EVM y CCoI/SCoI.....	124
Figura 4-17	Proyecto ejecutado en Adelanto Retraso. EVM y CCoI/SCoI.....	125
Figura 4-18	Proyecto ejecutado en Retraso Mantenido. EVM y CCoI/SCoI	126
Figura 4-19	Proyecto ejecutado en Retraso Ganado. EVM y CCoI/SCoI.....	127
Figura 4-20	Proyecto ejecutado en Retraso Adelanto. EVM y CCoI/SCoI.....	129
Figura 4-21	Proyecto ejecutado en Retraso Adelanto. Horas Extra. EVM y CCoI/SCoI	130
Figura 4-22	Proyecto ejecutado en Retraso Adelanto. Aporte de mano de obra. EVM y CCoI/SCoI	131
Figura 4-23	Función de distribución de probabilidad a la salida del proyecto. Duración total normal. Percentiles	133

Figura 4-24	Marco gráfico de control	137
Figura 4-25	Sensibilidad a la modificación del Percentil.....	138
Figura 4-26	Sensibilidad a la modificación del Percentil. Función de distribución de probabilidad y Gráfico de control. P90/P10 frente a P75/P15.....	139
Figura 4-27	Sensibilidad a la modificación del Percentil. Gráfico de Control y SCoI. P90/P10 frente a P75/P15.....	140
Figura 5-1	Diagrama AON.....	151
Figura 5-2	Valor medio de días con temperaturas bajo 0°C en la ciudad de Valladolid.....	152
Figura 5-3	Ejemplo de actividad con incertidumbre estacional ejecutada completamente en zona con riesgo de heladas	155
Figura 5-4	Actividad con incertidumbre estacional ejecutada parcialmente en zona con riesgo de heladas	155
Figura 5-5	Dos situaciones de actividad con incertidumbre estacional ejecutada en zona con riesgo de heladas.....	156
Figura 5-6	Línea Base de Riesgo según el mes de ejecución del proyecto.....	158
Figura 5-7	Linea Base de Riesgos del Proyecto en función del periodo de ejecución.....	159
Figura 5-8	Índice de Criticidad en función de la fecha de comienzo del proyecto... 162	
Figura 5-9	Índice de Criticidad en función de la fecha de comienzo del proyecto... 165	
Figura 5-10	Schedule Sensitivity Index en función de la fecha de comienzo del proyecto.....	169
Figura 5-11	Diagrama AON.....	173
Figura 5-12	Duración esperada del proyecto, Criticidad, Crucialidad y SSI en función de la duración esperada de la actividad A1.....	175
Figura 5-13	Duración esperada del proyecto, Criticidad, Crucialidad y SSI en función de la duración esperada de la actividad A2.....	175
Figura 5-14	Duración esperada del proyecto, Criticidad, Crucialidad y SSI en función de la duración esperada de la actividad A3.....	176
Figura 5-15	Duración esperada del proyecto, Criticidad, Crucialidad y SSI en función de la duración esperada de la actividad A4.....	177
Figura 5-16	Duración esperada del proyecto, Criticidad, Crucialidad y SSI en función de la duración esperada de la actividad A5.....	178
Figura 5-17	Varianza del proyecto en función de la duración esperada de las actividades.....	179
Figura 5-18	Duración esperada del Proyecto y longitud del camino crítico en función de la varianza de las actividades	183
Figura 5-19	Varianza del Proyecto en función de la varianza de las actividades.....	184
Figura 5-20	Diagrama AON.....	187

Figura 5-21	Parámetros del coste del proyecto en función de la duración esperada de la actividad A2.....	188
Figura 5-22	Parámetros del coste del proyecto en función de la variabilidad de la actividad A2.....	190
Figura 5-23	CSI frente al Aumento de la Varianza de las Actividades.....	191
Figura 6-1	Diagrama AON. Red de proyecto utilizada. Actividades programadas con función de distribución normal.....	197
Figura 6-2	Diagrama AON. Red de proyecto utilizada. Actividades programadas con función de distribución exponencial.....	198
Figura 6-3	Función de distribución Duración Total del Proyecto (Distribución uniforme). Estadísticos.....	200
Figura 6-4	Función de distribución Duración Total del Proyecto (Distribución exponencial). Estadísticos.....	201
Figura 6-5	Percentiles de coste del proyecto por periodo de ejecución. Distribución normal.....	204
Figura 6-6	Percentiles de duración total y coste total del proyecto extraídos de simulación de Monte Carlo. Distribución normal.....	205
Figura 6-7	Percentiles de coste del proyecto por periodo de ejecución. Distribución normal.....	205
Figura 6-8	Percentiles de coste del proyecto por periodo de ejecución. Distribución exponencial.....	206
Figura 6-9	Percentiles de duración total y coste total del proyecto extraídos de simulación de Monte Carlo. Distribución exponencial.....	206
Figura 6-10	Percentiles de coste del proyecto por periodo de ejecución. Distribución exponencial.....	207
Figura 6-11	CV, CPI simulaciones red de proyecto distribución normal.....	209
Figura 6-12	SV, SPI simulaciones red de proyecto distribución normal.....	209
Figura 6-13	SV(t), SPI(t) simulaciones red de proyecto distribución normal.....	210
Figura 6-14	Varianza en Costes (CV) e índice de rendimiento de costes (CPI). Proyecto modelado con función de distribución exponencial.....	211
Figura 6-15	Varianza de Programación (SV) e Índice de Rendimiento de programación. Proyecto modelado con función de distribución exponencial.....	211
Figura 6-16	Varianza de Programación (SV) e Índice de Rendimiento de programación (SPI(t)). Proyecto modelado con función de distribución exponencial.....	212
Figura 6-17	Metodología Triad.....	213
Figura 6-18	Diagrama de bloques Metodología Triad.....	216
Figura 6-19	Metodología Triad. Terna y Proyecciones de tiempo y coste.....	217

Figura 6-20	Varianza de coste XCV y varianza de tiempo XSV	218
Figura 6-21	Triad y proyecciones de coste y tiempo. Actividades modeladas según función de distribución normal.....	222
Figura 6-22	Varianza de coste XCV y de tiempo XSV. Actividades modeladas según función de distribución normal.....	222
Figura 6-23	Triad y proyecciones de coste y tiempo. Actividades modeladas según función de distribución normal. Periodo de control t=10 ud. temporales	223
Figura 6-24	Varianza de tiempo XSV y de coste XCV. Actividades modeladas según función de distribución normal. Periodo de control t=10 ud. temporales	224
Figura 6-25	Triad y proyecciones de coste y tiempo. Actividades modeladas según función de distribución exponencial. Periodo de control t=16 ud. temporales.....	226
Figura 6-26	Varianza de tiempo XSV y de coste XCV. Actividades modeladas según función de distribución exponencial. Periodo de control t=15 ud. temporales.....	227
Figura 6-27	Gráficas metodología del Valor Ganado. Proyecto ejecutado según planificación.....	230
Figura 6-28	Metodología CCoI / SCoI. Proyecto ejecutado según planificación.....	230
Figura 6-29	Metodología Triad. Proyecto ejecutado según planificación	231
Figura 6-30	Varianzas tiempo y coste (XSV / XCV). Proyecto ejecutado según planificación.....	231
Figura 6-31	Gráficas metodología del Valor Ganado. Proyecto ejecutado con retraso respecto de su planificación.....	232
Figura 6-32	Metodología CCoI / SCoI. Proyecto ejecutado con retraso respecto de su planificación	233
Figura 6-33	Metodología Triad. Proyecto ejecutado con retraso respecto de su planificación.....	234
Figura 6-34	SV(t) frente a XSV. Proyecto ejecutado con retraso respecto de su planificación.....	235
Figura 6-35	CV frente a XCV. Proyecto ejecutado con retraso respecto de su planificación.....	235
Figura 6-36	Gráficas metodología del Valor Ganado. Proyecto que comienza con retraso y finaliza según planificación.....	236
Figura 6-37	Metodología CCoI / SCoI. Proyecto que comienza con retraso y finaliza según planificación.....	236
Figura 6-38	Metodología Triad. Proyecto que comienza con retraso y finaliza según planificación	237

Figura 6-39	Varianzas tiempo y coste (XSV / XCV). Proyecto que comienza con retraso y finaliza según planificación.....	238
Figura 6-40	Gráficas metodología del Valor Ganado. Proyecto que comienza con adelanto respecto de su planificación y que finaliza con retraso.....	238
Figura 6-41	Metodología CCoI / SCoI. Proyecto que comienza con adelanto respecto de su planificación y que finaliza con retraso.....	239
Figura 6-42	Metodología Triad. Proyecto que comienza con adelanto respecto de su planificación y que finaliza con retraso.....	240
Figura 6-43	Varianzas tiempo y coste (XSV / XCV). Proyecto que comienza con adelanto respecto de su planificación y que finaliza con retraso.....	241
Figura 6-44	SV(t) frente a XSV. Proyecto que comienza con adelanto respecto de su planificación y que finaliza con retraso.....	242
Figura 6-45	CV(t) frente a XCV. Proyecto que comienza con adelanto respecto de su planificación y que finaliza con retraso.....	243

Índice de Tablas

Tabla 4-1 Descripción de actividades	113
Tabla 5-1 Descripción de actividades	150
Tabla 5-2 Temperaturas por años y meses en la ciudad de Valladolid.....	152
Tabla 5-3 Índice de Criticidad.....	162
Tabla 5-4 Índice de Crucialidad	164
Tabla 5-5 Schedule Sensitivity Index	168
Tabla 5-6 Descripción de actividades	173
Tabla 5-7 Descripción de actividades	187
Tabla 6-1 Descripción de actividades. Funciones de distribución normal.....	197
Tabla 6-2 Descripción de actividades. Funciones de distribución exponencial.....	198
Tabla 6-3 Coste acumulado del proyecto por cada periodo de ejecución.....	202

Índice de Ecuaciones

$$SV=EV-PV$$

donde:

SV → Schedule Variance (Varianza de Programación)

EV → Earned Value (Valor Ganado)

PV → Planned Value (Valor Planificado)

_____ [Ecuación 4-1].....95

$$SPI=EV/PV$$

donde:

SPI → Schedule Performance Index (Índice de Rendimiento de Programación)

EV → Earned Value (Valor Ganado)

PV → Planned Value (Valor Planificado)

_____ [Ecuación 4-2].....95

$$CV= EV-AC$$

donde:

CV → Cost Variance (Varianza de Coste)

EV → Earned Value (Valor Ganado)

AC → Actual Cost (Coste Actual)

_____ [Ecuación 4-3].....95

$$CPI=EV/AC$$

donde:

CPI → Cost Performance Index (Índice de Rendimiento de Coste)

EV → Earned Value (Valor Ganado)

AC → Actual Cost (Coste Actual)

_____ [Ecuación 4-4].....95

$$EAC=AC+PCWR$$

donde:

EAC → Estimated cost At Completion (Coste estimado a la finalización del
proyecto)

AC → Actual Cost (Coste Actual)

PCWR → Planned Cost of Work Remaining (Coste planificado del trabajo pendiente)
_____ [Ecuación 4-5].....97

$$EAC(t)=AD+PDWR$$

donde:

EAC(t) → Estimated Duration at Completion (Duración estimada para la terminación del proyecto)
AD → Actual Duration (Duración Actual)
PDWR → Planned Duration of Work Remaining (Duración prevista de trabajo restante)
_____ [Ecuación 4-6].....97

$$SV(t) = ES - AT$$

donde:

SV(t) → Earned Schedule Variance (Varianza de Programación Ganada)
ES → Earned Schedule (Programación Ganada)
AT → Actual Time (Tiempo Actual)

$$SPI(t) = ES / AT$$

donde:

SPI(t) → Schedule Performance Index(t) (Índice de Rendimiento de Programación Ganada)
ES → Earned Schedule (Programación Ganada)
AT → Actual Time (Tiempo Actual)
_____ [Ecuación 4-7].....98

$$EAC(t)=AD+PDWR$$

donde:

EAC(t) → Estimated Duration at Completion (duración estimada a la finalización)
AD → Actual Duration (Duración Actual)
PDWR → Planned Duration of Work Remaining (Duración prevista del trabajo pendiente)
_____ [Ecuación 4-8].....99

$$SPB_r = P90\text{-}Schedule_Mean$$

donde:

SPB_r → *Schedule Project Buffer* (Buffer de Programación del Proyecto)
P90 → Percentil 90
Schedule_Mean → Valor Medio de programación
_____ [Ecuación 4-9].....107

$$ws_t = SRB_t - SRB_{t-1}$$

donde:

- $ws_t \rightarrow$ weight Schedule (peso de programación)
- $SRB_t \rightarrow$ Schedule Risk Baseline (Línea Base de Riesgo en instante t)
- $SRB_{t-1} \rightarrow$ Schedule Risk Baseline (Línea Base de Riesgo en instante de tiempo t-1)

$$\sum_{t=1}^T ws_t = \sigma_{ps}^2$$

donde:

- $ws_t \rightarrow$ weight Schedule (peso de programación)
- $\sigma_{ps}^2 \rightarrow$ Varianza de programación

[Ecuación 4-10].....108

$$SBf_t = ws_t * \frac{SPBf}{\sigma_{ps}^2}$$

donde:

- $SBf_t \rightarrow$ Buffer de Programación en instante t
- $ws_t \rightarrow$ weight Schedule (peso de programación en instante t)
- $\sigma_{ps}^2 \rightarrow$ Varianza de programación

[Ecuación 4-11].....108

$$ASBf_t = SBf_t + ASBf_{t-1}$$

donde:

- $ASBf_t \rightarrow$ Buffer Acumulado de Programación en instante t
- $SBf_t \rightarrow$ Buffer de Programación en instante t
- $ASBf_{t-1} \rightarrow$ Buffer Acumulado de Programación en instante t-1

[Ecuación 4-12].....108

$$SCoI_t = ASBf_t + SV(t) = ASBf_t + ES - AT$$

donde:

- $SCoI_t \rightarrow$ Schedule Control Index (Índice de Control de Programación, instante de tiempo t)
- $ASBf_t \rightarrow$ Buffer Acumulado de Programación en instante t
- $SV(t) \rightarrow$ Varianza de Programación Ganada
- $ES \rightarrow$ Earned Schedule (Programación Ganada)
- $AT \rightarrow$ Actual Time (Tiempo Actual)

$$CCoI_t = ACBf_{(t=ES)} + CV_t = ACBf_{(t=ES)} + EV - AC$$

donde:

- $CCoI_t \rightarrow$ Cost Control Index (Índice de Control de Costes, instante de tiempo t)
- $ACBf_{(t=ES)} \rightarrow$ Buffer Acumulado de Coste en instante t=ES
- $CV_t \rightarrow$ Varianza de Coste en instante t

$$\frac{\begin{array}{l} \text{EV} \rightarrow \text{Earned Value (Valor Ganado)} \\ \text{AC} \rightarrow \text{Actual Cost (Coste Actual)} \end{array}}{\text{[Ecuación 4-13].....110}}$$

Duración Ai=(Act a ejecutar)/(Uds de Recurso x Tasa por Ud de Rec.)

donde:

$$\frac{\begin{array}{l} \text{Duración Ai} \rightarrow \text{Duración Actividad Ai} \\ \text{Act a ejecutar} \rightarrow \text{Cantidad de actividad a realizar} \\ \text{Uds de Recurso} \rightarrow \text{Unidades de mano de obra inicialmente previstos para la} \\ \text{realización de la actividad} \\ \text{Tasa por Ud de Rec} \rightarrow \text{Promedio de la cantidad de trabajo realizado por una} \\ \text{unidad de recurso en un período de tiempo} \end{array}}{\text{[Ecuación 4-14].....114}}$$

Coste Ai=Dur Prev. x (C. MObra+C. fijo) + Act ejecut x C. MPrimas

donde:

$$\frac{\begin{array}{l} \text{Coste Ai} \rightarrow \text{Coste Actividad Ai} \\ \text{Dur Prev} \rightarrow \text{Duración Ai} \\ \text{C. MObra} \rightarrow \text{Coste de Mano de Obra recurso Actividad Ai} \\ \text{C. fijo} \rightarrow \text{Costes fijos por periodo de tiempo de trabajo} \\ \text{Act ejecut} \rightarrow \text{Cantidad de actividad a realizar} \\ \text{C. MPrimas} \rightarrow \text{Costo de la materia prima utilizada} \end{array}}{\text{[Ecuación 4-15].....115}}$$

SPBf =Percentil-Schedule Mean

donde:

$$\frac{\begin{array}{l} \text{SPBf} \rightarrow \text{Schedule Project Buffer (Buffer de Programación total del Proyecto)} \\ \text{Percentil} \rightarrow \text{Percentil de Programación} \\ \text{Schedule Mean} \rightarrow \text{Valor Medio de Duración Total de Proyecto} \end{array}}$$

CPBf = Percentil-Cost Mean

donde:

$$\frac{\begin{array}{l} \text{CPBf} \rightarrow \text{Cost Project Buffer (Buffer de Coste total del Proyecto)} \\ \text{Percentil} \rightarrow \text{Percentil de Coste} \\ \text{Cost Mean} \rightarrow \text{Valor Medio de Coste Total de Proyecto} \end{array}}{\text{[Ecuación 4-16].....134}}$$

SPBf =Percentil- PV Schedule

donde:

$$\frac{\begin{array}{l} \text{SPBf} \rightarrow \text{Schedule Project Buffer (Buffer de Programación total del Proyecto)} \\ \text{Percentil} \rightarrow \text{Percentil de Programación} \\ \text{PV Schedule} \rightarrow \text{Valor Planificado de Duración Total del Proyecto} \end{array}}$$

$$CPBf = \text{Percentil- PV cost}$$

donde:

CPBf → *Cost Project Buffer (Buffer de Coste total del Proyecto)*

Percentil → Percentil de Coste

PV cost → Valor Planificado de Coste Total de Proyecto

[Ecuación 4-17].....134

$$SPBf_{\max} = P_{S_{\max}} - PVs$$

donde:

SPBf_{max} → *Buffer de Programación de Proyecto máximo, para proyectos en retraso*

P_{Smax} → Percentil de programación para proyectos en retraso

PVs → Valor Planificado de Duración Total del Proyecto

$$SPBf_{\min} = PVs - P_{S_{\min}}$$

donde:

SPBf_{min} → *Buffer de Programación de Proyecto mínimo, para proyectos en adelanto*

PVs → Valor Planificado de Duración Total del Proyecto

P_{Smin} → Percentil de programación para proyectos en adelanto

$$CPBf_{\max} = C_{C_{\max}} - PVc$$

donde:

CPBf_{max} → *Buffer de Coste de Proyecto máximo, para proyectos con sobrecoste*

C_{Cmax} → Percentil de coste para proyectos con sobrecoste

PVc → Valor Planificado de Coste Total del Proyecto

$$CPBf_{\min} = PVc - P_{C_{\min}}$$

donde:

CPBf_{min} → *Buffer de Coste de Proyecto mínimo, para proyectos con infracoste*

PVc → Valor Planificado de Coste Total del Proyecto

P_{Cmin} → Percentil de coste para proyectos con infracoste

[Ecuación 4-18].....135

$$SPBf_{\text{sum}} = SPBf_{\max} + SPBf_{\min}$$

donde:

SPBf_{sum} → *Buffer de Programación de Proyecto total*

SPBf_{max} → *Buffer de Programación de Proyecto máximo, para proyectos en retraso*

SPBf_{min} → *Buffer de Programación de Proyecto mínimo, para proyectos en adelanto*

$$CPBf_{sum} = CPBf_{max} + CPBf_{min}$$

donde:

- CPBf_{sum} → *Buffer* de Coste de Proyecto total
 - CPBf_{max} → *Buffer* de Coste de Proyecto máximo, para proyectos con sobrecoste
 - CPBf_{min} → *Buffer* de Coste de Proyecto mínimo, para proyectos con infracoste
-
- [Ecuación 4-19].....135

$$SBf_{maxt} = w_{st} * SPB_{max} / \sigma_s^2$$

donde:

- SBf_{maxt} → *Buffer* de Programación de Proyecto máximo, para proyectos en retraso, instante t
- w_{st} → Peso de programación instante t
- SPB_{max} → *Buffer* de Programación de Proyecto máximo, para proyectos en retraso
- σ_s² → Varianza de Programación

$$SBf_{mint} = w_{st} * SPB_{min} / \sigma_s^2$$

donde:

- SBf_{mint} → *Buffer* de Programación de Proyecto mínimo, para proyectos en adelanto, instante t
- w_{st} → Peso de programación instante t
- SPB_{min} → *Buffer* de Programación de Proyecto mínimo, para proyectos en adelanto
- σ_s² → Varianza de Programación

$$CBf_{maxt} = w_{ct} * CPB_{max} / \sigma_c^2$$

donde:

- CBf_{maxt} → *Buffer* de Coste de Proyecto, para proyectos con sobrecoste, instante t
- w_{ct} → Peso de coste instante t
- CPB_{max} → *Buffer* de Coste de Proyecto máximo, para proyectos con sobrecoste
- σ_c² → Varianza de Coste

$$CBf_{mint} = w_{ct} * CPB_{min} / \sigma_c^2$$

donde:

- SBf_{mint} → *Buffer* de Coste de Proyecto, para proyectos con infracoste, instante t
- w_{st} → Peso de coste instante t
- SPB_{min} → *Buffer* de Programación de Proyecto mínimo, para proyectos con infracoste

$\sigma_s^2 \rightarrow$ Varianza de Coste

[Ecuación 4-20].....136

$$ASBf_{\max t} = SBf_{\max t} + ASBf_{\max t-1}$$

donde:

$ASBf_{\max t} \rightarrow$ Buffer Acumulado de Programación de Proyecto máximo, para proyectos en retraso, instante t

$SPB_{\max} \rightarrow$ Buffer de Programación de Proyecto máximo, para proyectos en retraso, instante t

$ASBf_{\max t-1} \rightarrow$ Buffer Acumulado de Programación de Proyecto máximo, para proyectos en retraso, instante t-1

$$ASBf_{\min t} = SBf_{\min t} + ASBf_{\min t-1}$$

donde:

$ASBf_{\min t} \rightarrow$ Buffer Acumulado de Programación de Proyecto mínimo, para proyectos en adelanto, instante t

$SBf_{\min t} \rightarrow$ Buffer de Programación de Proyecto $ASBf_{\min t}$, para proyectos en adelanto, instante t

$ASBf_{\min t-1} \rightarrow$ Buffer Acumulado de Programación de Proyecto mínimo, para proyectos en adelanto, instante t-1

$$ACBf_{\max t} = CBf_{\max t} + ACBf_{\max t-1}$$

donde:

$ACBf_{\max t} \rightarrow$ Buffer Acumulado de Coste de Proyecto máximo, para proyectos con sobrecoste, instante t

$CBf_{\max t} \rightarrow$ Buffer de Coste de Proyecto máximo, para proyectos con sobrecoste, instante t

$ACBf_{\max t-1} \rightarrow$ Buffer Acumulado de Coste de Proyecto máximo, para proyectos con sobrecoste, instante t-1

$$ACBf_{\min t} = CBf_{\min t} + ACBf_{\min t-1}$$

donde:

$ACBf_{\max t} \rightarrow$ Buffer Acumulado de Coste de Proyecto mínimo, para proyectos con infracoste, instante t

$CBf_{\max t} \rightarrow$ Buffer de Coste de Proyecto mínimo, para proyectos con infracoste, instante t

$ACBf_{\max t-1} \rightarrow$ Buffer Acumulado de Coste de Proyecto mínimo, para proyectos con infracoste, instante t-1

[Ecuación 4-21].....136

$$ASBf_{\text{sumt}} = ASBf_{\max t} + ASBf_{\min t}$$

donde:

$ASBf_{\text{sumt}} \rightarrow$ Buffer Acumulado de Programación de Proyecto total

ASBf_{maxt} → *Buffer* Acumulado de Programación de Proyecto máximo, para proyectos con retraso
 ASBf_{mint} → *Buffer* Acumulado de Programación de Proyecto mínimo, para proyectos con adelanto

$$ACBf_{sumt} = CBF_{maxt} + ACBf_{mint}$$

donde:

ACBf_{sumt} → *Buffer* Acumulado de Coste de Proyecto total
 CBF_{maxt} → *Buffer* Acumulado de Coste de Proyecto máximo, para proyectos con sobrecoste
 ACBf_{mint} → *Buffer* Acumulado de Coste de Proyecto mínimo, para proyectos con infracoste

[Ecuación 4-22].....136

$$SCoI_t = ASBf_{maxt} + SV(t) = ASBf_{maxt} + ES - AT$$

donde:

SCoI_t → *Schedule Control Index* (Índice de Control de Programación, instante de tiempo t)
 ASBf_{maxt} → *Buffer* Acumulado de Programación de Proyecto máximo, para proyectos con retraso, en instante t
 SV(t) → Varianza de Programación Ganada
 ES → *Earned Schedule* (Programación Ganada)
 AT → *Actual Time* (Tiempo Actual)

$$CCoI_t = ACBf_{max(t=ES)} + CV_t = ACBf_{max(t=ES)} + EV - AC$$

donde:

CCoI_t → *Cost Control Index* (Índice de Control de Costes, instante de tiempo t)
 ACBf_{max(t=ES)} → *Buffer* Acumulado de Coste de Proyecto máximo, para proyectos con sobrecoste, en instante t=ES
 CV_t → Varianza de Coste en instante t
 EV → *Earned Value* (Valor Ganado)
 AC → *Actual Cost* (Coste Actual)

[Ecuación 4-23].....136

$$SSI = \left[\frac{\text{Var}(d_i)}{\text{Var}(C_{max})} \right] \cdot CI$$

donde:

SSI → *Schedule Sensitivity Index* (Índice de Sensibilidad de Coste)
 Var(d_i) → Varianza de la duración de la actividad ai
 Var(C_{max}) → Varianza de la duración total del Proyecto
 CI → *Criticality Index* (Índice de Criticidad)

[Ecuación 5-1].....161

Anexo: Publicaciones

En este apartado se relacionan los trabajos publicados en revista y congresos a lo largo de todo el periodo que ha durado la investigación. Como resumen podemos indicar que:

- Se ha publicado un artículo en una revista científica especialista en Dirección de Proyectos (International Journal of Project Management), con índice de impacto JCR 1,758. Citado 8 veces.

- Se han publicado dos artículos en una revista científica indexada SCOPUS (Procedia - Social and Behavioral Sciences), con índice SJR 0,147. Citados 5 veces.

- Se han seleccionado dos artículos como Selected Papers para su inclusión en Lecture Notes in Management and Industrial Engineering (Springer).

- Se han publicado seis artículos en International Congress on Project Management and Engineering (AEIPRO), desde 2010 hasta 2015.

- Se han publicado cuatro artículos en International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management (CIO), desde 2010 hasta 2012.

- Se han publicado dos artículos en International Construction and Engineering Project Management Workshop (CEPMaW), años 2010 y 2012.

- Se ha obtenido el **Accesit Premio del Consejo General de Colegios Oficiales de Ingenieros Industriales**, en International Congress on Project Management and Engineering (AEIPRO) celebrado en Alcañiz (Teruel) en 2014.

Publicaciones en Revistas:

- Acebes, Fernando, Javier Pajares, José Manuel Galán, & Adolfo López-Paredes. 2014a. "A New Approach for Project Control under Uncertainty. Going back to the Basics." *International Journal of Project Management* 32:423–34.
- Acebes, Fernando, Javier Pajares, José Manuel Galán, & Adolfo López-Paredes. 2014b. "Exploring the Influence of Seasonal Uncertainty in Project Risk Management." *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 119:329–38.
- Acebes, Fernando, Javier Pajares, José Manuel Galán, & Adolfo López-Paredes. 2013a. "Beyond Earned Value Management: A Graphical Framework for Integrated Cost, Schedule and Risk Monitoring." *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 74:231–39.

Publicaciones en Editoriales:

- Acebes, Fernando, Javier Pajares, José Manuel Galán, & Adolfo López-Paredes. 2015 (in press). "A project monitoring and control system using EVM and Monte Carlo simulation" *Lecture Notes in Management and Industrial Engineering. Selected Papers from the 18th International AEIPRO Congress held in Alcañiz (Teruel), Spain, in 2014.* Springer
- Acebes, Fernando, Javier Pajares, José Manuel Galán, & Adolfo López-Paredes. 2013b. "Exploring the Relations between Project Duration and Activity Duration." *Lecture Notes in Management and Industrial Engineering. Selected Papers from the 17th International AEIPRO Congress held in Logroño, Spain, in 2013.* Springer

Artículos presentados en Congresos Internacionales:

IPMA (International Project Management Association):

- Acebes, Fernando, Javier Pajares, José Manuel Galán, & Adolfo López-Paredes. 2014b. "Exploring the Influence of Seasonal Uncertainty in Project Risk Management." *Selected papers from the 27th IPMA (International Project Management Association), World Congress, Dubrovnik, Croatia, 2013*
- Acebes, Fernando, Javier Pajares, José Manuel Galán, & Adolfo López-Paredes. 2013a. "Beyond Earned Value Management: A Graphical Framework for Integrated Cost, Schedule and Risk Monitoring." *Selected papers from the 26th IPMA (International Project Management Association), World Congress, Crete, Greece, 2012*

AEIPRO (Asociación Española de Dirección e Ingeniería de Proyectos):

- Acebes, Fernando, Javier Pajares, & Adolfo López-Paredes. 2015. "Project Risk Management Desde la Gestión del Riesgo a la gestión de la Incertidumbre." (in press) In XIX International Congress on Project Management and Engineering. Granada.
- Acebes, Fernando, Javier Pajares, José Manuel Galán, & Adolfo López-Paredes. 2014c. "Monitorización Y Control de Proyectos Utilizando Metodología de Valor Ganado Y Simulación de Monte Carlo." In XVIII International Congress on Project Management and Engineering. Alcañiz (Teruel). Accesit Premio del Consejo General de Colegios Oficiales de Ingenieros Industriales.
- Acebes, Fernando, Javier Pajares, José Manuel Galán, & Adolfo López-Paredes. 2013b. Explorando la Relación existente entre la Duración del Proyecto y la Duración de las Actividades. In XVII International Congress on Project Management and Engineering. Logroño: AEIPRO.
- Acebes, Fernando, Javier Pajares, & Adolfo López-Paredes. 2012b. "Un Entorno Gráfico Para El Control de Proyectos Con Incertidumbre." in XVI International Congress on Project Management and Engineering. Valencia - España.
- Acebes, Fernando, Javier Pajares, & Adolfo López-Paredes, 2011b. "Integración del riesgo estacional a la incertidumbre en los proyectos". In XV International Congress on Project Management and Engineering. Huesca - España.
- Acebes, Fernando, Javier Pajares, & Adolfo López-Paredes, 2010a. "Estudio del Schedule Control Index para el control integrado de plazo en proyectos". In XIV International Congress on Project Management and Engineering. Madrid - España.

CIO (Congreso de Ingeniería en Organización):

- Acebes, Fernando, Manuel Paz, Javier Pajares, & Adolfo López-Paredes. 2012a. "Duración Del Proyecto E Incertidumbre." In XVI International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. Vigo - España.
- Acebes, Fernando, Javier Pajares, & Adolfo López-Paredes. 2012a. "Seguimiento Y Control de Proyectos Con Incertidumbre." Seguimiento y Control de Proyectos con Incertidumbre. In XVI International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. Vigo - España.
- Acebes, Fernando, Javier Pajares, & Adolfo López-Paredes. 2011a. "Influencia Del Riesgo Estacional En La Línea Base de Riesgos Del Proyecto." In XV International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. Cartagena (Murcia) - España.
- Acebes, Fernando, Javier Pajares, & Adolfo López-Paredes. 2010b. "Estudio del SCOI para el control integrado del plazo en los proyectos". In XIV International

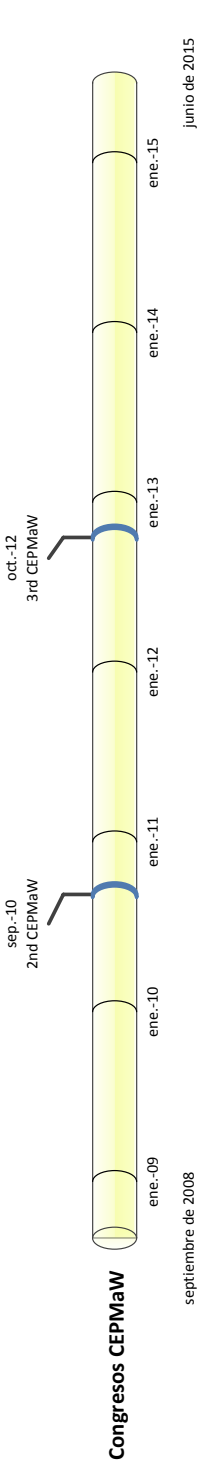
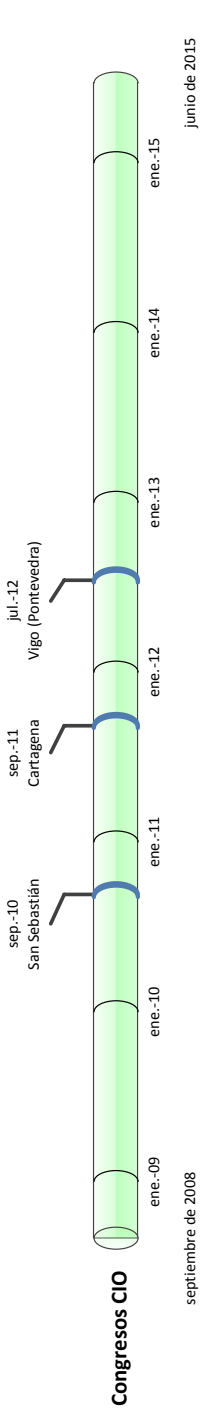
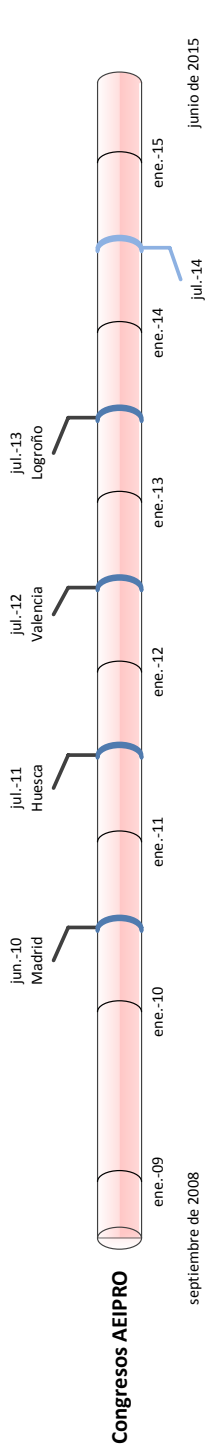
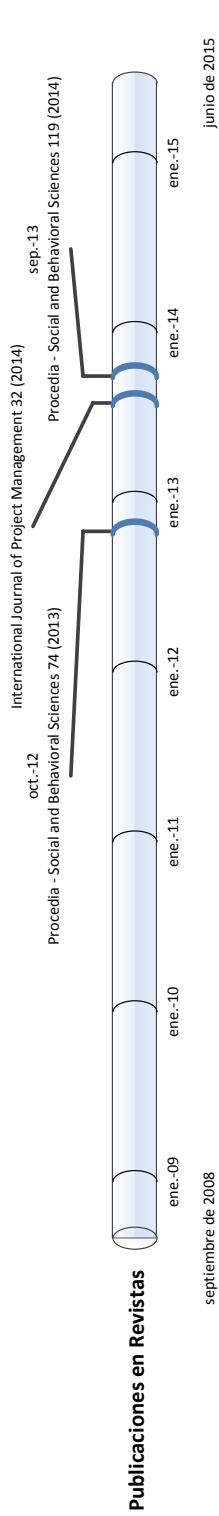
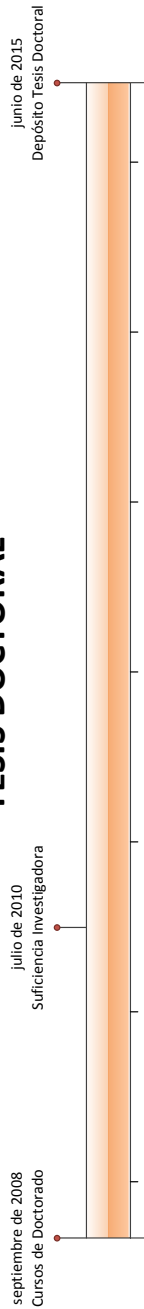
Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. *San Sebastián - España*.

CEPMAW (International Construction and Engineering Project Management Workshop):

Acebes, Fernando, Manuel Paz, Javier Pajares, & Adolfo López-Paredes. 2012b. "Sensibilidad de la duración del Proyecto respecto a la duración de las Actividades". Pp. 111–18 In 3rd International Construction and Engineering Project Management Workshop. Valladolid - España.

Acebes, Fernando, Javier Pajares, & Adolfo López-Paredes. 2010c. "Integrating Risk within the Cost-Schedule integrated project control system". Pp. 111–124 In 2nd International Construction and Engineering Project Management Workshop. Valladolid - España.

TESIS DOCTORAL





Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

International Journal of Project Management 32 (2014) 423–434

International Journal of
Project
Management
www.elsevier.com/locate/ijproman



A new approach for project control under uncertainty. Going back to the basics

Fernando Acebes^{a,*}, Javier Pajares^{a,*}, José Manuel Galán^b, Adolfo López-Paredes^a

^a INSISOC, University of Valladolid, Faculty of Engineering, Pso del Cauce 59, 47011 Valladolid, Spain

^b INSISOC, University of Burgos, Faculty of Polytechnic Engineering, C/Villadiego s/n, 09001 Burgos, Spain

Received 26 February 2013; received in revised form 18 June 2013; accepted 13 August 2013

Abstract

In this paper we propose a new methodology for project control under uncertainty. In particular, we integrate Earned Value Methodology (EVM) with project risk analysis. The methodology helps project managers to know whether the project deviations from planned values are within the “expected” deviations derived from activity planned variability. Although the methodology is new and innovative, we only go back to the fundamentals of project simulation to generate the “universe” of possible projects, according to the assumed variability of project activities. Then we organize and gather the information in order to make the data coherent with EVM. We explain the steps to implement the methodology and we show three case studies. The methodology makes explicit that the schedule and budget resulting from traditional methods like PERT are statistically very optimistic.

© 2013 Elsevier Ltd. APM and IPMA. All rights reserved.

Keywords: Project Management; Earned Value Management; Project control; Monte Carlo simulation; Project risk management

1. Introduction

Project control consists in the comparison of a plan or baseline with the actual results of the project to identify deviations and activate early corrective actions if needed. Earned Value Management (EVM) is a widely used project management methodology for project control, as it integrates scope, time and cost control under the same framework (Abba and Niel, 2010; Anbari, 2003; Blanco, 2013; Burke, 2003; Cioffi, 2006; Fleming and Koppelman, 2005; Henderson, 2003; Henderson, 2004; Jacob, 2003; Jacob and Kane, 2004; Kim et al., 2003; Lipke, 1999; Lipke, 2003; Lipke, 2004b; McKim et al., 2000).

Anbari (2003), Fleming and Koppelman (2005) and PMI (2005) explain the main features of the methodology and how

to implement it. Several authors have improved the traditional EV by enhancing its capability in evaluating and monitoring project progress (Naeni et al., 2011; Navon, 2005; Vanhoucke and Vandevoorde, 2007; Warburton, 2011). It is not surprising that EV has been applied to many different disciplines and projects (Al-Jibouri, 2003; Chen and Zhang, 2012; Gowan et al., 2006; Hanna, 2012; Kwak and Anbari, 2012; Naderpour and Mofid, 2011).

Succinctly, EVM is based on the representation of three measures: First, the budgeted cost for work scheduled (BCWS) also called planned value (PV); second, the actual cost for work performed (ACWP) also called actual cost (AC); and finally, the budgeted cost for work performed (BCWP) or earned value (EV).

The Earned Value Management indicators are derived from the three previous values: Cost variance ($CV = EV - AC$) and schedule variance ($SV = EV - PV$). A positive variance indicates in the case of CV that the project is under budget and in the case of SV, ahead of schedule. On the other hand, a negative variance might be a warning of a problematic situation, showing

* Corresponding author. Tel.: +34 983185954.

E-mail addresses: facebes@yahoo.es (F. Acebes), pajares@insisoc.org (J. Pajares), jmgalan@ubu.es (J.M. Galán), insisoc@gmail.com (A. López-Paredes).

that project is behind schedule or exceeding the planned budget. In order to compare projects with different sizes, the Performance Indexes are defined: Cost Performance Index ($CPI = EV / AC$) and Schedule Performance Index ($SPI = EV / PV$). Performance Indexes are below 1 whenever the variances are below 0. Variables and variances can be represented graphically (see Fig. 1), helping project managers to monitor project evolution. The graphical representation of PV is the project cost baseline.

Lipke (2003, 2004a) introduced a new measure, the Earned Schedule (ES), defined as the date when the current earned value should have been achieved. ES is calculated by projecting the EV on the PV curve. Once ES is determined, time-based indicators can be easily derived from $SV(t) = ES - AT$ and the corresponding ratio measure $SPI(t) = ES / AT$, where AT is the actual time defined as the elapsed time since the beginning of the project.

Given the non-repetitive nature of projects, uncertainty and risk are at the very core of Project Management, and project managers are used to face project delays (and over-costs) beyond the planned values; consequently project managers need methodologies to take decisions under project uncertainty. The typical way to incorporate this uncertainty in project modeling is by means of stochastic networks where activity costs and durations are not deterministic but follow certain probability distributions.

But traditional EVM assumes certainty about the durations and costs of project activities. For this reason, EVM reports the project manager whether the project has overruns (costs, delays) or it is running better than planned, but the methodology does not specify whether the deviation from planned values is within (or not) the possible deviations derived from the expected variability of the project. In other words, perhaps the project is delayed from planned values (computed, for instance, by means of CPM (Kelley, 1961; Kelley and Walker, 1989) or PERT (Fazar, 1959; Malcolm et al., 1959) methodologies), but the delay could remain within the possible (and most probable) range of delays, taking into account the intrinsic variability of activities. Alternatively, the project delay (or over-cost) could be higher than the possible values of delay, so that some changes have taken place in the project and some conditions have changed from the planned conditions of activities variability.

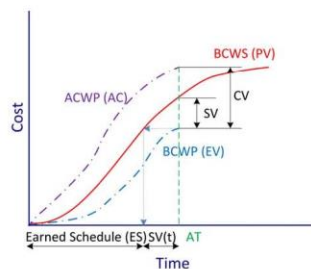


Fig. 1. EVM main variables and variance.

The inclusion of project variability in control methodologies in general, and EVM in particular is becoming an interesting research topic within academics.

Barraza et al. (2004) applied stochastic S-curves to determine forecasted project estimates. Later, Barraza and Bueno (2007) introduced a probabilistic project control concept by extending the performance control limit curves to derive an acceptable forecast of final project performance.

The implications of this stochastic approach in EVM have been recently incorporated by means of fuzzy approaches (Naeni et al., 2011). They developed fuzzy control charts to monitor several EV indexes, and provided a transformation method based on fuzzified indexes. Leu and Lin (2008) improved the performance of traditional EV by implementing the statistical quality control charts. They implemented individual control charts to monitor project performance data, and provided a log transformation method. Finally, Aliverdi et al (2013) apply statistical quality control charts to monitor earned value indexes.

Vanhoucke (2011) suggested monitoring projects with two approaches: top-down, based on earned value metrics; and bottom-up, based on the schedule risk analysis method. Vanhoucke (2012) studied the reasons why EVM and schedule risk analysis give better results in some projects than in others. Hazir and Shtub (2011) explored the relation between information presentation and project control and they developed simulation software to face with uncertain environments.

By means of Monte Carlo simulation, we can compute the statistical distribution functions of project cost and duration when the project is finished. Therefore, at the end of the project, we can know, within a particular confidence level, whether the project finished or not within the “expected variability” (project under control), and, as a consequence, we can compute buffers for the project to be under control at the end of the project. However, project managers do not want to wait until the end of the project to know whether the project is under control: They need to know it during project runtime, in order to take decisions and corrective actions whenever delays (or over-costs) are out of the expected values.

In order to answer the former question, Pajares and López-Paredes (2011) suggested to split the final project buffer into small buffers for every time interval, being the interval buffers proportional to the risk reduced at the particular time interval. To this aim, they defined the concept of risk baseline as the “the evolution of ‘project risk value’ through project execution lifecycle. The risk of the project at any given time is calculated as the risk of the project pending tasks (those not yet completed), assuming that the project has performed as planned until that given time” (statistical variance can be used as a measure of risk, both for duration and cost). The risk reduced at any particular interval can be computed as the difference between the values of the risk baseline within the interval.

Pajares and López-Paredes (2011) linked the interval buffers to EVM methodology by comparing cumulative buffers with cost and time variances at any time. They define two new control indexes that showed whether the project was under control (cost, time) or not. Finally, using these indicators,

Acebes et al. (2013) propose a graphical framework where they represent the schedule and cost control indexes to monitor and control projects with uncertainty.

In this paper, we propose an extremely different approach. We go back to the fundamentals and we use Monte Carlo simulation to obtain the “universe” of possible different project runs (at least a significant quantity). Then, for every “possible” project j (every simulation), we define triads (x, T_{xj}, C_{xj}) , where x is the percentage of completion, $C_{xj} = x * C_j$ is the money spent when the project has been completed at $x\%$ (within simulation j); T_{xj} is the time when the cost C_{xj} was achieved and C_j is the total project cost in the j -th simulation.

For the particular case of $x = 1$, we obtain the set of points (the distribution functions) of cost and duration at the end of the project (project 100% completed). Therefore, our methodology is an extension of the traditional one, with different percentages of project completion, so that we obtain the distribution functions (and confidence intervals) of cost and duration at any percentage of project completion.

In order to make the use of the methodology easier, we split the triad into a couple of two dimensional graphs (time, x) and (x , cost). When the project is running, we represent within these graphs where the project is, so that we can know whether project cost or duration is under control at any time for a given level of confidence.

The methodology is coherent with EVM, and the data and variances from EVM can be easily translated into the graphs. Indeed, this new approach does not need more data than the information provided by EVM and the variability of project activities. And computations are easily implemented by means of common software.

As far as we understand, one of the main advantages of this new approach is that we combine two methodologies which are familiar to project managers: EVM and Monte Carlo simulation. Combining both methodologies we integrate risk management with the EVM methodology, in other words, we integrate control and risk under the same framework.

Although we use Monte Carlo simulation to generate the “universe” of possible projects, the innovation of our approach is that we arrange the information in order to know whether the project is within the expected variability at any time. We also arrange the data, so that it is coherent with “EVM variables”.

The rest of the paper is organized as follows. In Section 2, we introduce the methodology, afterwards, in Section 3 we illustrate the method with three case studies. We finally conclude by summarizing the main contributions and requirements of the approach.

2. A new (and simple) approach to project control under uncertainty

In the new approach, we go back to the fundamentals of project simulation by Monte Carlo methodology. We simulate to get the “universe” of possible project realizations, and we group the information in terms of percentage of project completion.

Our aim is to know, whether the deviations (cost and durations) from planned values during project runtime are within the “planned” variability deducted from the variability of project activities. Assuming a particular statistical distribution function for the cost and duration of activities, we can compute the statistical functions of project duration and cost at the end of the project by means of Monte Carlo simulation (see Fig. 2). Although it could be evident, it can be useful for future explanations to realize that the output of the j -th simulation is a project finishing at time t_j and with a total cost of C_j , and it can be represented by a dot in Fig. 2, within the cost–time graph. If we consider thousands of project simulations, we get an “area” of possible project cost and duration, so that the statistical distributions can be computed, one for costs (the vertical distribution at the right side of Fig. 2) and durations (the horizontal one at the top). Once the distributions have been computed, it is possible to calculate confidence intervals and percentiles for cost (for example P_{d90} , P_{c70} , etc.) and duration (P_{d90} , P_{d70} , etc.), and also mean values (d_{mean} , C_{mean} , etc.) and any other statistical features, like the rectangular areas for a set of particular percentiles. For instance, in Fig. 2, we have represented a rectangle with the percentiles P_{d90} , P_{d10} , P_{c90} , and P_{c10} (bold rectangle) and P_{d70} , P_{d30} , P_{c70} , and P_{c30} (dot line rectangle) inside.

In the same way we proceed for the end of the project, now we wonder about the resulting “area” of dots in Fig. 2 drawn when the projects are, for instance, at one half of its realization. This means that, for the j -th simulation, we need to compute the time when the project cost spent reached $0.5 * C_j$.

In general, we define a triad (x, T_{xj}, C_{xj}) , where x is the percentage of completion (measured in terms of cost), $C_{xj} = x * C_j$ is the money spent when the project has been completed at $x\%$ (within simulation j); T_{xj} is the time when the cost C_{xj} was achieved and C_j is the total project cost in the j -th simulation. This definition of percentage completed is consistent with EVM methodology. It assumes that the cumulative planned cost of the performed tasks is an indicator of the

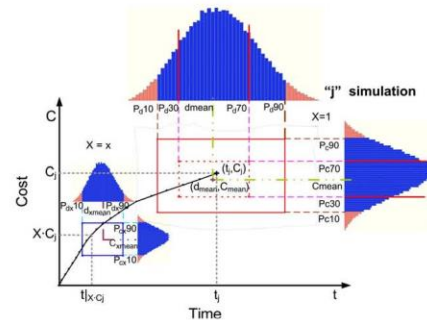


Fig. 2. Statistical features of project variability (cost and time) at the end of the project and at $x\%$ of compaction.

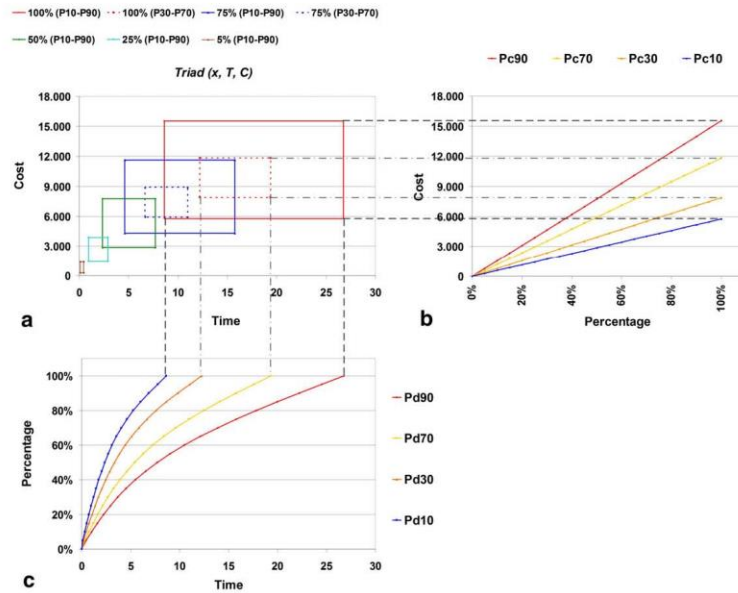


Fig. 3. Graphical representation: triad and projections (time and cost).

development of the work. Since $EV = \sum_{Start}^{Current} PV(\text{completed})$, then the percentage can be measured as EV/BAC , where BAC refers to budget at completion. Given this approach, in each particular simulated instance of the project we can compute the planned total cost of the project and track the percentage of the project back forward measuring the cost of the tasks that have been completed at any intermediate instant of the simulation. For every x , we will obtain the “area” of dots representing the projects that have been at $x\%$ of realization and, therefore, we can compute the statistical distributions for cost and duration at $x\%$ of project completion, and the corresponding percentiles $P_{xc90}, P_{xc70}, \dots, P_{xd90}, P_{xd70}$, etc. (distributions and rectangle at the down-left side of Fig. 2). The particular case of $x = 1$ represents the situation at the end of the project.

If we assume that some of the risks of the project come as a consequence of uncertainty, it is then important to figure out if the performance of the project is compatible with the random nature of the project or if on the contrary, divergences may be explained by means of the occurrence of unexpected events or the instability of the assumptions of the project planning stage. The methodology considers that the stochastic nature of the project can be modeled as probabilistic distributions of task duration and cost. The case studies used to illustrate the approach in this paper consider that task durations follow different distributions, and costs are function of duration, but the technique can be generalized for any dependent or independent random relations between cost and duration as

long as time-accumulated cost trajectories can be simulated. Under these assumptions the approach allows us estimate intermediate cost and duration distributions of the project, and this fact is the basis to understand the control approach. We want to know how the performance of the project is when we take into account the “random expected variability of the project” into the monitoring process of the project through EVM methodology. If the project is within the limits and confidence intervals of the project we assume that the variances can be explained by normal stochastic variability, but if the project is out of these limits the project manager has objective reasons for considering that something out of planning may be happening. The appropriate limits to send warning signals and to apply corrective measures depend on the specific context of the project, for instance, strict deadlines and due dates may need smaller control buffers.

2.1. Projections into cost and time figures

In order to make the methodology easy to use and coherent with the classical EVM, we split the representation of the triad (x, T_{xj}, C_{xj}) into a couple of graphs, one for time and the other for cost. We can see the projection in Fig. 3. Fig. 3a is the same with Fig. 2, emphasizing different rectangles representing different percentiles for several x values.

In Fig. 3c we represent the time projection. For a particular x , we compute the time corresponding with different percentiles

P_dD , $D \in [0,100]$ (in the particular case of Fig. 3c we show the results for P_d90 , P_d70 , P_d30 , P_d10). Then we join all the points for a particular percentile D , P_dD , for all $x \in [0,1]$, obtaining the curves in Fig. 3c.

In Fig. 3b we represent the cost projection. In this case, cost is represented in the y-axis and percentage (x) in the x-axis. For every x , we compute the cost corresponding to different cost percentiles P_cC , $C \in [0,100]$ and then we join the points for a

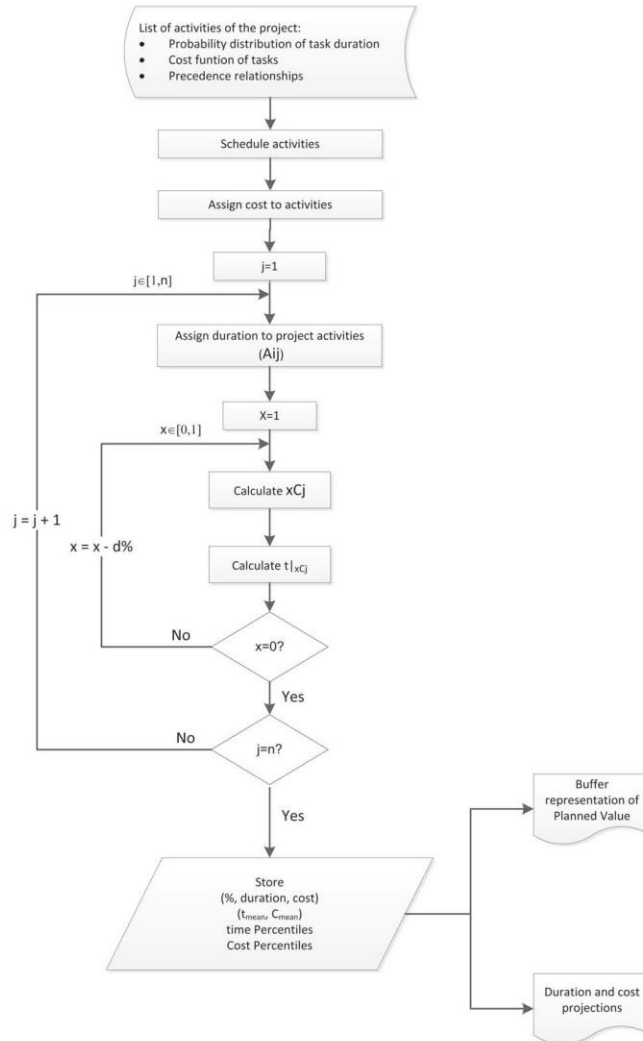


Fig. 4. Flow-chart of the methodology.

particular percentile P_cC for all $x \in [0,1]$. As cost is proportional to percentage completed, now we obtain straight lines.

We should keep in mind that Fig. 3 is built up during the project planning phase. The inputs to build the figures are only the cost and duration distribution functions of the activities and its precedence relations, that is, the common information needed for project scheduling and budgeting in uncertain environments; no more.

In Fig. 4, we show a flow-chart that sketches and summarizes the methodology. For scheduling the project, we can use any of the typical methodologies as CPM or PERT. The cost of activities is usually related to duration, depending on direct and indirect cost relations. By means of Monte Carlo simulation we generate stochastically compatible instances of the project, being each instance a possible realization with its duration and cost. Once the process has been repeated for a large number of instances (n) we can compute the average cost and duration, variances and percentiles for each percentage x of work performed in the project.

2.2. Using the new framework during project runtime

We first need to represent the planned value (cost baseline) in the graphical framework. The planned value (PV) can be represented directly in the cost-x plane (see Fig. 5a). To this aim, we project PV into the cost-x plane (Fig. 5b) and into the x-time plane (Fig. 5c). At any particular time t , the planned

value is PV_t , and therefore $x_t = PV_t / BAC$, being BAC the budget at completion (total project budget or planned value at the end of the project). Therefore, we can represent the points (x_t, PV_t) in Fig. 5b and (t, x_t) in Fig. 5c.

During project runtime, we have to compute AC and EV as it is commonly done in EVM. For $t = AT$ (actual time), the actual cost is AC_{AT} and $x_{AT} = EV_{AT} / BAC$. Therefore, we can draw the point (x_{AT}, AC_{AT}) in Fig. 5b and (AT, x_{AC}) in Fig. 5c. The definition of x_{AT} as the earned value divided by the budget at completion is at the very core of the assumptions of the Earned Value Methodology and has been previously used in literature (Vanhoucke, 2011). Since EV represents the budgeted cost for work performed and BAC is the final budgeted cost for work scheduled, EV / BAC measures the percentage of completed project normalized by the budgeted cost. Moreover, this definition is equivalent to the approach adopted to compute the advance of the project when we define the concept triads in the simulation part of the method, and consequently both quantities are comparable.

The black line in Fig. 5 represents the AC curve (performance), and the pink one is the evolution of PV, as it is usually represented in EVM. Differences in time from planned values are expressed in time units, as it happens when we use Earned Schedule (ES).

At $AT = 15$, $AC = 10240$ and $x = 75\%$, the project has over-costs, as the cost is higher than the PV projection at this time (Fig. 5b). But the project remains between the percentiles

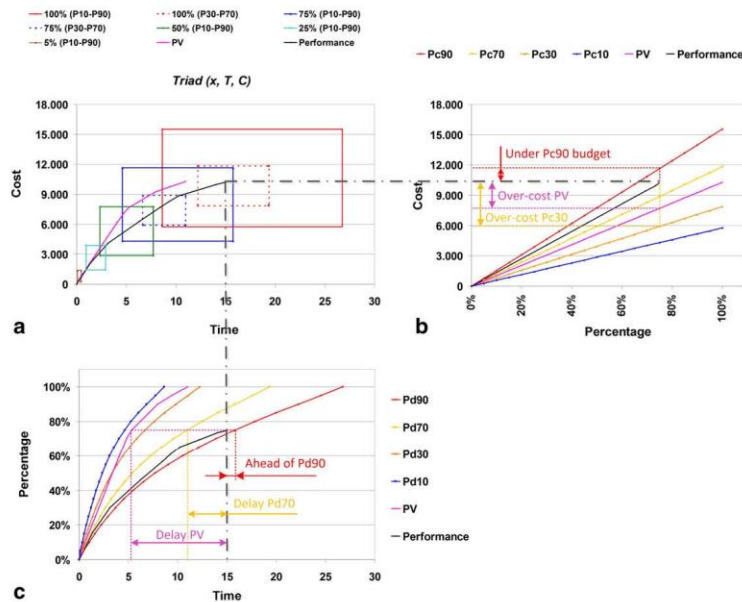


Fig. 5. Graphical framework during run time.

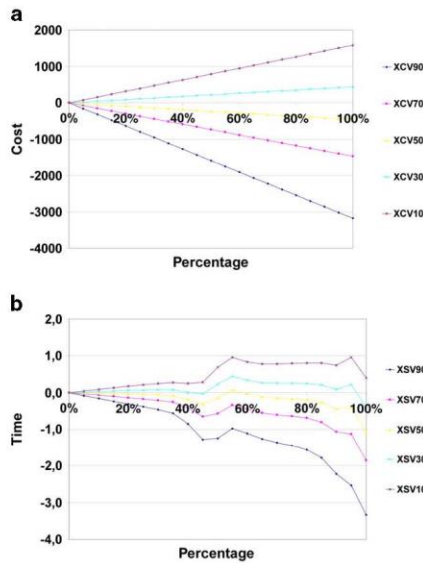


Fig. 6. a) XCV P confidence intervals for cost variance. b) XSV P confidence percentiles for earned schedule variance.

$P_{c,90}$ and $P_{c,70}$ (red and orange lines respectively). This means that, taking into account the assumed variability of the activity costs and durations, if we take a confidence interval of 90%, the project is under budget (remains under the 90% of confidence value). But if we narrow the confidence interval to 70% (orange line), the project is over-budget, the actual cost of the project at this time is higher than the 70% of the simulated projects. If the project manager decides to establish a 70% confidence level, he/she should wonder whether any important change has taken place with respect to the planned conditions.

In Fig. 5c, we see that the project is delayed at $AT = 15$ with respect to the planned value (PV around 5 in this case). But the project remains ahead of schedule whenever we consider a 90% confidence level. In other words, with the assumed variability of the activities, the project will remain at the left side of the red line in the 90% of the times. However, the project is outside the

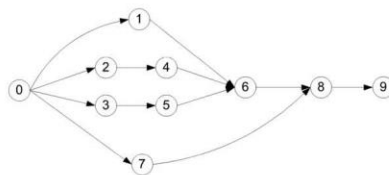


Fig. 7. AON network. Case study 1.

Table 1

Duration and cost of activities of case study 1. Duration of activities is modeled as exponential distributions. Variable cost depends on duration.

Id. activity	Duration (mean time) $1/\lambda_i$	Rate λ_i	Variance $(1/\lambda_i)^2$	Variable cost	Fixed cost
A1	5	0.20	25.00	380	50
A2	1	1.00	1.02	430	40
A3	3	0.33	9.09	370	40
A4	4	0.25	16.11	450	70
A5	2	0.50	4.03	350	50
A6	3	0.33	9.07	300	40
A7	8	0.13	64.38	280	30
A8	3	0.33	8.96	320	30

confidence interval of 70%. The project manager should decide what level of confidence to use, according to how narrow the control he/she wants to be.

Finally, we suggest a change of coordinates for those project managers who prefer to work with schedule and cost variances instead of absolute values. To this aim, we use the PV line as x-axis and we represent the deviations from PV line. We use the notation XCV P and XSV P to name the percentiles of Ps in terms of cost and schedule variance respectively (see Fig. 6). During project runtime, the traditional EVM cost variance can be directly represented in Fig. 6a, whereas the earned schedule variance (SV(t)) is represented in Fig. 6b.

3. Case studies

In this paper, we show the results of three case studies.¹ In these cases, we have drawn two PVs: the PV we get when we use PERT as scheduling method (we call it PV_{PERT}) and PV_{MEAN} , that is, the planned value we get by computing the mean value of all the simulations for a particular project progress x. It is important to notice that the methodology is general for any PV curve considered by the project manager. We illustrate the cases using PV_{PERT} and PV_{MEAN} because they are two usual scheduling techniques, but any other PV curve considered could be used as project benchmark.

3.1. Case study 1. Exponential distributions

In Fig. 7, we show the activity of node network for case study 1. Based on previous research conducted by Mummolo (1997) and Pontrandolfo (2000), in this network activity durations are modeled as exponential instead of normal distributions as the next case. The rationale behind this assumption rests on the high level of uncertainty of this type of distribution which highlights

¹ Case studies 2 and 3 have been chosen from project network literature, so that we can show and compare our results with networks previously used by other authors. We have looked for heterogeneity in the case studies in terms of probability distributions and network complexity. Both cases are inspired by Lambrechts et al. (2008) since the network topology highlights the role of parallel paths (3 paths in this case). In case study 2, we use normal distributions whereas in case study 3 we work with beta distributions. In the first case study the use of exponential distributions is inspired by Mummolo (1997) and Pontrandolfo (2000), which underlies the effect of high uncertainty.

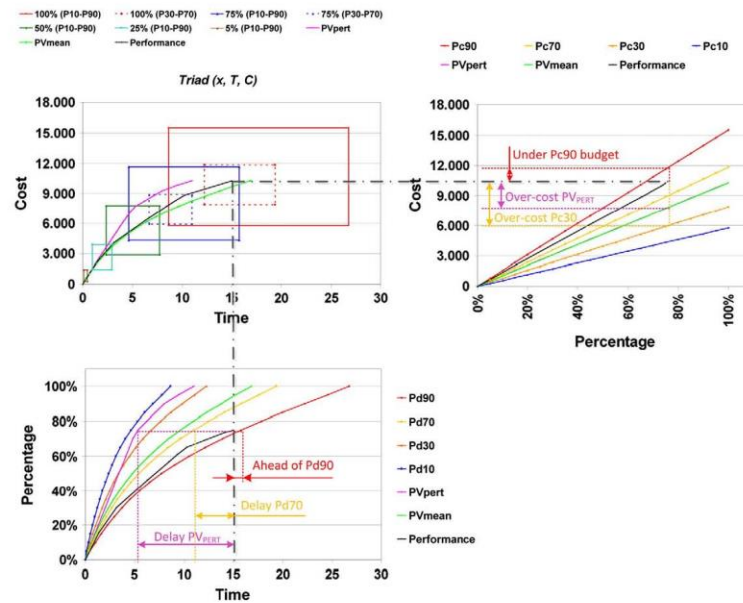


Fig. 8. Control framework for case study 1.

the difference in project forecasting with respect to PERT approach. Hazir and Shtub (2011) also use exponential distributions to show how format information presentation affects project control. Specific parameters used to model this case are described in Table 1. In Fig. 8, we represent graphically our results over 100,000 simulations. PV_{MEAN} and PV_{PERT} lines have been also represented.

According to PERT methodology, the total project expected duration should be 11 time units. However using Monte Carlo simulation, we find that the probability of the project to finish before this date is just only about 22.25%. In other words, PERT scheduling is usually too optimistic (from the statistical point of view). This result was early highlighted by Klingel (1966), MacCrimmon and Ryavec (1964) and Schonberger (1981), but in our framework, this issue becomes evident when representing the results of common project networks. This

happens because PERT assumes that the expected value of the maximum of the durations of two parallel activities equals the maximum of the expected value of the durations; and this is not true.

According to Fig. 8, with the 75% of the work performed, the project has a delay of almost 10 time units if PERT plan is used as reference. The project is delayed almost 5 time units with respect to the percentile P_{d70} line but is ahead of schedule in relation to percentile P_{d90} .

The project has an over-cost of 3000 monetary units with respect to the cost baseline deducted from the PERT schedule, and an over-cost of 5000 units with respect to the percentile P_{c30} in costs, but it is almost 1500 units under budget if we compare it with percentile P_{c90} in costs.

3.2. Case study 2. Normal distributions

Case study AON network is represented in Fig. 9. This network has been used previously by Lambrechts et al. (2008) for project scheduling research. This graph contains three parallel paths. Duration and cost of these activities are described in Table 2.

Again, it is straightforward to check that the conventional PERT schedule is very optimistic, 13 time units, while the probability of finishing before that date is just about 18.78% if we compute it using simulation. When the 75% of the project

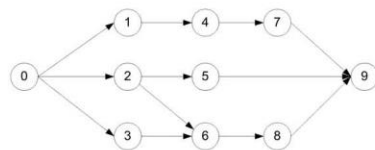


Fig. 9. AON network for case study 2.

Table 2
Case study 2. Duration activities are modeled as normal distributions. Variable cost depends on duration.

Id. activity	Duration	Variance	Variable cost	Fixed cost
A1	2	0.15	555	200
A2	4	0.83	1300	450
A3	7	1.35	48	45
A4	3	0.56	880	36
A5	6	1.72	14	20
A6	4	0.28	1210	40
A7	8	2.82	725	150
A8	2	0.14	100	150

has been performed, the project is delayed 0.62 time units with respect the PV_{PERT} curve, but it is 0.81 time units ahead of schedule when we compare with the 90% confidence line (Fig. 10). The project has an over-cost of 790 monetary units when we compare with the planned costs derived from PERT scheduling, but it is 1600 monetary units under the 90% confidence line.

Changing the reference coordinates, in Fig. 11a and b, we represent the x variances.

In these time and cost graphs, we represent the evolution of the project executed, compared with respect to the planned value curve. In each period of control and given a project status,

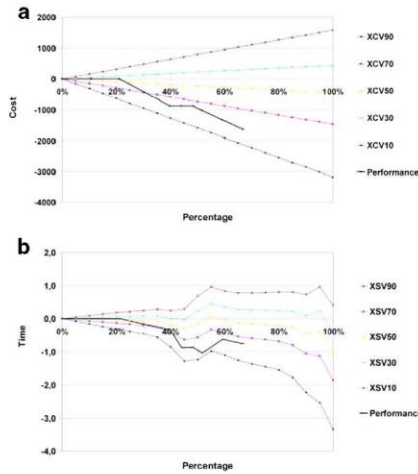


Fig. 11. a and b: cost and time graphs.

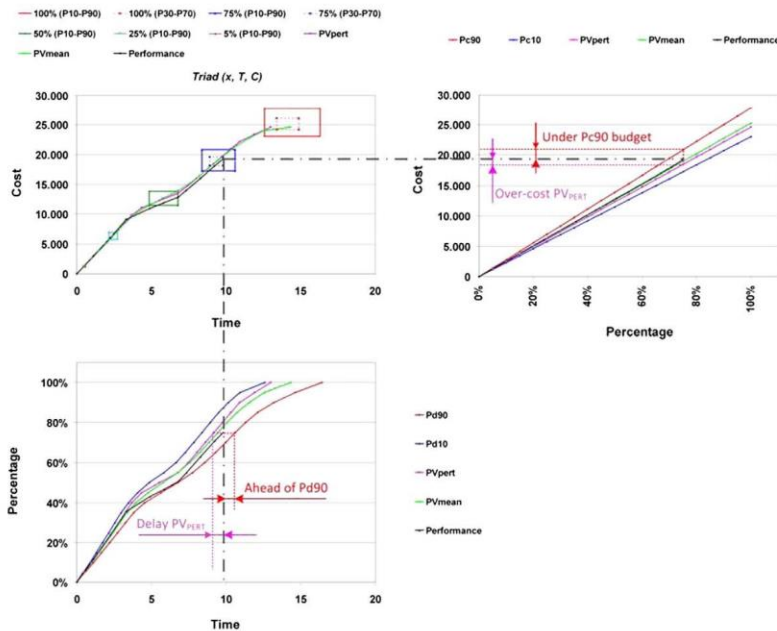


Fig. 10. Control framework for case study 2.

Table 3
Case study 3. Duration activities are modeled as Beta distributions. Variable cost depends on duration.

Id. activity	Minimum	Likeliest	Maximum	Variable cost	Fixed cost
A1	1.42	2	3.74	555	200
A2	2.63	4	8.12	1300	450
A3	5.25	7	12.25	48	45
A4	1.88	3	6.37	880	36
A5	4.03	6	11.92	14	20
A6	3.19	4	6.42	1210	40
A7	5.46	8	15.61	725	150
A8	1.44	2	3.68	100	150

we can observe the absolute delay in terms of both cost and time. In this particular example the evolution of the project seems stable between the curves corresponding to percentiles 70 and 90 of probability.

3.3. Case study 3. Beta distributions

The AON network is the same with that in case 2, the one used previously by Lambrechts et al. (2008) for project

scheduling research. The activities of the network have been modeled according to a beta distribution function, as reflected in Table 3.

Again, it is straightforward to check that the conventional PERT schedule is very optimistic, 13 time units, while the probability of finishing before that date is only just about 5.74% if we compute it using simulation. When approximately the 75% of the project has been performed, the project is delayed 0.28 time units with respect the PV_{PERT} curve, but it is 1.86 time units ahead of schedule when we compare with the 90% confidence line (Fig. 12). The project has an over-cost of 2043 monetary units when we compare with the planned costs derived from PERT scheduling, but it is 2385 monetary units under the 90% cost confidence line.

4. Conclusions

In this paper, we suggest a new methodology for controlling projects under uncertainty. We integrate EVM methodology with all the literature concerning activity and project variability. EVM was developed under certainty assumptions, therefore

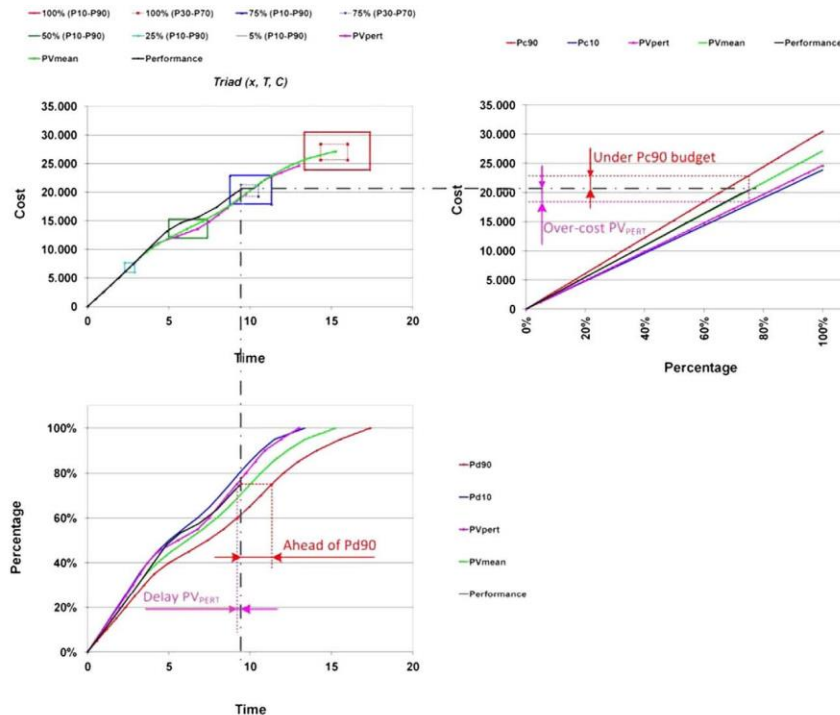


Fig. 12. Control framework for case study 3.

project managers know whether the project is delayed or ahead of schedule, has over or under costs, depending on comparisons with planned values. But when we introduce variability within the analysis, we are more interested in knowing how far the deviations from planned value are (from the statistical point of view). This way, project managers will know whether the deviations from planned values are or not in agreement with the deviations assumed from activities variability and, therefore, take early corrective actions.

In order to implement the methodology, we do not need more information than the data needed for using EVM, the probability distribution functions of the activities (as needed by most of the scheduling methodologies like PERT), and basic knowledge about Monte Carlo simulation.

The graphical framework underlies the optimistic schedules and cost baselines obtained when using the PERT methodologies. Do not worry if your project is delayed according to PERT scheduling. From the statistical point of view, in most of the cases the probability of achieving the PERT time is under 30%.

Although it is a new and innovative methodology, we only go back to the fundamentals of project simulations, as we generate the “universe” of all possible projects, and we only reorganize and gather the simulated data in a language coherent with Earned Value Methodology.

Acknowledgments

This research has been financed by the project “Computational Models for Strategic Project Portfolio Management”, supported by the Regional Government of Castile and Leon (Spain) with grant VA056A12-2.

References

- Abba, W., Niel, F.A., 2010. Integrating technical performance measurement with earned value management. *Meas. News* 4, 6–8.
- Acebes, F., Pajares, J., Galan, J.M., López-Paredes, A., 2013. Beyond earned value management: a graphical framework for integrated cost, schedule and risk monitoring. *Proc. Soc. Behav. Sci.* 74, 181–189.
- Aliverdi, R., Mostlemi Naeni, L., Salehipour, A., 2013. Monitoring project duration and cost in a construction project by applying statistical quality control charts. *Int. J. Proj. Manag.* 31 (3), 411–423.
- Al-Jibouri, S.H., 2003. Monitoring systems and their effectiveness for project cost control in construction. *Int. J. Proj. Manag.* 21 (2), 145–154.
- Anbari, F.T., 2003. Earned value project management method and extensions. *Proj. Manag. J.* 34 (4), 12–23.
- Barraza, G.A., Bueno, R.A., 2007. Probabilistic control of project performance using control limit curves. *J. Constr. Eng. Manag.* 133 (12), 957–965.
- Barraza, G.A., Back, W.E., Mata, F., 2004. Probabilistic forecasting of project performance using stochastic S curves. *J. Constr. Eng. Manag.* 130 (1), 25–32.
- Blanco, V.D., 2013. Earned value management: a predictive analysis tool. *Nav. Supply Corps Newsl.* 66 (2), 24–27.
- Burke, R., 2003. *Project Management*. John Wiley & Sons, Planning and Control Techniques London etc.
- Chen, S., Zhang, X., 2012. An analytic review of earned value management studies in the construction industry. *Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World*, Proceedings of the 2012 Construction Research Congress, pp. 236–246.
- Cioffi, D.F., 2006. Designing project management: a scientific notation and an improved formalism for earned value calculations. *Int. J. Proj. Manag.* 24 (2), 136–144.
- Fazar, W., 1959. Program evaluation and review technique. *Am. Stat.* 13 (2), 10.
- Fleming, Q.W., Koppelman, J.M., 2005. *Earned Value Project Management*. Newtown Square, PA, Project Management Institute.
- Gowan, J.A., Mathieu, R.G., Hey, M.B., 2006. Earned value management in a data warehouse project. *Inf. Manage. Comput. Secur.* 14 (1), 37–50.
- Hanna, A.S., 2012. Using the earned value management system to improve electrical project control. *J. Constr. Eng. Manag.* 138 (3), 449–457.
- Hazir, O., Shtub, A., 2011. Effects of the information presentation format on project control. *J. Oper. Res. Soc.* 62 (12), 2157–2161.
- Henderson, K., 2003. Earned schedule: a breakthrough extension to earned value theory? A retrospective analysis of real project data. *The Measurable News* 1–16.
- Henderson, K., 2004. Further developments in earned schedule. *Meas. News* 15–22.
- Jacob, D.S., 2003. Forecasting project schedule completion with earned value metrics. *Meas. News* 7–9.
- Jacob, D.S., Kane, M., 2004. Forecasting schedule completion using earned value metrics revisited. *Meas. News* 11–17.
- Kelley, J., 1961. Critical path planning and scheduling: mathematical basis. *Oper. Res.* 9 (3), 296–320.
- Kelley, J., Walker, M., 1989. The origins of CPM: a personal history. *Proj. Manag. Netw.* 3 (2), 7–22.
- Kim, E.H., Wells, J., Duffey, M.R., 2003. A model for effective implementation of earned value management methodology. *Int. J. Proj. Manag.* 21 (5), 375–382.
- Klingel Jr., A.R., 1966. Bias in pert project completion time calculations for a real network. *Manag. Sci.* 13 (4), B194–B201.
- Kwak, Y.H., Anbari, F.T., 2012. History, practices, and future of earned value management in government: perspectives from NASA. *Proj. Manag. J.* 43 (1), 77–90.
- Lambrechts, O., Demeulemeester, E., Herroelen, W., 2008. Proactive and reactive strategies for resource-constrained project scheduling with uncertain resource availabilities. *J. Sched.* 11 (2), 121–136.
- Leu, S.S., Lin, Y.C., 2008. Project performance evaluation based on statistical process control techniques. *J. Constr. Eng. Manag.* 134 (10), 813–819.
- Lipke, W.H., 1999. Applying management reserve to software project management. *J. Def. Softw. Eng.* 17–21.
- Lipke, W., 2003. Schedule is different. *Meas. News* 3, 31–34.
- Lipke, W., 2004a. Connecting earned value to the schedule. *Meas. News* 1, 6–16.
- Lipke, W., 2004b. The probability of success. *J. Qual. Assur. Inst.* 14–21.
- MacCrimmon, K.R., Ryavec, C.A., 1964. An analytical study of the PERT assumptions. *Oper. Res.* 12 (1), 16–37.
- Malcolm, D.G., Roseboom, J.H., Clark, C.E., Fazar, W., 1959. Application of a technique for research and development program evaluation. *Oper. Res.* 7 (5), 646–669.
- McKim, R., Hegazy, T., Attalla, M., 2000. Project performance control in reconstruction projects. *J. Constr. Eng. Manag.* 126 (2), 137–141.
- Mummolo, G., 1997. Measuring uncertainty and criticality in network planning by PERT-path technique. *Int. J. Proj. Manag.* 15 (6), 377–387.
- Naderpour, A., Mofid, M., 2011. Improving construction management of an educational center by applying earned value technique. *Proc. Eng.* 14, 1945–1952.
- Naeni, L.M., Shadrokh, S., Salehipour, A., 2011. A fuzzy approach for the earned value management. *Int. J. Proj. Manag.* 29 (6), 764–772.
- Navon, R., 2005. Automated project performance control of construction projects. *Autom. Constr.* 14 (4), 467–476.
- Pajares, J., López-Paredes, A., 2011. An extension of the EVM analysis for project monitoring: the cost control index and the schedule control index. *Int. J. Proj. Manag.* 29 (5), 615–621.
- Pontrandolfo, P., 2000. Project duration in stochastic networks by the PERT-path technique. *Int. J. Proj. Manag.* 18 (3), 215–222.
- Project Management Institute, 2005. *Practice Standard for Earned Value Management*. Newtown Square, PA, Project Management Institute.

434

F. Acebes et al. / International Journal of Project Management 32 (2014) 423–434

- 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.
- Vanhoucke, M., 2011. On the dynamic use of project performance and schedule risk information during project tracking. *Omega* 39 (4), 416–426.
- Vanhoucke, M., 2012. Measuring the efficiency of project control using fictitious and empirical project data. *Int. J. Proj. Manag.* 30 (2), 252–263.
- Vanhoucke, M., Vandevoorde, S., 2007. A simulation and evaluation of earned value metrics to forecast the project duration. *J. Oper. Res. Soc.* 58 (10), 1361–1374.
- Warburton, R.D.H., 2011. A time-dependent earned value model for software projects. *Int. J. Proj. Manag.* 29 (8), 1082–1090.

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Procedia
Social and Behavioral Sciences

Procedia - Social and Behavioral Sciences 119 (2014) 329 – 338

27th IPMA World Congress

Exploring the influence of Seasonal Uncertainty in Project Risk Management

Fernando Acebes^{a*}, Javier Pajares^a, José Manuel Galán^b, Adolfo López-Paredes^a^aINSISOC. University of Valladolid. Valladolid. SPAIN^bINSISOC. University of Burgos. SPAIN

Abstract

For years, many research studies have focused on programming projects, assuming a deterministic environment and complete task information. However, during the project performance, schedule may be subject to uncertainty which can lead to significant modifications. This fact has led to an increasing scientific literature in the field. In this article we consider the presence of an uncertainty of seasonal type (e.g. meteorological) that affects some of the activities that comprise the project. We discuss how the project risk can be affected by such uncertainty, depending on the start date of the project. By means of Monte Carlo simulation, we compute the statistical distribution functions of project duration at the end of the project. Then, we represent the variability of the project through the so-called Project Risk Baseline.

In addition, we examine various sensitivity metrics - Criticality, Cruciality, Schedule Sensitivity Index -. We use them to prioritize each one of the activities of the project depending on its start date. In the last part of the study we demonstrate the relative importance of project tasks must consider a combined version of these three sensitivity measures.

© 2014 The Authors. Published by Elsevier Ltd.

Selection and peer-review under responsibility of the IPMA.

Keywords: Uncertainty and variability; Risk Management; Monte Carlo Simulation; Criticality; Schedule Risk Baseline

1. Introduction

Many research works have been devoted to project programming under the assumption of a deterministic environment and complete task information. However, during the project performance, uncertainty usually leads to

* Corresponding author: Fernando Acebes. Tel.: +34 983 185954.
E-mail address: facebes@yahoo.es

re-schedule. This fact has led to the emergence of research on the topic ((C. B. Chapman et al. 2000), (Hillson 2002), (S. Ward & C. Chapman 2003), (Jaafari 2001), (Perminova et al. 2008), among others)

Some authors think that there are two types of uncertainty: Aleatory Uncertainty is a naturally occurring statistical process that exists in projects. We can find aleatory uncertainty in work activities for their cost and schedule. Epistemic Uncertainty is consequence of unexpected events that "might" happen in a project.

Both, aleatory and epistemic uncertainties are responsible of project risk. Aleatory uncertainty creates a risk that a project may be over budget or behind schedule due to the naturally occurring variances in work efforts, productivity variances, naturally occurring price volatility for material and labor. This "type" of risk can be handled with margin.

Epistemic uncertainty creates risk through a probabilistic occurrence of some event. Typical examples of epistemic risks are found in project's technology, processes, and other activities. Risk management is this type of uncertainty is often based on "risk response." There several classes of response, but two approaches to applying them.

"Buy down" the risk with planned work in the baseline. This approach rests on spending money and time to reduce the risk or even make it disappear. The second approach is based on providing Management Reserve (or contingency) to "handle" the consequences of the risk. All risk "types" can be found starting with the WBS. Look there of epistemic uncertainties that create risk.

Aleatory uncertainty and the resulting risk can be estimated using Monte Carlo Simulation assuming some confidence about variances in the project. Cost and schedule variances are the most common.

Some authors have chosen using the term "Uncertainty Management" better than the more established term "Risk Management" since this term not only includes risk and opportunity management but it also implies the identification and management of all the sources of uncertainty that give place and form our perception of risk and uncertainty.

(C. Chapman & S. Ward 2003) establish different areas where uncertainty can arise throughout the project life cycle (variability associated with estimates, uncertainty about the forecast basis, uncertainty about design and logistics, uncertainty about objectives and priorities, uncertainty about fundamental relationships between project parties). (Jaafari 2001) also includes a list of variable risks that are typically found on large projects: promotion risk, market risk-volume, market risk-price, political risks, technical risks,...

This list is responsible of the called Environmental risk: Probability that a given project will have adverse environmental impacts beyond its permitted limits and increased liabilities.

As an example from (C. Chapman & S. Ward 2004), a major construction project of North Sea oil can be affected by the condition of the sea, especially during November and December. Through risk analysis, the project manager could decide to use equipment more suitable to such adverse weather conditions to reduce the risk.

Similar examples can be found in civil engineering projects, which might be affected by rain, or construction projects in tropical areas, and others.

To represent the evolution of the project uncertainty for each period of time, we use the Schedule Risk Baseline (SRB) defined by (Pajares & López-Paredes 2011). The evolution of the SRB indicates how risk is "eliminated" during Project runtime. We use Monte Carlo simulation that provides statistical data of the distribution function of the total duration of the project, for each period of execution.

Using Monte Carlo simulation and sensitivity analysis we also obtain information about how the activities contribute to the overall risk project. This result helps us to prioritize activities.

Traditionally, the importance of the project activity has been measured by the "Criticality Index", this concept was introduced by (Martin 1965), which is defined as the probability that an activity belong to the critical path. (Williams 1992) points out that the classical criticality index not always offers complete information about the importance of the activities and proposed to use the "Cruciality Index". He defines this index as the correlation between the activity duration and the project duration.

(Elmaghraby et al. 1999) study the impact of changing the mean duration of an activity on the variability of project duration. (Vanhoucke 2010) performs simulations for measuring the ability of four basic sensitivity metrics to improve the time performance during project execution. In addition to the two indicators mentioned above (Criticality Index and Cruciality Index), he analyses the impact of the Significance Index (SI) and the Schedule sensitivity index (SSI) as well.

The article is organized as follows: In section 2 we describe the project used to illustrate the case. In section 3 we integrate seasonal uncertainty with the activities uncertainty. In section 4, we perform a sensitivity analysis of the project activities and report the conclusions of the work.

2. Temporary risk analysis.

To illustrate our approach in this article, we use the project network proposed by (Lambrechts et al. 2008) in their research work on project programming. We can see the Activity-On-Arrow (AOA) diagram shown in Fig. 1. We choose this network since it is simple but at the same time includes three parallel paths, different depth and a junction.

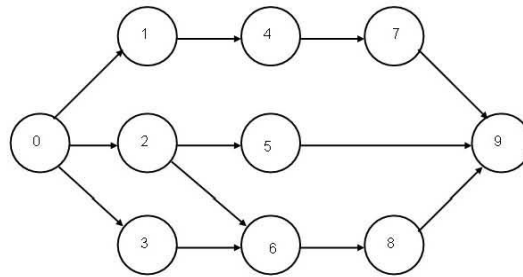


Fig. 1. AON project network.

The duration of the activities has been modeled as a normal probability distribution function with the parameters listed in Table 1. The cost of the activities is directly dependent on the activity duration and it is divided into a part variable, dependent on the duration of the activity, and a fixed one, independent of activity duration.

Table 1. Duration activities are modeled as normal distributions. Variable cost depends on duration.

Id. Activity	Duration	Variance	Variable Cost	Fixed Cost
A1	2	0,15	555	200
A2	4	0,83	1300	450
A3	7	1,35	48	45
A4	3	0,56	880	36
A5	6	1,72	14	20
A6	4	0,28	1210	40
A7	8	2,82	725	150
A8	2	0,14	100	150

Assuming average duration and a deterministic approach, the total duration of the project will be of 13 units of time, which it will correspond with durations of the path formed by the A1, A4 and A7 activities, and also with the duration of the path formed by the activities A3, A6 and A8. Therefore, we can deduce the existence of two possible critical paths, with the same duration.

The uncertainty associated with each activity implies that the duration is considered stochastic, following a probability distribution function. In addition, A7 activity is influenced by a "seasonal" uncertainty (meteorological uncertainty). This uncertainty will take place at certain times of the year and not in others, and in those times that may occur, the probability of appearance will be different from one period to other.

We assume, as seasonal uncertainty affecting A7 Activity, the existence of temperatures below 0° C (risk of frost) in the city of Valladolid (Spain).

We have statistics on days with temperatures below 0° C, sorted by months and years, in the town of Valladolid (Table 2).

Table 2. Days with temperatures below 0° C, sorted by years and months. Observatory of Valladolid.

Year	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total
1997	10	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	23
1998	8	7	3	2	0	0	0	0	0	0	11	22	53
1999	19	19	4	2	0	0	0	0	0	0	9	16	69
2000	28	5	5	3	0	0	0	0	0	0	5	2	48
2001	7	10	0	3	0	0	0	0	0	0	13	25	58
2002	9	11	2	3	0	0	0	0	0	0	1	2	28
2003	16	15	1	1	0	0	0	0	0	0	1	8	42
2004	14	17	10	2	0	0	0	0	0	0	9	10	62
2005	22	24	13	2	0	0	0	0	0	0	6	18	85
2006	17	20	4	1	0	0	0	0	0	0	1	19	62
2007	13	2	7	2	0	0	0	0	0	0	10	16	50
2008	12	5	8	0	0	0	0	0	0	1	6	18	50
Average value in the period 1997/2008	14,6	11,7	4,8	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	6,0	13,7	52,5
Variance	38,6	51,5	16,6	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	20,0	56,8	286,6

We suppose that the number of days with frost during the year is adjusted to a normal probability distribution function, for each of the months of the year, according to the available data in Table 2.

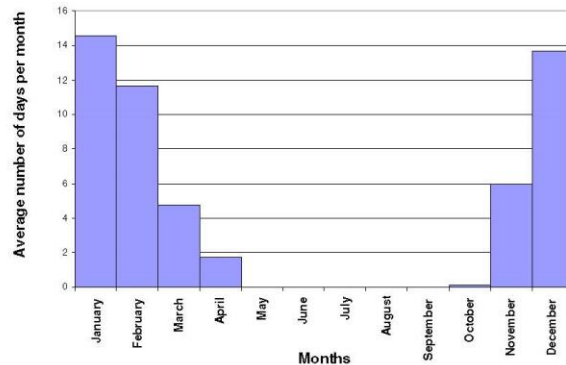


Fig. 2. Average value of days with temperatures below 0° C for months.

We represent in Fig. 2 the average value of days with temperatures below 0° C for months of the year, in the city of Valladolid.

We can observe how January and December are the months with higher average days with frost, followed by the month of February. We also observe that the appearance of this risk is very uncommon during the months from May to September.

We assume that this described seasonal risk would have a negative impact on our project A7 Activity, if it were to occur, that will cause a delay in the activity of 25% of the planned duration for that period.

3. Integration of project uncertainty and seasonal risk

Project activities include uncertainty in its duration, each one of them according to their probability distribution function, as well as the seasonal risk that affects A7 Activity.

We use Monte Carlo simulation to determine the risk of the project and we represent it through the SRB. (Pajares & López-Paredes 2011) define the Project Risk Baseline as “the evolution of ‘project risk value’ through project execution lifecycle. The risk of the project at any given time is calculated as the risk of the project pending tasks (those not yet completed), assuming that the project has performed as planned until that given time”.

We apply Monte Carlo simulation in each project execution period and we extract and represent the value of the variance of the total project duration, considering that only those pending tasks to execute contribute to the project duration uncertainty.

The project risk in each time period (measured as the value of the variance of the total project duration) is determined by the uncertainty of every activity coupled with the seasonal uncertainty (depending on the run-time of the project), that may impact negatively on A7 Activity.

From a deterministic point of view and considering weeks as the time unit of the project, the project lasts 13 weeks, being the duration of A7 Activity, 8 weeks.

Considering the stochastic nature of the project, the duration of the project depends on the probability distribution function of each activity. We show in this work that it also depends on the start date of the project as consequence of the seasonal risk of the project.

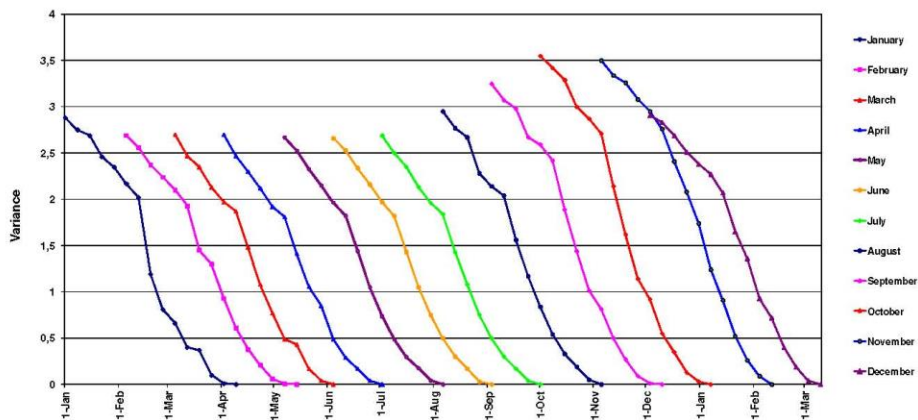


Fig. 3. Schedule Risk Baseline depending on the start time of the project.

In Fig. 3 we have represented the different SRB of the project based on the start date, assuming that the project starts its execution the first day of each month of the year.

In all cases, SRB decreases as the project progresses. As the project progresses and the activities are implemented, the project decreases uncertainty due to the activities already carried out.

We see how the simulations show variation in the initial level of the project risk (starting point of the SRB), as consequence of the impact on the A7 activity of seasonal uncertainty, which increases the overall risk of the project.

In those simulations where A7 activity is running on dates with greater probability of temperatures below 0 °C (project that it begins in October), the level of risk is higher, while those simulations where A7 activity is running in dates with lower probability of temperatures below 0 °C (project that starts, for example, in July), the level of project risk is lower.

We must bear in mind that the A7 activity is performed after activities A1 and A4. From a deterministic point of view, it requires 5 weeks since the start of the project until it starts the execution of A7.

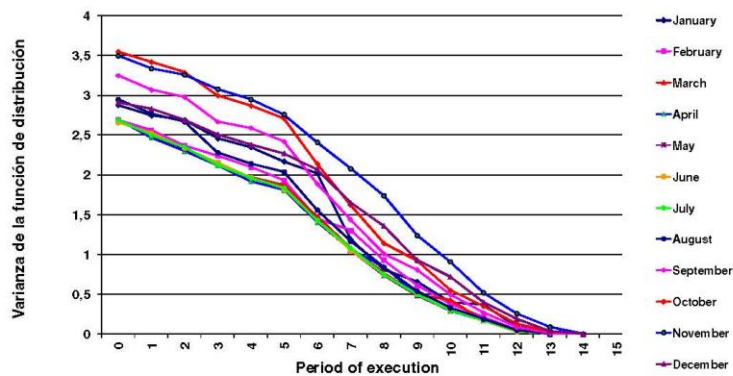


Fig. 4. Schedule Risk Baseline depending on the period of execution.

In Fig. 4 we represent the SRB depending on the period of project execution, integrating the simulations of each one of the months for the run-time.

We can see the diversity of risk level of each project simulated according to the month of beginning, as well as the different evolution of each of the simulations by time period. Some projects have lengthened his duration of 13 weeks up to finishing in the week 14.

This is due to the A7 activity and the presence of seasonal uncertainty which affects this activity, depending on the month of execution of the A7 activity and the greater or lesser probability of impact on this activity.

In those simulations where A7 activity is running in months with zero probability of frost (simulations from May to July) the average performance of the project is almost coincident, because uncertainty is provided only by the activities, there is not risk associated with seasonal uncertainty.

4. Sensitivity analysis

We use the data extracted from the Monte Carlo simulation to perform a sensitivity analysis of the project activities according to the beginning of the same month, bearing in mind the presence of seasonal uncertainty.

We represent for each activity, the evolution of three different indicators, depending on the start date of the project.

The three considered indicators are:

Criticality Index. The criticality index measures the probability that an activity lies on the critical path. It is a simple measure obtained by Monte Carlo simulations, and is expressed as a percentage denoting the likelihood of being critical.

The Criticality index often fails in adequately measuring the project risk. The main drawback of the CI is that its focus is restricted to measuring probability, which does not necessarily mean that high Criticality index activities have a high impact on the total project duration.

Cruciality Index. The Cruciality index is based on the Pearson product-moment correlation coefficient between the duration of activity and the overall project completion time. This correlation metric is a measure of the degree of linear relationship between two variables. However, the relation between activity duration and the total project duration often follows a non-linear relation.

Schedule Sensitivity Index (SSI). The project management body of knowledge (PMBok 2008) mentions quantitative risk analysis as one of many risk assessment methods, and proposes to combine the activity duration and project duration sample standard deviations with the criticality index. In this paper, it is referred to as the schedule sensitivity index. The measure is equal to (ec. 1):

$$SSI = \left(\frac{\sqrt{\text{var}(d_i)}}{\sqrt{\text{var}(P_{yt})}} \right) \cdot CI \tag{1}$$

We represent in Fig 5 the Criticality Index of the project activities, depending on the month of beginning of the project.

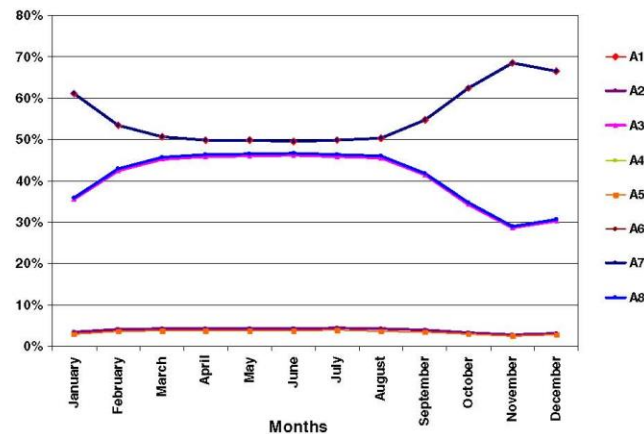


Fig. 5. Criticality Index.

In this chart we observe that the activities are grouped into three different possible paths. The path formed by the A1, A4 and A7 activities is the way which is more likely to be critical for any start date of the project.

However, for the months of project start from April until July, the path formed by the A3, A6 and A8 activities approaching in percentage of likely to be critical to the previous one (A1, A4 and A7). The last group of activities is formed by the A2 and A5 activities, with a clear difference in the probability of being critical.

We observe that there are months in which increases the probability that the upper path is critical (A1, A4 and A7), decreasing at the same time the criticality of the lower path (A2, A6 and A8). The reason is that the A7

activity execution is performed in months in which the probability that the temperature is below 0°C is high. As result, it increases the duration of the activity and, therefore, the duration and criticality of the path formed by the A1, A4 and A7 activities.

In any case, it is reasonable to think that it can increase the criticality of A7, because it has increased the probability that the duration of the activity can be greater. It has also increased the criticality index of A1 and A4 activities in the same proportion, but the duration of these activities has not changed.

This is one of the reasons why this index is not fully reliable and should be studied together with the other indices.

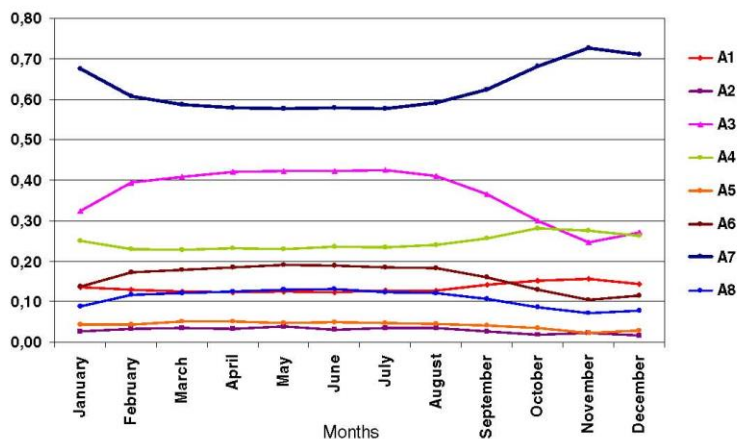


Fig. 6. Cruciality Index.

In Fig. 6 we represent the Cruciality Index (or correlation between the duration of the activity and the total project duration) of each activity, depending on the month of beginning of the project.

The most crucial activity is A7 Activity, for any period of beginning of the project. Subsequently the most crucial activity is activity A3 and then A4, except for simulations with start date on November, where the A4 activity is more crucial than the A3 activity.

We see that the cruciality is represented by activities independently, without being grouped, as it was the case with the criticality.

The Cruciality of the A7 activity grows in those simulations where this activity is executed in months with probability of temperatures below 0°C , standing out from the rest of activities.

Finally, we also see there are activities that they have little importance in terms of the risk of this project (activities A2 and A5). The importance of these two activities was also reflected in the cruciality index.

Despite the fact that, in this project, the indicator of cruciality behaves better than the indicator of criticality, offering a more faithful reflection of the performance of the project activities, it is not always the case and both must be used to properly understand the project and the activities that compose it.

Finally, in Fig. 7 we represent the last of the indices that we have analyzed, SSI, for each activity, and depending on the start date of the project. The figure shows the value of the cruciality weighted by the ratio of the standard deviation of the activity and the standard deviation of the project.

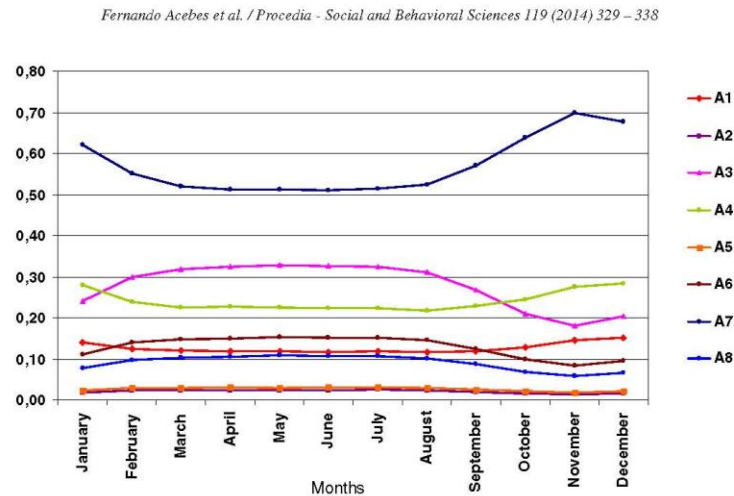


Fig. 7. Schedule Sensitivity Index.

In this case their representation is similar to Cruciality with A7 Activity is more priority over other activities for every month. This activity increases its importance in those months in which the probability of temperatures below 0°C is higher.

In this index, A4 activity becomes more important (also in relative terms) than A3 activity in simulations from October to January, although these differences are not especially striking.

5. Conclusions

In this article we have considered the existence of a seasonal risk which can have a negative impact on some of the activities of the project.

Our work includes two different analyses. In the first one, we have studied the variation in the level of risk of the project, and we have represented the variation of the Schedule Risk Baseline of the project according to the beginning of each month.

The level of the project risk represented by the graph of the SRB increases when the activity affected by seasonal uncertainty is performed in periods with higher probability of frost. Our results show that projects that are subject to seasonal uncertainties of any kind can negatively impact on the project. An analysis considering at the same time the stochasticity associated with the activities with seasonal uncertainties allows us determine the start date of the project with lower risk for breaking the scheduled baseline.

In a second part of the article we have analyzed the individual risk contribution of the activities depending on the start date of the project. For this purpose we have calculated some of the more common prioritization indices used in the literature, such as the Criticality Index, Cruciality Index and Schedule Sensitivity Index.

On one hand, we have verified that the isolated use of any of the indices does not give us the whole picture of risk management. Our analysis suggests that some indicators should be combined together to understand the individual contribution of tasks in terms of risk.

On the other hand, we have represented the evolution of the different indices according to the start date of the project for each activity. We have shown how the activity which is exposed to the seasonal risk becomes more important since it increases the probability that the risk occurs, i.e., during the winter.

Other activities modify its importance, depending on the month of beginning of the project, despite not being directly affected by the seasonal uncertainty.

Acknowledgements

This research has been financed by the project SPPORT: “Computational Models for Strategic Project Portfolio Management”, supported by the Regional Government of Castile and Leon (Spain) with grant VA056A12-2.

References

- Chapman, C. & Ward, S., 2003. *Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights* 2nd ed. Wiley, ed., Chichester.
- Chapman, C. & Ward, S., 2004. Why risk efficiency is a key aspect of best practice projects. *International Journal of Project Management*, 22, pp.619–632.
- Chapman, C.B., Ward, S.C. & Bennell, J.A., 2000. Incorporating uncertainty in competitive bidding. *International Journal of Project Management*, 18, pp.337–347.
- Elmaghraby, S.E., Fathi, Y. & Taner, M.R., 1999. On the sensitivity of project variability to activity mean duration. *Int. J. Production Economics*, 62, pp.219–232.
- Hillson, D., 2002. Extending the risk process to manage opportunities. *International Journal of Project Management*, 20, pp.235–240.
- Jaafari, A., 2001. Management of risks, uncertainties and opportunities on projects: time for a fundamental shift. *International Journal of Project Management*, 19, pp.89–101.
- Martin, J., 1965. Distribution of the time through a directed, acyclic network. *Operations Research*, 13, pp.46–66.
- Pajares, J. & López-Paredes, A., 2011. An extension of the EVM analysis for project monitoring: The Cost Control Index and the Schedule Control Index. *International Journal of Project Management*, 29, pp.615–621.
- Perminova, O., Gustafsson, M. & Wikström, K., 2008. Defining uncertainty in projects – a new perspective. *International Journal of Project Management*, 26, pp.73–79.
- PMBoK, 2008. *A guide to the project management body of knowledge* 4rd ed. Newtown Square, ed., Project Management Institute.
- Vanhoucke, M., 2010. Using activity sensitivity and network topology information to monitor project time performance. *Omega*, 38, pp.359–370.
- Ward, S. & Chapman, C., 2003. Transforming project risk management into project uncertainty management. *International Journal of Project Management*, 21, pp.97–105.
- Williams, T.M., 1992. Criticality in Stochastic Networks. *Journal of the Operational Research Society*, 43(4), pp.353–357.



Available online at www.sciencedirect.com
SciVerse ScienceDirect

Procedia - Social and Behavioral Sciences 74 (2013) 231 – 239

Procedia
 Social and Behavioral Sciences

26th IPMA World Congress, Crete, Greece, 2012

Beyond Earned Value Management: A Graphical Framework for Integrated Cost, Schedule and Risk Monitoring

Fernando Acebes^a, Javier Pajares^{a,*}, José Manuel Galán^b, Adolfo López-Paredes^a

^aINSISOC, University of Valladolid, Valladolid, Spain

^bINSISOC, University of Burgos, Spain

Abstract

In this paper, we propose an innovative and simple graphical framework for project control and monitoring, to integrate the dimensions of project cost and schedule with risk management, therefore extending the Earned Value methodology (EVM). EVM allows Project managers to know whether the project has overruns (over-costs and/or delays), but project managers do not know when deviations from planned values are so important that corrective actions should be taken or, in case of good performance, sources of improvement can be detected. From the concept of project planned variability, we build a graphical methodology to know when a project remains “out of control” or “within expected variability” during the project lifecycle. To this aim, we define and represent new control indexes and new cumulative buffers. Five areas in the chart represent five different possible project states. To implement this framework, project managers only need the data provided by EVM traditional analysis and Monte-Carlo simulation. We also explore the sensitivity of the methodology to control variables.

© 2013 Published by Elsevier Ltd.
 Selection and/or peer-review under responsibility of IPMA

Keywords: Earned Value Management; risk management; project control and monitoring

1. Introduction

Earned Value Management (EVM) is one of the most widely used and known methodologies for project control and monitoring. EVM integrates scope, cost, time and schedule under the same framework. Developed by the U.S. Department of Defense during the sixties, it allows project managers to measure and verify the progress of the project and to detect deviations from the project planning phase,

* Corresponding author: Tel.: +34 983 185954.
 E-mail address: pajares@insisoc.org.

so that early corrective actions could be taken. New cost and time forecasts can also be computed taking into account deviations under different hypotheses.

A detailed explanation of the methodology and its implementation can be found in Anbari (2003), Fleming & Koppelman (2005) and PMI (2005). EVM is based on three basic variables: Planned Value (PV) or budgeted cost of work scheduled; Actual Cost (AC) or the actual cost of work performed; and Earned Value (EV) or the budgeted cost of the work performed. From the basic variables, four indexes are defined: Cost Variance ($CV = EV - AC$), Schedule Variance ($SV = EV - PV$), Cost Performance Index ($CPI = EV / AC$) and Schedule Performance Index ($SPI = EV / PV$). Whenever $CV < 0$ and $CPI < 1$ there are over costs, and whenever $SV < 0$ and $SPI < 1$, the project is delayed. Positive values of SV and CV mean the project is in advance from plan and under budget respectively. Variables and variances can be represented graphically (see Figure 1), helping project managers to monitor project evolution. The graphical representation of PV is the project cost baseline.

Lipke (2003, 2004) proposed an extension of the methodology: the concept of Earned Schedule (ES). ES solves some problems faced by the methodology regarding its forecasting capabilities during the last phases of the project lifecycle. ES is the date when the current earned value should have been achieved. Schedule variance and performance indexes can be re-defined in terms of ES ($SV(t) = ES - AT$ and $SPI(t) = ES / AT$, where AT is actual time).

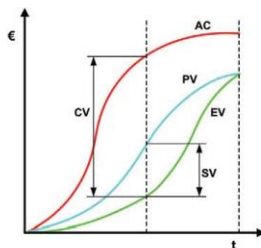


Fig. 1. EVM main variables and variances

The integration of risk analysis under the EVM framework represents an interesting step forward in the development of the methodology. EVM variables and variances talk about what happened in the past, whereas risk management is concerned about the future. Pajares & Lopez-Paredes (2011) proposed to integrate both perspectives under the same framework, so that project managers could enjoy new tools for taking better decisions.

Vanhoucke (2011) proposed to monitor the projects under two perspectives: a top-down approach based on earned value metrics and a bottom-up approach based on the schedule risk analysis method. He shows that the efficiency of the each approach depends on the features of the project network. Vanhoucke (2012) used Monte-Carlo simulations to explore why EVM and Schedule Risk Analysis provide good results in some projects and poor results in others. Hazir & Shtub (2011) used EVM measures to monitor projects and develop a simulation software to replicate uncertain environments. They explore the relation between information presentation and project control.

The approach by Pajares & Lopez-Paredes (2011) is based on the concept of "planned variability": the variability the project has at any time according to the estimated variability (duration and costs) of project activities.

Project variability can be estimated during the planning phase by means from Monte-Carlo simulations from the activity probability distributions; therefore, there is a “planned or expected variability” of the project at any moment during the project run. As a consequence, project overruns could be, at any time, inside or outside this variability.

EVM variances and indexes show whether the project is delayed or presents over-costs, but they do not say whether these overruns are within the planned variability or not. If they are not, corrective actions should be taken, as some structural changes or external unexpected events could have taken part in the project runtime. To this aim, Pajares & Lopez-Paredes (*op.cit.*) propose two new indexes: the Schedule Control Index (SCol) and the Cost Control Index (CCol).

In this paper, we give a step forward and we propose a graphical framework, easy to build, to help project managers to know when project performance is out of the planned variability and corrective actions should be taken to assure the project finishes under the planned schedule and budget. The methodology does not need more information than the calculations performed in EMV analysis and the Monte-Carlo simulation methodology.

The rest of the paper is structured as follows. In section 2 we briefly review the calculations of the Schedule and Cost Control Indexes; in section 3, we describe the graphical framework we propose in this paper, and the different scenarios that can be analyzed with it. In section 4 we show the influence of some control parameters in the methodology. We finish with the main conclusions of our work.

2. The Schedule and Cost Control Indexes

Most of the scheduling methodologies include uncertainty, as they suppose that activity durations follow a statistical distribution function. The same reasoning can be applied to activity cost variability. Monte-Carlo analysis allows project schedulers and accountants to know about the statistical distribution of the final project duration and total cost. This way, we can compute, for instance, the maximum cost at a confidence level p_c , that is the value (P_c) that satisfies that the probability of the project cost to be lower than P_c is p_c . The same applies to schedule distributions (P_s , p_s). However, project managers do not want to wait until the end of the project to see whether the project has finished “statistically on time”; they need measures during project runtime in order to take the appropriate decisions.

Pajares & Lopez-Paredes (*op.cit.*) define the Project Risk Baseline as “*the evolution of ‘project risk value’ through project execution lifecycle. The risk of the project at any given time is calculated as the risk of the project pending tasks (those not yet completed), assuming that the project has performed as planned until that given time*”. A Risk Baseline can be defined for schedule (SRB) and other one can be defined for cost (CRB). The evolutions of risk baselines indicate how risk is “eliminated” during project runtime; therefore, the risk reduction at time t can be computed as:

$$wc_t = CRB_{t-1} - CRB_t \quad ws_t = SRB_{t-1} - SRB_t \quad (1)$$

The project total buffers (cost and schedule) are computed as:

$$CPBf = |C_{mean} - P_c| \quad SPBf = |S_{mean} - P_s| \quad (2)$$

where C_{mean} and S_{mean} are the mean project cost and mean project duration computed by means of Monte-Carlo simulations. This buffer applies at the end of the project, and it means that, with a confidence of p_c (p_s), the project cost (schedule) will remain less than P_c (P_s), whenever the project remains within the planned variability. But project managers do not need to wait until the end of the project to see whether the project is under planned conditions. Therefore, we need to know the adequate buffer at any time t . To this aim, total buffers are split proportionally to the risk reduction during that time interval:

$$CBf_t = w_{C_t} * CPBf / \sigma_{P_c}^2 \quad SBf_t = w_{S_t} * SPBf / \sigma_{P_s}^2 \quad (3)$$

where $\sigma_{P_c}^2$ and $\sigma_{P_s}^2$ are the total cost and schedule statistical variance, computed by means of Monte-Carlo simulation. Now it is possible to compute the cumulative buffers at time t .

$$ACBf_t = CBf_t + ACBf_{t-1} \quad ASBf_t = SBf_t + ASBf_{t-1} \quad (4)$$

and finally, if we compare these cumulative buffers with the variances from EVM, we obtain the control indexes:

$$CCoI_t = ACBf_{[t=ES]} + CV_t = ACBf_{[t=ES]} + EV - AC \quad (5)$$

$$SCoI_t = ASBf_t + SV(t) = ASBf_t + ES - AT \quad (6)$$

where $CCoI_t$ and $SCoI_t$ are the Cost Control Index and the Schedule Control Index respectively. If $CCoI_t$ ($SCoI_t$) is negative, over costs (delays) will exceed the cumulative “natural” variability of the project, as project variances (cost or schedule) will be higher (in absolute value) than the cumulative buffer.

3. The graphical framework for project control

In order to build up the graphical control framework, we draw the following curves:

- The control indexes: $SCoI$ and $CCoI$, from equations (5) and (6)
- The cumulative buffers: $ASBf$ and $ACBf$, from (4). In particular, we will split equations (2) and will consider a minimum and a maximum cumulative buffer:

$$CPBf_{min} = C_{mean} - P_{c,min} \quad ; \quad SPBf_{min} = S_{mean} - P_{s,min}$$

$$CPBf_{max} = P_{c,max} - C_{mean} \quad ; \quad SPBf_{max} = S_{mean} - P_{s,max}$$

P_{min} and P_{max} must be decided by the the project manager, as this election determine the amplitude of the control limits. Usually, the common lower and upper limits are related to the probabilities of 10% and 90% respectively (see Figure 2); we will use these values in this paper. Then, we will use equations (3) and (4) to compute the cumulative buffers $ACBf_{max,t}$ ($ASBf_{max,t}$) and $ACBf_{min,t}$ ($ASBf_{min,t}$). Finally, we will represent the curves

$$ACBf_{max,t} \text{ and } ACBf_{sum,t} = ACBf_{min,t} + ACBf_{max,t}$$

$$ASBf_{max,t} \text{ and } ASBf_{sum,t} = ASBf_{min,t} + ASBf_{max,t}$$

where $ACBf_{sum,t}$ and $ASBf_{sum,t}$ are computed by simple addition of the maximum and minimum buffers. Whenever the statistical distribution of the cost (schedule) is symmetric, and mean equals mode, then both buffers become equal and $ACBf_{sum,t} = 2 * ACBf_{max,t}$ ($ASBf_{sum,t} = 2 * ASBf_{max,t}$).

$ASBf$'s and $ACBf$'s are computed using the data from the planning phase calculations, as we only need the risk baselines and the project schedule and cost statistical variances, all of them computed by means of Monte-Carlo simulations (see Figure 2a). The control indexes ($SCoI$ and $CCoI$) are computed during project runtime from the EVM calculations.

Within this approach, we distinguish among five different scenarios due to the relative values of the control indexes $SCoI$ and $CCoI$ in relation to the cumulative buffers (Figure 2b).

We will use two different graphics for drawing the two different dimensions, schedule and cost. However, the same reasoning apply to both dimensions, therefore we will argue only for one of them (for instance schedule). We explain the meaning of the curves involved and the different areas they split the graph.

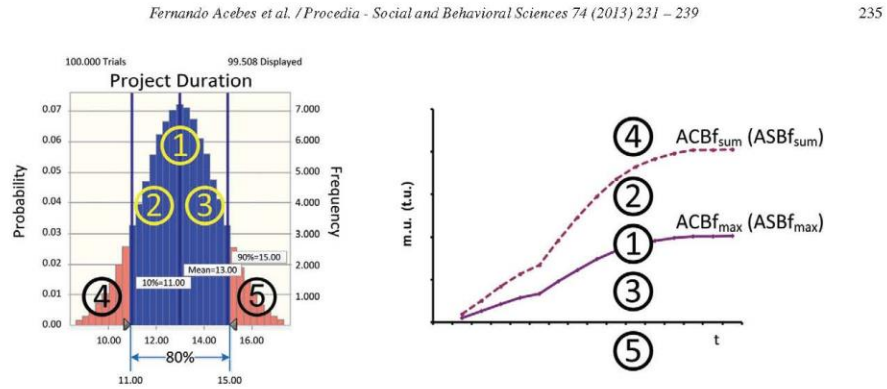


Fig. 2. a) Project duration probability function. b) Graphical framework.

3.1. The cumulative maximum buffer line

When the project is running according to schedule, $SV(t)=0$ and, as a consequence, $SCol_t=ASBf_t$

This means that the project control index lies within the line 1 in Figure 2. In any case, even if the project had overruns in the past, but then it moved again to planning conditions, the control index will be again within the cumulative buffer line.

If the project is delayed, $SV(t)<0$, and then $SCol_t<ASBf_t$, no matter how negative $SV(t)$ is. Therefore, whenever the project is delayed, the control index remains below the cumulative buffer line 1 (areas 3 and 5 in Figure 2). On the other side, if the project is behind schedule, $SV(t)>0$ and $SCol_t>ASBf_t$, and the control index remains above the cumulative buffer line (areas 2 and 4 in Figure 2).

This means that the cumulative buffer line plays the same role than the x-axis in the schedule variance graph used in EVM analysis. In other words, it gives us the same information. But under the new framework, we can not only know whether the project is delayed or ahead of schedule, but also can see whether this delay is within the planned project variability or not.

3.2. The x-axis line

Whenever the project is delayed, then $SV(t)<0$. But there are two possibilities:

- $|SV(t)|>ASBf_t$. Then, $SCol_t<0$ and this mean that the delay is higher than the acceptable delay within the planned variability. The project management team should study whether some unexpected events have taken place in the project, and, if necessary, they should take early corrective actions. This happens in area 5 in Figure 2.
- $|SV(t)|<ASBf_t$. This means that $SCol_t>0$ and the project remains under the planned conditions. Area 3 in Figure 2.

Therefore, the x-axis line separates situations where the project is delayed, but this delay remains under the variability acceptable according to the risk analysis performed during the planning phase, and situations where the delay is higher than the one we can expect from planning conditions.

3.3. The sum of cumulative minimum and maximum buffer lines

Whenever the project is ahead of schedule, $SV(t) > 0$, and as we showed in subsection 3.1., $SCol_t > ASBf_t$. But again, the amount of advancement can be or not within the range of probable results derived from the planned project variability. To know the situation the project is in, we must compute the cumulative minimum buffer line $ASBf_{min,t}$:

- If the project remains within the planned conditions, then $SV(t) < ASBf_{min,t}$, therefore:

$$SCol_t = ASBf_{max,t} + SV(t) < ASBf_{max,t} + ASBf_{min,t} = ASBf_{sum,t}$$

and the control index figure remains within area 2 (Figure 2).

- Finally, if the project is more advanced than it should be according to planning variability,

$$SV(t) > ASBf_{min,t}$$

and as a consequence, $SCol_t = ASBf_{max,t} + SV(t) > ASBf_{max,t} + ASBf_{min,t}$

Therefore, the curve $ASBf_{sum,t} = ASBf_{max,t} + ASBf_{min,t}$ allows project managers to know whether the project is running within planned conditions or not (areas 2 and 4 respectively in Figure 2). Although the project is ahead of schedule in both cases, project management team should play close attention to situations where the advancement is higher than expected, as it means that some unplanned events are taking place in the project, and they could be a source of opportunities for further improvements.

In Figure 3, we show a practical example. Control indexes are represented by means of bars, whereas the two lines show the evolution of $ACBf_{max,t}$ and $ACBf_{sum,t}$ ($ASBf_{max,t}$ and $ASBf_{sum,t}$). The cumulative buffers are computed by means of the data from Monte-Carlo simulations, and the control indexes are computed during project runtime.

In Figure 3, actual time is 10 periods and the project is under budget and ahead of schedule, but these improvements remain under the planned variability.

4. Sensitivity to control limits

The values of p_{min} and p_{max} determine how wide or narrow the control is. In practice, levels of 10% and 90% are commonly used, as they cover the 80 % of the area of the project total duration (cost) statistical function. In this section we study the influence of the control limits, as they will affect both the control indexes and the cumulative buffers.

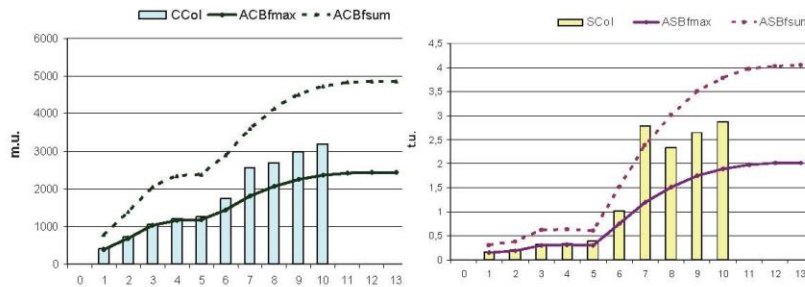


Fig. 3. a) Graphical framework for cost, b) graphical framework for schedule.

For a particular project, in Figures 4 and 5 we show two different control environments: the wider one is drawn in Figure 4, where p_{min} and p_{max} are 10% and 90 %, with values of $P_{min}=11$ t.u. (time units) and $P_{max}=15$ t.u. The narrower environment is shown in Figure 5, with probabilities of 25 % and 75 % and values of 11.95 and 14.06. In both cases, the dark surface under the project duration probability function in Figures 4a and 5a expresses the probability of the project to finish between the control limits.

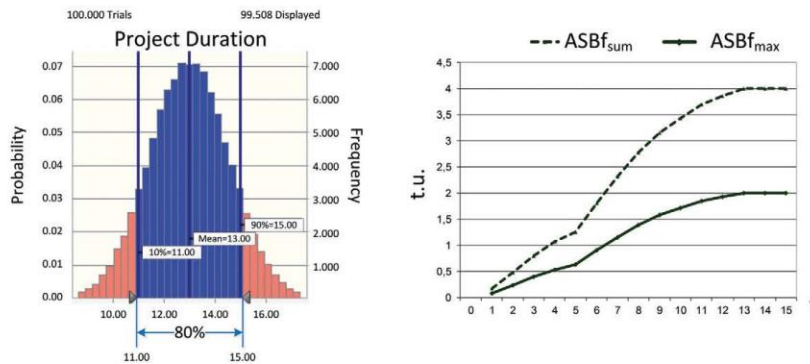


Fig. 4. Control limits: 10%, 90%. a) probability function, b) cumulative buffers.

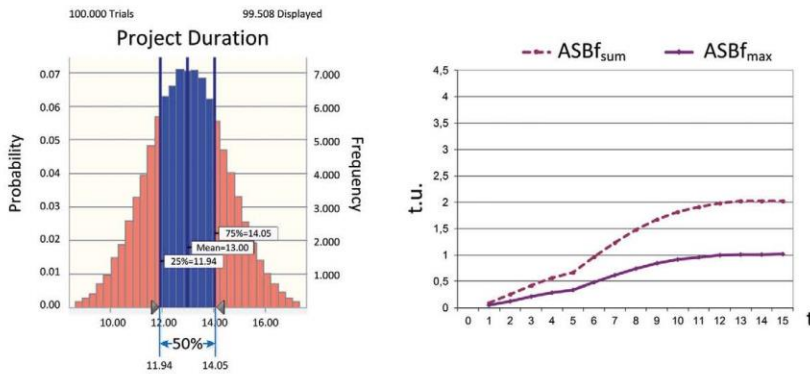


Fig. 5. Control limits: 25%, 75%. a) probability function, b) cumulative buffers.

In Figures 4b and 5b, we represent the cumulative buffers. Of course, in the narrower case, the cumulative buffers are lower than the values of the wider one. But, as we see in Figure 6, the schedule control index also changes. In both cases, during the first three periods, the project is on schedule, as the

control index equals the cumulative maximum buffer ($SCol=ASBf_{max}$). Then, the project is delayed as the Schedule Control Index is below the cumulative buffer line. But in the (10%, 90%) case (Figure 6a) the control index is always positive, that is, the project duration always remains within the control limits and the project manager will not be warned about unexpected events. In the narrower case (25%, 75%), the Schedule Control Index became negative at period 7 and after period 13 (Figure 6b), alerting project manager about not planned changes.

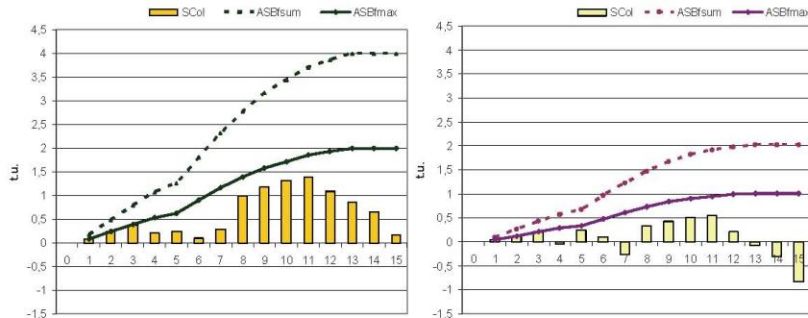


Fig. 6. a) 10,90 scenario, b) 25,75 scenario.

When the control is narrow, warning signals are more frequent, therefore a trade-off must be reached in order to manage the project properly.

5. Conclusions

We have proposed a simple graphical framework for project control. We represent the evolution of the control indexes proposed by Pajares & Lopez-Paredes (*op.cit.*) and we add two new measures: the cumulative maximum buffer and the sum of the cumulative minimum buffer and the cumulative maximum buffer. With these new measures, the project manager can determine graphically whether the project is delayed or not and whether the departure from planned values remains within the expected or planned variability (similar reasoning applies to cost). If overruns are higher than the allowed values, corrective actions should be taken in order to drive the project to control. If good performance is achieved, the methodology alerts project managers about possibilities of improvement.

The framework includes all the information deductible from EVM analysis, but in addition integrates risk analysis and the concept of project planned variability.

It is a simple methodology, as we do not need more data than the data we use to perform EVM analysis and Monte-Carlo simulation. The former is commonly used as a preferred methodology for project control, and Monte-Carlo simulation is frequently performed in risk analysis and PERT calculations.

Acknowledgements

This research has been financed by the project “Computational Models for Strategic Project Portfolio Management”, supported by the Regional Government of Castile and Leon (Spain) with grant VA056A12-2.

References

- Anbari, F. T., (2003). Earned Value Project Management method and extensions. *Project Management Journal*, 34(4), pp. 12-23.
- Fleming, Q., & Koppelman, J. (2005). *Earned Value Project Management*. Third ed. Project Management Institute, PA: Newtowns Square.
- Hazır, Ö., & Shtub, A., (2011). Effects of the information presentation format on project control. *Journal of the Operational Research Society*, 62, pp. 2157-2161.
- Lipke, W. (2003). Schedule is different. *The Measurable News* (Summer), pp. 31-34.
- Lipke, W., 2004. Connecting earned value to the schedule. *The Measurable News*, Winter 1, pp. 6-16.
- Pajares, J. & Lopez-Paredes, A. (2011). An extension of the EVM analysis for project monitoring: The Cost Control Index and the Schedule Control Index. *International Journal of Project Management*, 29(5), pp. 615-621.
- Project Management Institute (PMI), 2005. *Practice Standard for Earned Value Management*. Project Management Institute, Newtown Square, PA.
- Vanhoucke, M., (2011). On the dynamic use of project performance and schedule risk information during project tracking. *Omega*, 39, pp. 416-426
- Vanhoucke, M., (2012). Measuring the efficiency of project control using fictitious and empirical project data. *International Journal of Project Management*, 30, pp. 252-263.

