



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería de Organización Industrial

**Análisis de sensibilidad de actividades
considerando los riesgos del proyecto.**

Autor:

Dávila Ruiz, Claudia

Tutor:

**Acebes Senovilla, Fernando
Departamento de Organización de
Empresas y CIM**

Valladolid, septiembre 2024.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

RESUMEN

La gestión efectiva de un proyecto requiere considerar la posible aparición de riesgos que generan incertidumbre y cambios sobre la duración o el coste del mismo. En este estudio, definiremos y analizaremos indicadores de criticidad, crucialidad y sensibilidad tanto de duración como de coste sobre un proyecto. Con este TFG, buscamos contribuir al conocimiento existente planteando la existencia de riesgos que afecten al coste y a la duración de las actividades y del proyecto, y estudiando ese efecto que tienen sobre las variables. Haremos uso de la Simulación de Monte Carlo y del software CrystalBall para explorar diferentes escenarios y ejecutar las simulaciones que nos ayudarán a la hora de recoger los datos, calcular los indicadores necesarios y analizar los resultados. De este modo, obtendremos una visión realista de la importancia de considerar la aparición de distintos tipos de riesgo sobre un proyecto, y cómo actuar ante ello.

PALABRAS CLAVE

Dirección de proyectos; Riesgo; Gestión del riesgo; Incertidumbre; Gestión de la incertidumbre; Monte Carlo

ABSTRACT

Effective project management requires considering the potential emergence of risks that create uncertainty and lead to changes in the project's overall duration or cost. In this study, we will define and analyze indicators of criticality, cruciality, and sensitivity regarding both duration and cost within a project. With this Final Degree Project, we aim to contribute to existing knowledge by identifying risks that affect the cost and duration of activities, and consequently, the project's total cost and duration, while studying the impact of these risks on the variables. We will use Monte Carlo Simulation and the software known as CrystalBall to explore different scenarios and conduct simulations that will help us gather data, calculate the necessary indicators, and analyze the results obtained. This will provide a realistic view of the importance of considering various types of risks in a project and how to address them effectively.

KEY WORDS

Project Management; Risk management; Uncertainty Management; Monte Carlo Simulation; Sensitivity Analysis



ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Motivación | 1 |
| 1.2. Objetivos | 1 |
| 1.3. Alcance | 1 |
| 1.4. Estructura | 2 |
| 2. RIESGO E INCERTIDUMBRE | 3 |
| 2.1. Marco teórico de la dirección de proyectos | 3 |
| 2.2. Gestión del riesgo | 3 |
| 2.2.1. Orígenes del riesgo | 4 |
| 2.2.2. Riesgo en la dirección de proyectos | 4 |
| 2.2.3. Componentes del riesgo | 5 |
| 2.3. Gestión de la incertidumbre | 6 |
| 2.3.1. Incertidumbre en la dirección de proyectos..... | 6 |
| 2.3.2. Clasificaciones | 6 |
| 2.3.3. Relación entre riesgo e incertidumbre | 7 |
| 2.3.4. Modelos de gestión | 8 |
| 3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD E INDICADORES | 11 |
| 3.1. Criticidad..... | 11 |
| 3.2. Crucialidad..... | 12 |
| 3.3. Sensibilidad | 13 |
| 4. METODOLOGÍA DE TRABAJO | 15 |
| 4.1. Simulación de Monte Carlo | 15 |
| 4.2. Análisis del proyecto: | 15 |
| 4.2.1. Identificación de riesgos: | 16 |
| 4.2.2. Estimación de Probabilidades y Distribuciones: | 16 |
| 4.2.3. Configuración del Modelo de Simulación:..... | 16 |
| 4.2.4. Análisis de Resultados:..... | 17 |
| 4.3. CrystalBall..... | 18 |
| 5. CASO DE ESTUDIO | 19 |
| 5.1. Red de proyecto | 19 |



| | |
|---|-----------|
| 5.2. Componentes | 20 |
| 5.2.1. Actividades | 20 |
| 5.2.2. Riesgos | 22 |
| 5.3. Simulaciones | 23 |
| 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 27 |
| 6.1. Criticidad..... | 27 |
| 6.1.1. Indicadores de duración | 27 |
| 6.1.2. Indicadores de coste | 29 |
| 6.2. Crucialidad..... | 31 |
| 6.2.1. Indicadores de duración | 31 |
| 6.2.2. Indicadores de coste | 32 |
| 6.3. Sensibilidad | 34 |
| 6.3.1. Indicadores de duración | 34 |
| 6.3.2. Indicadores de coste | 35 |
| 6.4. Generales | 37 |
| 6.4.1. Duración media..... | 37 |
| 6.4.2. Desviación estándar Duración | 38 |
| 6.4.3. Coste medio | 40 |
| 6.4.4. Desviación estándar Coste..... | 41 |
| 6.5. Resumen de resultados..... | 42 |
| 7. ESTUDIO ECONÓMICO | 45 |
| 7.1. Fases del proyecto | 45 |
| 7.2. Costes de la Realización del TFG | 46 |
| 7.2.1. Costes Directos | 46 |
| 7.2.2. Costes Indirectos..... | 47 |
| 7.3. Costes Totales de la Realización del TFG | 47 |
| 8. CONCLUSIONES | 48 |
| 9. REFERENCIAS..... | 51 |
| Anexo I - Criticidad | 55 |
| Indicadores de duración | 55 |
| Variando la duración..... | 55 |
| Variando la desviación | 56 |



| | |
|---------------------------------------|----|
| Indicadores de coste | 57 |
| Variando la duración | 57 |
| Variando la desviación | 58 |
| Anexo II - Crucialidad | 59 |
| Indicadores de duración | 59 |
| Variando la duración | 59 |
| Variando la desviación | 60 |
| Indicadores de coste | 61 |
| Variando la duración | 61 |
| Variando la desviación | 62 |
| Anexo III - Sensibilidad | 63 |
| Indicadores de duración | 63 |
| Variando la duración | 63 |
| Variando la desviación | 64 |
| Indicadores de coste | 65 |
| Variando la duración | 65 |
| Variando la desviación | 66 |
| Anexo IV - Generales | 67 |
| Duración media | 67 |
| Variando la duración | 67 |
| Variando la desviación | 68 |
| Desviación estándar Duración | 69 |
| Variando la duración | 69 |
| Variando la desviación | 70 |
| Coste medio | 71 |
| Variando la duración | 71 |
| Variando la desviación | 72 |
| Desviación estándar Coste | 73 |
| Variando la duración | 73 |
| Variando la desviación | 74 |



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| Ilustración 1. Pasos para la simulación de Monte Carlo. Fuente: Acebes et. al. (2022). .. | 17 |
| Ilustración 2. Propuesta de red AON del proyecto. Fuente: elaboración propia. | 19 |
| Ilustración 3. Red AON del proyecto con riesgos incluidos. Fuente: elaboración propia. 20 | |
| Ilustración 4. Representación del proyecto con actividades y riesgos y sus duraciones y costes. Fuente: elaboración propia. | 24 |
| Ilustración 5. Índice de Criticidad variando la duración de A1. | 28 |
| Ilustración 6. Índice de Criticidad variando la desviación estándar de A3. | 29 |
| Ilustración 7. Índice de Coste Relativo variando la duración de A4. | 30 |
| Ilustración 8. Índice de Coste Relativo variando la desviación estándar de A5. | 30 |
| Ilustración 9. Índice de Crucialidad variando la duración de A4. | 31 |
| Ilustración 10. Índice de Crucialidad variando la desviación estándar de A5. | 32 |
| Ilustración 11. Índice de Crucialidad de Coste variando la duración de A2. | 33 |
| Ilustración 12. Índice de Crucialidad de Coste variando la desviación estándar de A3. ... | 33 |
| Ilustración 13. Índice de Sensibilidad de la duración variando la duración de A3. | 34 |
| Ilustración 14. Índice de Sensibilidad de la duración variando la desviación estándar de A5. | 35 |
| Ilustración 15. Índice de Sensibilidad de Coste variando la duración de A4. | 36 |
| Ilustración 16. Índice de Sensibilidad de Coste variando la desviación estándar de A3. ... | 36 |
| Ilustración 17. Variación de la duración media total del proyecto variando la duración de A5. | 37 |
| Ilustración 18. Variación de la duración media total del proyecto variando la desviación estándar de A2. | 38 |
| Ilustración 19. Variación de la desviación estándar de la duración total del proyecto variando la duración de A2. | 39 |
| Ilustración 20. Variación de la desviación estándar de la duración total del proyecto variando la desviación estándar de A4. | 40 |
| Ilustración 21. Variación del coste medio total del proyecto variando la duración de A1. | 40 |
| Ilustración 22. Variación del coste medio total del proyecto variando la desviación estándar de A5. | 41 |
| Ilustración 23. Variación de la desviación estándar del coste total del proyecto variando la duración de A4. | 42 |
| Ilustración 24. Variación de la desviación estándar del coste total del proyecto variando la desviación estándar de A5. | 42 |
| Ilustración 25. Índice de Criticidad variando la duración de cada actividad. | 55 |
| Ilustración 26. Índice de Criticidad variando la desviación estándar de cada actividad. ... | 56 |
| Ilustración 27. Índice de Coste Relativo variando la duración de cada actividad. | 57 |
| Ilustración 28. Índice de Coste Relativo variando la desviación estándar de cada actividad. | 58 |
| Ilustración 29. Índice de Crucialidad variando la duración de cada actividad. | 59 |
| Ilustración 30. Índice de Crucialidad variando la desviación estándar de cada actividad. 60 | |



| | |
|--|----|
| Ilustración 31. Índice de Crucialidad de Coste variando la duración de cada actividad. .. | 61 |
| Ilustración 32. Índice de Crucialidad de Coste variando la desviación estándar de cada actividad..... | 62 |
| Ilustración 33. Índice de Sensibilidad de la duración variando la duración de cada actividad..... | 63 |
| Ilustración 34. Índice de Sensibilidad de la duración variando la desviación estándar de cada actividad. | 64 |
| Ilustración 35. Índice de Sensibilidad de Coste variando la duración de cada actividad. . | 65 |
| Ilustración 36. Índice de Sensibilidad de Coste variando la desviación típica de cada actividad..... | 66 |
| Ilustración 37. Variación de la duración media total del proyecto variando la duración de cada actividad. | 67 |
| Ilustración 38. Variación de la duración media total del proyecto variando la desviación estándar de cada actividad. | 68 |
| Ilustración 39. Variación de la desviación estándar de la duración total del proyecto variando la duración de cada actividad. | 69 |
| Ilustración 40. Variación de la desviación estándar de la duración total del proyecto variando la desviación estándar de cada actividad..... | 70 |
| Ilustración 41. Variación del coste medio total del proyecto variando la duración de cada actividad..... | 71 |
| Ilustración 42. Variación del coste medio total del proyecto variando la desviación estándar de cada actividad. | 72 |
| Ilustración 43. Variación de la desviación estándar del coste total del proyecto variando la duración de cada actividad..... | 73 |
| Ilustración 44. Variación de la desviación estándar del coste total del proyecto variando la desviación estándar de cada actividad. | 74 |



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Relación de precedencia de las actividades | 19 |
| Tabla 2. Datos para el cálculo de la duración de las actividades..... | 21 |
| Tabla 3. Datos para el cálculo del coste de las actividades | 21 |
| Tabla 4. Datos para el cálculo del impacto de los riesgos | 23 |



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La motivación para llegar a cabo este “Análisis de sensibilidad de actividades considerando los riesgos del proyecto” proviene de la necesidad del cálculo y análisis de los indicadores de sensibilidad que obtendremos de los datos de coste y duración del mismo, tomando en consideración los posibles riesgos que se puedan desarrollar a lo largo de su ejecución, y cómo estos influyen sobre estos factores en el proyecto final.

El conocimiento de la influencia de los riesgos sobre las variables coste y duración, supone la mejora en la toma de decisiones y en la perspectiva estratégica del proyecto. Para ello, estudiaremos los principales indicadores de sensibilidad del proyecto en cuestión, sus variaciones y el porqué de éstas, en base a la presencia de determinados riesgos de duración y coste.

Este TFG se encuadra dentro de las líneas de trabajo de INSISOC, Grupo de Investigación Reconocido (GIR) de la Universidad de Valladolid. En concreto, dentro de la línea que tiene como objetivo la elaboración de metodologías e indicadores para el seguimiento y control de proyectos en entornos con incertidumbre (Acebes et. al. 2014, Acebes et. al. 2015, Acebes et. al. 2021, Acebes, Pajares, et. al. 2021), y más concretamente, en el análisis de sensibilidad de las actividades del proyecto (Acebes et. al. 2015, Curto et. al. 2023, Acebes et. al. 2016).

1.2. Objetivos

Al comienzo de un proyecto es primordial asimilar que, a lo largo de la vida del mismo, surgirán efectos adversos (riesgos) que afectarán al desarrollo de este de manera negativa; a no ser que se sepan aprovechar y esa influencia se convierta en algo positivo.

El objetivo principal del análisis que vamos a realizar en este documento es evaluar cómo los distintos riesgos identificados en el proyecto -el cual plantearemos más adelante-, afectan a su desarrollo y resultados. Con este análisis se trata de entender mejor el modo en que los cambios en las variables que componen el proyecto influyen en su viabilidad, cronograma, costos, calidad, etc.

1.3. Alcance

El alcance del análisis puede variar en función de las necesidades y la complejidad de dicho proyecto. No obstante, se puede resumir en seis puntos principales:

1. Identificación de los riesgos: se identifican y clasifican los riesgos relevantes (de coste, de duración, internos, externos, ...).



2. Selección de las variables clave: se identifican las variables que se ven afectadas por los riesgos anteriores. Éstas pueden incluir aspectos financieros, duraciones, calidad, etc.
3. Establecimiento de escenarios: se desarrollan posibles escenarios que puedan surgir combinando diferentes valores de las variables clave, obteniendo variedad de resultados (escenarios) a estudiar.
4. Análisis de sensibilidad: supone la realización de un análisis cuantitativo para valorar cómo los cambios realizados sobre las variables afectan en los resultados finales del proyecto.
5. Análisis de influencia: ayuda a comprender el porqué de la influencia de los riesgos entre sí y su propagación a través de las variables clave, ayudando en la identificación de relaciones y dependencia entre los riesgos.
6. Desarrollo de estrategias de mitigación: tomando como base los resultados extraídos de los análisis anteriores, se trata de desarrollar estrategias con la intención de mitigar el efecto de los riesgos de manera efectiva, a través de medidas de control y planes de contingencia, aumentando la probabilidad de éxito del proyecto final.

1.4. Estructura

Se podría decir que el documento a realizar se estructurará en dos secciones principales: teórica y práctica. Comenzaremos con la definición teórica de la dirección de proyectos y los riesgos y la incertidumbre que surgen a lo largo del desarrollo de los mismos, de modo que queden explicados todos los términos que más adelante podremos utilizar. También plantearemos los objetivos del análisis de sensibilidad y los indicadores que nos serán útiles a la hora de realizar cálculos. Finalizamos el bloque teórico dedicando un apartado a la metodología de trabajo empleada.

Una vez aclarada esta parte, nos centraremos en la parte más práctica de nuestro trabajo: la simulación. Se explicará el caso de estudio que hemos utilizado y cómo hemos trabajado con él. Hablaremos de sus actividades, riesgos, cambios realizados en las simulaciones y los resultados de las mismas. Con esto, trataremos de generar un análisis completo de sensibilidad sobre los riesgos del proyecto planteado. Tras analizar estos resultados, terminaremos con un apartado en el que presentaremos las conclusiones obtenidas del estudio e incluiremos un estudio económico en el que desglosaremos los costes de realización que se asocian a este trabajo.



2. RIESGO E INCERTIDUMBRE

Dedicaremos este apartado para hablar de la dirección de proyectos y su relación con el estudio y gestión de los riesgos. Ahondaremos en el marco teórico de la dirección de proyectos, así como en la gestión de riesgos e incertidumbre, y las similitudes y diferencias entre estos dos términos.

2.1. Marco teórico de la dirección de proyectos

Según el PMBOK® Guide (PMI, 2017), elaborado por el Project Management Institute (PMI), cuando hablamos de dirección o gestión de proyectos nos referimos a una disciplina que se basa en aplicar diversos conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades de un proyecto con la intención de conseguir su correcto desarrollo y resultados que conlleven a alcanzar el éxito. Los puntos más importantes que pueden definir la dirección de proyectos son los siguientes (Bucero, 2013):

1. Objetivos claros.
2. Ciclo de vida del proyecto.
3. Gestión de recursos.
4. Planificación.
5. Comunicación efectiva.
6. Gestión de riesgos.
7. Seguimiento y control.
8. Cierre del proyecto.
9. Enfoque multidisciplinario.
10. Marco de buenas prácticas.

La unión de todos estos puntos, realizados de manera correcta, llevarán a que el final del proyecto se dé de forma exitosa, cumpliéndose los objetivos previamente fijados.

En definitiva, puede decirse que un proyecto es un trabajo con inicio y fin, que ha de estar bien planificado y tener un control constante durante todo su ciclo de vida. De este modo, se podrá realizar una gestión correcta de los problemas que puedan ir surgiendo, que generen riesgos o incertidumbre (Bucero, 2013).

2.2. Gestión del riesgo

Es importante conocer el origen de las distintas definiciones de riesgo y los contextos en los que se aplica cada una de ellas, además de los componentes que conforman esos riesgos. De esta manera, podremos construir una definición de riesgo adecuada para aplicar en el estudio que queremos realizar. A lo largo de este apartado nos centraremos en explicar estos puntos para lograr comprender el término “riesgo” y cómo lo aplicamos sobre nuestro proyecto.



2.2.1. Orígenes del riesgo

Existen numerosas definiciones para el término “riesgo”. En ocasiones, esto supone que sea difícil concretar de manera exacta una de estas definiciones para aplicarla sobre el campo que queramos estudiar. Es de gran importancia para plantear su gestión, esbozar una definición que se aproxime a lo que queremos referirnos con “riesgo” en nuestro caso.

Definimos riesgo de un proyecto como las posibilidades de ocurrencia de aquellos eventos o condiciones inciertos que puedan tener un efecto negativo o positivo sobre el funcionamiento y el desarrollo de las actividades del proyecto y, por lo tanto, en sus resultados; como el cumplimiento de plazos, costes, alcance, etc (Lavell, 2001).

Con esta definición englobamos todos los aspectos estadísticos de probabilidad y consecuencias que permitirán realizar un estudio a través de diferentes modelos y herramientas de estudio del riesgo. Podremos formular así los principios de la gestión y la ingeniería del riesgo (*risk management & risk engineering*), relacionando los riesgos en cuestión con la gestión de variables de coste y duración, entre otras (Vasvari, 2015).

La gestión del riesgo en cualquier proyecto de ingeniería va directamente relacionada con el momento en el que aparecen los riesgos. Considerando el ciclo de vida completo de un proyecto, podemos ir identificando los riesgos emergentes a lo largo del mismo. De este modo se hace posible su clasificación, a través de la comprobación de su influencia, su probabilidad de ocurrencia, las posibles consecuencias que pueda suponer su desarrollo, el impacto general en los objetivos del proyecto, etc. Esto permitiría la adopción de acciones correctivas o preventivas, en función de cuándo se tomen, asumiendo el empleo de diferentes recursos y lo que conllevaría respecto a los resultados finales del proyecto (Lavell, 2001).

Esta gestión del riesgo aplicada por parte de las organizaciones e individuos deberá aportar un valor añadido al proyecto, siendo uno de los factores más importantes a la hora de la toma de decisiones respecto al mismo. Se deberá aplicar de manera adecuada, consiguiendo la minimización del impacto negativo de los riesgos y aprovechándolos, convirtiéndolos en oportunidades, que maximicen beneficios y colaboren en alcanzar de manera sobresaliente los objetivos determinados del proyecto.

2.2.2. Riesgo en la dirección de proyectos

La existencia del riesgo en la dirección de proyectos es algo inexorable y que ha de ser gestionado a conciencia puesto que el tratamiento correcto de los riesgos puede suponer el éxito en el desarrollo de los proyectos. Estos riesgos se pueden presentar como cambios imprevistos respecto al alcance, el cronograma, los presupuestos establecidos, desafíos tecnológicos, cambios en la opinión del cliente o numerosos factores externos impredecibles. El poder anticipar, evaluar y dar una respuesta rápida y eficaz ante dichos riesgos es un factor fundamental para lograr el éxito (Alleman, 2018).



Lavell (2001) determina en su estudio que la gestión de riesgos supone para la dirección de proyectos que el reconocimiento temprano de los riesgos por aparecer y su clasificación, derive en estrategias para moderar las amenazas e impulsar las oportunidades. Esta identificación y clasificación de los riesgos se realiza a través de diversas técnicas, entre las cuales destacan las lluvias de ideas o *brainstorming*, en las que se recogen diversas ideas sobre un tema concreto y que pueden incluir las preocupaciones de los clientes y promotores permitiendo crear una lista más extensa con opiniones de todas las partes implicadas; el análisis retrospectivo, con el que se examinan datos históricos y ocurrencias pasadas que puedan servir de precedente; o la consulta a otros profesionales que, con su opinión y experiencia puedan colaborar en la identificación de amenazas u oportunidades dentro del proyecto de estudio. No obstante, con esta identificación inicial no es suficiente, sino que habrá que realizar una revisión continua, asumiendo que pueden surgir nuevos imprevistos constantemente.

Así, se promueve una toma de decisiones informada que colabora en el correcto desarrollo del proyecto, logrando el éxito en el alcance de los objetivos dentro de los límites determinados por los plazos y recursos establecidos (Lavell, 2001).

2.2.3. Componentes del riesgo

Para la correcta identificación e interpretación de los riesgos de un proyecto es de gran importancia conocer sus componentes principales. Según el estudio de Alleman (2018), el riesgo está formado por causas, riesgo y consecuencias

La causa del riesgo es la fuente u origen del riesgo. Estas causas son muy amplias y se pueden clasificar en internas o externas al proyecto. No obstante, no pueden ser controladas, simplemente se puede tratar de minimizar su posibilidad de ocurrencia o su impacto, una vez ocurridas (Romano et al., 2011).

Vasvari (2015) expone que es crucial la evaluación y gestión de estas causas para conseguir prevenir su aparición o, en caso de ya existir, tratar los riesgos con la intención de mitigar su efecto sobre el funcionamiento global del proyecto.

Los riesgos en sí son los incidentes que se desencadenan como resultado de las causas de riesgo, es decir, la representación de la materialización del riesgo potencial.

Al igual que las causas, y al ir directamente relacionadas con ellas, será posible clasificar los hechos en función del detonante que los haya causado.

Finalmente, definimos las consecuencias como el impacto que tiene un riesgo sobre el proyecto y que supone la cuantificación del efecto resultante generado por los riesgos que hayan tenido o no lugar a lo largo del ciclo de vida del proyecto (Alleman et al., 2018).



Este impacto puede ser negativo o positivo y afectar a diferentes aspectos del proyecto, en función del origen y clasificación de estos riesgos ocurridos, como el cronograma, el alcance, los costos, etc.

La intención de la gestión de los riesgos es conseguir la no materialización de las amenazas o los impactos negativos, y el aprovechamiento de las oportunidades o los impactos positivos.

2.3. Gestión de la incertidumbre

Dedicaremos este apartado a tratar de encontrar una definición de incertidumbre aplicable al análisis que queremos realizar a lo largo de este trabajo. Además plantearemos una clasificación de los distintos tipos de incertidumbre existentes y explicaremos cuándo aplicar cada uno de ellos.

También nos centraremos en la relación entre riesgo e incertidumbre y cómo gestionarlos, tema central de este punto y que es de gran importancia entender para la realización de un correcto análisis.

2.3.1. Incertidumbre en la dirección de proyectos

Al igual que ocurre con el riesgo, existen numerosas acepciones para la definición de incertidumbre y parece no quedar claro cuál de ellas puede ser aplicada a según qué campos. Sin embargo, en lo que la mayoría de las corrientes coinciden es en incluir el concepto “ignorancia” o “desconocimiento” a la hora de definirla (Berrío, 2007).

Si vemos la incertidumbre desde un punto de vista estadístico, podemos modelarla y generar así ecuaciones que permitan la cuantificación de la misma. De este modo, la incertidumbre del proyecto se puede definir para nuestro caso como la probabilidad de que la función objetivo no alcanzará su valor objetivo planificado (Acebes et al., 2015). No obstante, más adelante veremos que existen ciertas corrientes de pensamiento que no coinciden con esto.

Haciendo una unión entre las definiciones encontradas, la incertidumbre en la dirección de proyectos se refiere a la falta de conocimiento de eventos futuros que puedan aparecer e influir en el desarrollo y la obtención de los objetivos del proyecto. La manifestación de esta incertidumbre puede adoptar diversas formas y puede suponer un impacto más o menos significativo en función de los factores del proyecto sobre los que influya, haciendo que sea necesario plantear nuevas planificaciones y formas de ejecutar el proyecto.

2.3.2. Clasificaciones

La correcta separación y clasificación de los distintos tipos de incertidumbre que puedan surgir en el proyecto es de extrema importancia para realizar un correcto modelaje que sirva de ayuda a la hora de aplicar la gestión correspondiente. De este modo, teniendo bien diferenciada la incertidumbre a tratar, nos quedará claro qué recursos aplicar para solucionar los problemas relacionados con esta (Acebes et. al., 2015).



Al igual que definiciones, existen múltiples modos de clasificar los tipos de incertidumbre. Los que mejor aplican al estudio que realizamos en este documento podrían ser los siguientes:

- Epistemológica (falta de información, surge de la falta de datos) y ontológica (desconocimiento relacionado con la naturaleza de un evento en el que, a pesar de conocer toda la información disponible, siguen surgiendo factores impredecibles).
- Sistemática (causada por factores que se pueden predecir, pero son desconocidos. Se suele dar por errores en los modelos planteados) y aleatoria: (se refiere a la variabilidad y al azar de los datos o los eventos. Puede modelarse mediante distribuciones de probabilidad).
- Interna (relacionada con factores dentro de la propia gestión del proyecto) y externa (por factores sobre los cuales no hay control por parte de la organización).
- Operativa (se relaciona con las actividades del día a día y las operaciones comerciales relacionadas con el proyecto); estratégica (se refiere a la incertidumbre respecto a las decisiones importantes del proyecto, desde inversiones hasta selección de recursos, por ejemplo) y táctica (se genera cuando hay fallos en la planificación y ejecución de actividades).
- Cualitativa (incertidumbre que se describe de manera no numérica (nivel alto, medio o bajo de incertidumbre, por ejemplo)) y cuantitativa (se puede expresar de manera numérica (a través de intervalos de confianza, por ejemplo))

2.3.3. Relación entre riesgo e incertidumbre

Existen diferentes corrientes a la hora de definir y relacionar el riesgo y la incertidumbre. Berrío, J. G. R. (2007) defiende que, concretamente, hay tres corrientes principales siendo la primera de ellas el hecho de ni siquiera diferenciarlos y tratar riesgo e incertidumbre como una misma cosa; la segunda se basa en definir el riesgo como una categoría de la incertidumbre y la tercera, aquella que hace una clara diferenciación entre ambos términos.

La primera de las corrientes de pensamiento se asocia principalmente a los científicos sociales, que mezclan y confunden riesgo e incertidumbre, convirtiéndolos en una misma cosa.

Los conceptos riesgo, incertidumbre y probabilidad han sido motivo de confusión en diversas áreas y han supuesto el debate entre intelectuales al respecto. Entre estos tres, la incertidumbre es lo que parece ser más difícil de definir y entender, por eso se suele tender a entender que el riesgo es incertidumbre, y viceversa (Berrío, 2007).

Afirmaciones como la del sociólogo Beck (1998), que sostiene que el desconocimiento de los riesgos supone un incremento de los mismos, se ciñen a esta corriente. Con esto se refiere a que un riesgo ignorado, es incertidumbre. Es decir, hace referencia a la incertidumbre epistemológica y la ontológica, basándose en el conocimiento.



Otra corriente muy interesante es la que plantea David Hillson (2017) en la que define riesgo como “la incertidumbre que importa”. En este caso, el riesgo también se identifica como incertidumbre, pero como una categoría o grado de este. Esta corriente se relaciona con los tipos de incertidumbre más estadísticos, los que dependen de probabilidades, para así poder definir sus grados (Acebes et. al., 2022). De este modo, la incertidumbre es un complemento de los riesgos. Se define la incertidumbre como duda, lo que no se conoce y como algo impredecible, en lo que no nos podemos basar para una buena toma de decisiones (Berrío, 2007).

El grado de incertidumbre que tengamos, supondrá una separación entre lo que se desconoce y lo conocido. Según esta corriente, cuanto mayor es este grado de incertidumbre, más se aproximan las definiciones de riesgo e incertidumbre, acercándonos a la primera corriente descrita.

Finalmente, nos encontramos con la tercera corriente, en la que Lefley (1997) plantea un concepto de riesgo formado a partir del conocimiento y un concepto de incertidumbre formada en base a la ignorancia, que no puede ser predicha ni obtenida a partir de probabilidades. Esta incertidumbre es un problema por afrontar.

La forma definitiva que emplea el autor para diferenciar estos dos conceptos tan confusos es identificando la incertidumbre como duda y el riesgo como posibilidad. La forma de afrontar el problema que presenta la incertidumbre, teniendo en cuenta que el conocimiento certero no es algo posible, será entonces la creencia. Creando una red propia de conceptos, el individuo creará un conocimiento subjetivo que, para la persona que lo forja, supondrá una realidad que, en cierto modo es conocimiento. Así disminuirá la incertidumbre y podremos centrarnos en el riesgo, que sí será posible modelar y tatar.

2.3.4. Modelos de gestión

En nuestro caso, consideraremos la incertidumbre como la falta de conocimiento, en general. Su gestión es esencial en los proyectos en los que no es posible predecir los resultados que puedan tener lugar. A continuación, se definen algunos de los modelos más comunes para su gestión y tratamiento según el estudio de Muñoz et. al., 2016.

El análisis de sensibilidad requiere la identificación de las variables principales o clave que afecten al alcance de los resultados y objetivos esperados de un proyecto, y realizar una evaluación de cómo afectaría a los resultados la realización de cambios en estas variables.

Otra forma de análisis es mediante el planteamiento de diferentes escenarios con cierta posibilidad de ocurrencia. Se observa la influencia de cada combinación específica de las variables en cada uno de estos escenarios sobre los resultados finales y se desarrollan estrategias que ayuden a conseguir aquellos favorables para el proyecto.

Los modelos más conocidos y utilizados son los de simulación, los cuales, a través del empleo de modelos basados en las matemáticas y la estadística, crean representaciones virtuales del



proyecto realizando la ejecución de numerosas simulaciones y observando qué desarrollo presentará el proyecto en función de las condiciones escogidas en cada simulación. Finalmente se realiza un estudio en función de estos desarrollos que permita comprender la incertidumbre y los riesgos presentes.

Los análisis de riesgos cuantitativos ofrecen un enfoque cuantitativo que, mediante el uso de datos y modelos estadísticos consigue una medición de la incertidumbre y el riesgo de los proyectos y emplea distribuciones de probabilidad para modelar eventos inciertos. Realizan una medición de las variables de salida (coste y duración totales del proyecto) a partir de la entrada de datos de duración y coste de las actividades, afectadas por el riesgo.

Finalmente, tenemos el método de Monte Carlo (MCS). Este podría considerarse una mezcla de los métodos ya descritos puesto que supone la realización de simulaciones de Monte Carlo para conseguir un modelaje adecuado de la incertidumbre que ofrezca resultados probables. Se trata de un método matemático que destaca por su habilidad para analizar escenarios inciertos de manera probabilística (Acebes et. al. 2024). Los MCS son preferidos sobre otros métodos porque son fáciles de usar, accesibles y simples. Suelen ser realmente útiles en casos en los que el número de variables inciertas es elevado y es necesario realizar un enfoque desde el punto de vista probabilístico (Al-Duais et. al., 2023).

El PMBOK® (PMI, 2017) define la simulación de Monte Carlo como una técnica de análisis donde un modelo informático se itera muchas veces, con los valores de entrada elegidos al azar para cada iteración a partir de los datos de entrada, incluidas distribuciones de probabilidad y ramas probabilísticas. Las salidas se generan para representar el rango de posibles resultados para el proyecto.



3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD E INDICADORES

Un análisis de sensibilidad es una técnica utilizada para evaluar cómo los cambios aplicados en una variable particular afectan en el resultado o los resultados de un modelo, un sistema o una situación. Consiste en identificar y cuantificar la influencia que distintos factores tienen sobre un resultado específico. Así, el análisis se basa en la premisa de que la optimización es el escenario principal, considerando la incertidumbre como un posible factor negativo. El objetivo final de este análisis es explorar y comprender la sensibilidad de la solución óptima frente a variaciones en los factores fundamentales, siendo la insensibilidad la solución ventajosa (Muñoz et al., 2016).

Este análisis emerge como una herramienta valiosa en el contexto de la dirección de proyectos, dentro del análisis cuantitativo de los riesgos, permitiendo a los gestores explorar escenarios alternativos y evaluar la robustez del proyecto frente a diversas condiciones. En este punto, nos adentraremos en el análisis de sensibilidad de la duración y el coste de un proyecto, explorando índices de crucialidad, criticidad y sensibilidad, que proporcionarán una visión detallada de cómo factores específicos influyen en la trayectoria temporal y financiera del proyecto, facilitando así una gestión más efectiva de la incertidumbre inherente a cualquier iniciativa (Gálvez, 2015).

Para nuestro caso, tendremos que plantear los indicadores necesarios que queremos calcular. Estos indicadores representarán la criticidad, la crucialidad y la sensibilidad de cada una de las actividades de las que se compone el proyecto. Será necesario determinar cómo calcular estos tres indicadores diferenciando entre si se calculan tomando los datos de duración o los de coste tanto de las actividades, como del proyecto en general. Para ello, hay que tener clara la diferencia que existe entre calcular la duración total del proyecto, para la cual utilizaremos las duraciones de las actividades que pertenecen al camino crítico, y el coste total del proyecto, que será la suma de los costes de todas las actividades del proyecto, independientemente de si tienen ocurrencia o no.

En los siguientes apartados procederemos a explicar los diferentes indicadores que comentamos que utilizaremos para la realización de nuestro análisis.

3.1. Criticidad

La criticidad en la gestión de proyectos se centra en la identificación y evaluación de las actividades que son críticas para el cumplimiento de los plazos. Actividades críticas son aquellas que, si se retrasan, afectarían directamente la duración total del proyecto.

El indicador de criticidad para la duración de un proyecto es conocido como CI (*Criticality Index*) y se define como el porcentaje de las veces, del total de las simulaciones, que una actividad pertenece al camino crítico (Martin, 1965). Sabiendo esto, para su cálculo, tendremos que plantear los posibles caminos críticos que puedan surgir y, en cada simulación, ver cuántas veces tiene lugar cada camino crítico posible y las actividades que pertenecen a cada uno de estos.



Se calcula como el porcentaje de simulaciones en las que una actividad pertenece al camino crítico. Siendo t_{fi} la holgura de la actividad i , podemos representarlo con la ecuación (1) (Acebes F. et. al., 2021):

$$CI = P(t_{fi} = 0) \tag{1}$$

En nuestro caso, analizaremos un proyecto en el que las actividades no son deterministas, y se incluirá incertidumbre como, por ejemplo, la aleatoria. A través de la simulación de Monte Carlo, se efectuarán numerosas simulaciones, las cuales se analizarán posteriormente. Para cada una de estas simulaciones variaremos distintos factores (duración, varianza, etc.) que supondrán la obtención de resultados diferentes entre sí, permitiéndonos ver cómo cada una de estas variaciones afectan sobre el proyecto. Esto supone que no existirá un único camino crítico fijo, sino que las actividades que pertenezcan a este irán cambiando en función de las variaciones realizadas en cada una de las simulaciones.

La gestión de las actividades críticas es esencial para evitar retrasos y garantizar la finalización exitosa del proyecto dentro del plazo previsto.

El indicador de criticidad para el coste de un proyecto es conocido como RC (*Relative Cost*) y se define como el coste de cada actividad entre el coste total del proyecto. Para su cálculo, se realizará la media de los valores obtenidos en cada simulación para esa división de los factores. Siendo x el coste de una actividad y X el coste total del proyecto, podemos representar el cálculo del RC de la siguiente manera (ecuación (2)):

$$RC = x/X \tag{2}$$

3.2. Crucialidad

Utilizamos la crucialidad para evaluar la medida en que una actividad es crucial o importante sobre el proyecto en general. Medimos la influencia de la duración de la actividad en la duración total del proyecto utilizando el coeficiente de correlación estadístico (coeficiente de correlación de Pearson) entre ambas duraciones, obtenido a partir del conjunto de simulaciones. Con los resultados obtenidos, evaluamos si el proyecto siempre se extiende cuando una actividad específica dura más tiempo, y se acorta cuando esa misma actividad dura menos, entonces podemos afirmar que dicha actividad tiene un alto índice de crucialidad o que es importante para el proyecto. Identificar las actividades cruciales es esencial para una gestión eficaz de los recursos y sus costes (Williams, 1992).

El indicador de crucialidad para la duración de un proyecto es conocido como CrI (Cruciality Index). Williams (1992) se centra en medir la relevancia de la actividad medida como la correlación entre su duración (d) y la duración del proyecto (D) a través del coeficiente de correlación de Pearson (ecuación (3)):

$$CrI(r) = \frac{\sum_{k=1}^{nrs} (d_i^k - \bar{d}_i) * (RD^k - \overline{RD})}{nrs * \sigma_{d_i} * \sigma_{RD}} \tag{3}$$



Donde $\sum_{k=1}^{nrs} (d_i^k - \bar{d}_i) * (RD^k - \overline{RD})$ es la suma de los productos de las diferencias entre las duraciones individuales de la actividad i (d_i^k) respecto a la duración media (\bar{d}_i), y la diferencia entre la demora del proyecto (RD^k) y su media (\overline{RD}); y nrs indica el número total de simulaciones realizadas. Además, σ_{d_i} y σ_{RD} representan las desviaciones estándar de la duración de la actividad i y de los retrasos del proyecto, respectivamente; es decir, la variabilidad de estos factores a lo largo de la sucesión de simulaciones (Vanhoucke, 2012).

El indicador de crucialidad para el coste de un proyecto es conocido como CCI (Cost Cruciality Index) y se define como una relación entre el coste de cada actividad (c) y el coste final del proyecto (C) como se muestra en la ecuación (4):

$$CCI = c/C \quad (4)$$

Es importante tener en cuenta la crucialidad y no sólo la criticidad a la hora de priorizar las actividades dentro del proyecto ya que, si nos centramos sólo en observar y analizar el factor de criticidad podemos llegar a resultados erróneos eligiendo una actividad por el simple hecho de que su criticidad sea elevada, sin plantearse si tiene una crucialidad mínima para el proyecto. Es decir, es posible tener el caso en el que una actividad que no sea importante para el proyecto pertenezca al camino crítico y, por lo tanto, tenga un alto valor de CI; pero cuyo CrI sea bajo porque su variabilidad no influya dentro del resultado final del proyecto. Combinando estos dos factores, es como llegaremos a las conclusiones adecuadas.

3.3. Sensibilidad

La sensibilidad en proyectos se refiere a la medida en que el resultado final del proyecto es susceptible a cambios en los factores que lo forman. Trata principalmente de mostrar la importancia de la individualidad de las actividades sobre la duración final del proyecto (Williams, 1992).

El indicador de sensibilidad para la duración de un proyecto es conocido como SSI (*Schedule Sensitivity Index*) y se define con la siguiente ecuación (5):

$$SSI = CI * \frac{\sigma_{duración\ actividad}}{\sigma_{duración\ total}} \quad (5)$$

En relación con el coste, se refiere a entender cómo variaciones en las variables de recursos o tareas impactan en el presupuesto total del proyecto.

El indicador de sensibilidad para el coste de un proyecto es conocido como CSI (*Cost Sensibility Index*) y se define con la siguiente ecuación (6):

$$CSI = RC * \frac{\sigma_{coste\ actividad}}{\sigma_{coste\ total}} \quad (6)$$



4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para la realización del análisis de sensibilidad haremos uso de la simulación de Monte Carlo y los programas CrystalBall (Oracle, 2023) y Excel.

Utilizaremos el software CrystalBall (by Oracle), para automatizar las simulaciones necesarias y obtendremos los resultados de cada una de ellas. Al tratarse de un 'api' que corre en el entorno Excel, el diseño del modelo del proyecto, con sus actividades, riesgos, duraciones y costes, se tendrá que generar en el mismo. De este modo, podremos ejecutar Monte Carlo de forma automática a través de CrystalBall, obteniendo los datos necesarios para el cálculo de los indicadores definidos.

Dedicaremos este apartado a la descripción de cada uno de estos componentes y a explicar cómo haremos uso de ellos detalladamente.

4.1. Simulación de Monte Carlo

La simulación de Monte Carlo (Rodríguez-Aragón, 2011) es una técnica que utiliza el muestreo estadístico para modelar la probabilidad de diversos resultados en situaciones que involucran incertidumbre. En el contexto de la gestión de proyectos, la simulación de Monte Carlo es a menudo utilizada para evaluar la variabilidad en la duración y los costes del proyecto, considerando los riesgos asociados a las actividades.

Utilizando la simulación de Monte Carlo, es posible elaborar modelos de simulación para proyectos, los cuales ofrecen una distribución de probabilidad de la duración total del proyecto basada en las duraciones de las actividades, representadas previamente mediante una distribución de probabilidad. Además, es factible obtener la función de distribución del coste total del proyecto (Acebes et al., 2016).

A continuación, se presenta una explicación paso a paso de cómo se puede aplicar la simulación de Monte Carlo en la gestión de proyectos:

4.2. Análisis del proyecto:

En primer lugar, es importante enumerar las actividades presentes en el proyecto y los riesgos asociados a ellas, tanto en términos de duración como de coste. Los riesgos pueden incluir, por ejemplo, la posibilidad de retrasos en la entrega de suministros, cambios en los requisitos del cliente, variaciones en los costes de recursos, etc.

Siguiendo los pasos marcados por el PMBOK (PMI, 2017), comenzaremos por obtener un cronograma del proyecto a través del listado de actividades que lo conforman. Basándonos en esta lista de actividades y el conocimiento de sus duraciones y relaciones de precedencia, podremos obtener la red AON (*Activities On Nodes*) del proyecto.



La intención principal de este planteamiento es obtener una estimación realista de la duración y el coste de las actividades. No obstante, hay que tener en cuenta que esta estimación es un factor subjetivo que dependerá de quién haga la identificación. Esta subjetividad no debe de ser excluida de la gestión de riesgos puesto que afecta a la hora de asumir riesgos y evaluarlos (Vasvari, 2015). Por supuesto, existen formas de eliminar o mitigar al máximo el sesgo objetivo. Por ejemplo, utilizando descripciones cuantitativas a la descripción de categorías (Acebes et al., 2022).

4.2.1. Identificación de riesgos:

Para una buena gestión de los riesgos de un proyecto lo principal es realizar una identificación de los mismos, en la cual es importante incluir las actividades a las que afectan y de qué modo (AACE, 2011).

Existen numerosas formas para realizar la identificación de los riesgos: entrevistas a expertos en el tema, consultas del histórico de otros proyectos similares, a través del conocimiento obtenido de proyectos pasados, mediante estudios de mercado, etc. (AACE, 2011).

Idrus et al. (2011) insisten en la importancia de diferenciar el origen de los riesgos a la hora de realizar su identificación, de modo que facilite la gestión de los mismos en un futuro. Por ello, en general, plantean la existencia de riesgos de carácter interno, generados por factores del propio proyecto (por ejemplo, factor humano), y de riesgos de carácter externo, en los que fuerzas mayores fuera del alcance del proyecto son las causantes de la existencia de este tipo de riesgos (por ejemplo, factores políticos) (El-Sayegh, 2008). Aunque esta es una clasificación de tantas existentes, la tomaremos como referencia al ser la más general y sencilla para aplicar en nuestro proyecto.

4.2.2. Estimación de Probabilidades y Distribuciones:

Como se ha comentado, la identificación de los riesgos nos permite asociarlos a las actividades de nuestro proyecto en función de cómo influyan sobre estas (Acebes et al., 2022). Una vez relacionados riesgos y actividades podemos asociar a cada actividad y riesgo una distribución de probabilidad para poder modelar su variabilidad. Podemos hacer uso de cualquiera de las distribuciones existentes, siempre que tengan sentido para el cálculo de nuestros datos.

Esto nos permitirá clasificar los riesgos identificados en el anterior paso. Las distribuciones asociadas a los riesgos deberán representar de la manera más realista posible la probabilidad de ocurrencia de estos, así como su impacto sobre el proyecto (Baccarini et al., 2014; Hillson, 2014).

4.2.3. Configuración del Modelo de Simulación:

A través un software de simulación de Monte Carlo o una hoja de cálculo, configuramos el modelo a utilizar y programamos cómo queremos que se realicen las simulaciones. Cada

iteración de la simulación representará una ejecución potencial del proyecto, teniendo en cuenta las variabilidades de las duraciones y costes asociados a cada actividad.

Lo ideal es elegir un número elevado de iteraciones para las simulaciones, en la que cada una de ellas representa una instancia única del proyecto en la que las duraciones y costes de las actividades son seleccionados aleatoriamente según las distribuciones de probabilidad que hemos establecido previamente.

4.2.4. Análisis de Resultados:

Una vez obtenidos los datos necesarios de las simulaciones gracias al empleo de la aplicación CrystalBall (by Oracle), hacemos un análisis completo de estos resultados para obtener distribuciones de probabilidad para la duración total del proyecto y el coste total. Estos resultados proporcionan un escenario realista de las posibles variaciones en el proyecto debido a la incertidumbre y los riesgos asociados.

Con los resultados obtenidos de la simulación, podemos entonces tomar decisiones informadas sobre cómo abordar los riesgos del proyecto. Desde ajustar estrategias de contingencia o asignar más recursos a ciertas actividades críticas hasta replantear el enfoque del proyecto en función de la evaluación de riesgos.

La simulación de Monte Carlo es una herramienta valiosa para la gestión de proyectos, ya que proporciona una visión más realista y probabilística de los resultados posibles en lugar de depender de estimaciones puntuales y deterministas. Esto ayuda a los equipos de proyecto a planificar y tomar decisiones de manera más efectiva en entornos donde la incertidumbre es inherente. En la Ilustración 1 se representan los pasos a seguir durante la aplicación de este método:

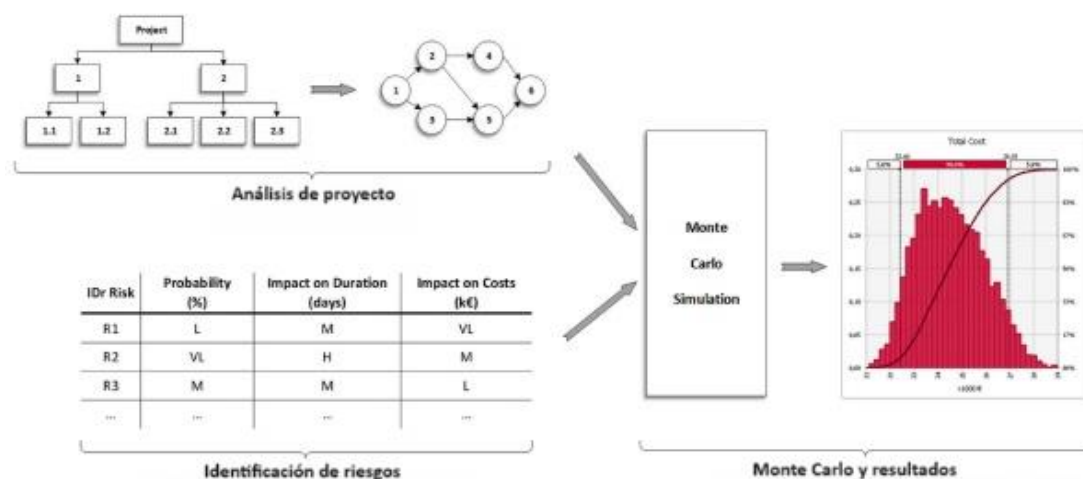


Ilustración 1. Pasos para la simulación de Monte Carlo. Fuente: Acebes et. al. (2022).



4.3. CrystalBall

Como parte de los primeros pasos para realizar la simulación de Monte Carlo, plantearemos nuestro proyecto con todas sus actividades, riesgos (y todos los datos necesarios relacionados con estos) en una hoja de Excel. Sin embargo, la programación de una simulación de MC en Excel es una tarea complicada y que requeriría mucho trabajo. Por este motivo, optamos por instalar una extensión conocida como CrystalBall (Oracle, 2023). Se trata de una aplicación informática que corre en el entorno Excel y que permite ejecutar MCS de manera más sencilla, pudiendo obtener de ellas resultados en forma de gráficos o numéricos.

En nuestro caso, para esta representación del proyecto, incluimos un diagrama PERT para ver con claridad las actividades y los riesgos y la relación entre unos y otros. También incluimos datos relativos a las actividades y los riesgos, como las distribuciones que siguen, los valores medios, desviación típica, valores máximos o mínimos, etc., así como los cálculos necesarios para modelar las funciones de distribuciones de probabilidad que siguen cada una de las actividades.

Una vez tenemos los datos organizados, comenzamos a usar el programa. Con él podemos marcar casillas como entradas o salidas. Las entradas serán las casillas en las que programaremos las distribuciones para cada actividad y riesgo en función de los datos que tenemos, mientras que las salidas serán aquellas casillas que queramos obtener como resultados para extraer datos de estos, consiguiendo un planteamiento claro que sólo nos suponga aplicar fórmulas simples para el cálculo de los indicadores explicados en el punto 3.

Cuando ya tenemos todas nuestras casillas de entrada y salida programadas, iniciamos la simulación, indicando previamente el número de iteraciones que queremos que tenga y qué datos y dónde sacarlos. Para esto, utilizaremos una nueva hoja de Excel de modo que el programa obtenga siempre los datos necesarios de cada simulación en las mismas casillas, facilitándonos el coger los datos que vayamos a utilizar en nuestros posteriores cálculos.

Después de haber decidido y reflejado esto, con simplemente ejecutar la simulación veremos que a los pocos segundos aparecerán los datos solicitados en la hoja del libro de Excel establecida. De ahí tomamos los datos que nos sean útiles y realizamos el cálculo de los indicadores de crucialidad, criticidad y sensibilidad para esa simulación.

De este modo, podemos reiniciar la simulación con la seguridad de haber hecho uso de los datos útiles. Al reiniciarla, podemos realizar cambios en nuestra hoja de datos, como por ejemplo variar el valor de la media o de la desviación típica de alguna actividad para repetir la simulación y tomar nuevos datos para repetir los cálculos. El proceso es sucesivo, cambiando los datos que necesitemos antes de cada simulación, para el posterior cálculo de los índices y pudiendo comparar estos resultados como fin de nuestro trabajo.

5. CASO DE ESTUDIO

5.1. Red de proyecto

Dedicaremos este apartado para presentar el caso utilizado para la realización del análisis planteado. Realizaremos sobre este proyecto las simulaciones comentadas y observaremos su reacción, evolución y resultados.

La red de proyecto AON consta de 5 actividades (A1-A2-A3-A4-A5), además de las actividades inicial (Ai) y final (Af). En la Tabla 1 se presentan las relaciones de precedencia entre estas actividades.

| Actividad/Riesgo | Precedente(s) |
|------------------|---------------|
| A1 | Ai |
| A2 | Ai |
| A3 | A1 |
| A4 | A1 |
| A5 | A2-A3 |

Tabla 1. Relación de precedencia de las actividades

Teniendo en cuenta la planificación del proyecto, tendrán lugar en primera instancia las actividades A1 y A2. Cuando termina la actividad A1, comienzan las actividades A3 y A4. A continuación, habiendo finalizado A2 y A3, tendrá lugar la actividad A5, cuyo fin, junto al de la actividad A4, darán lugar a la actividad final del proyecto Af. De este modo obtenemos el siguiente gráfico (Ilustración 2).

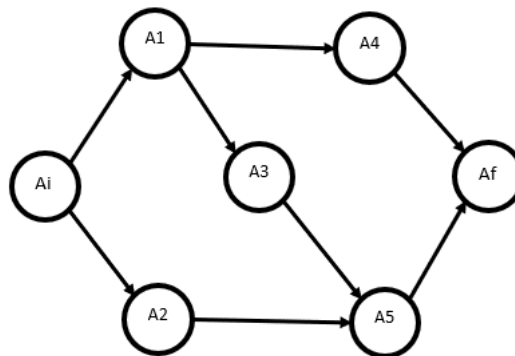


Ilustración 2. Propuesta de red AON del proyecto. Fuente: elaboración propia.

Esta red nos servirá de base para la introducción de los riesgos cuyo efecto queremos estudiar. Contamos con un total de cuatro riesgos, siendo dos de coste y dos de duración. R1 y R2 son los

riesgos que afectan a la duración de las actividades que les preceden, y R3 y R4 tienen influencia sobre los costes. Se añadirán a la red obteniendo un nuevo grafo (mostrado en la Ilustración 3).

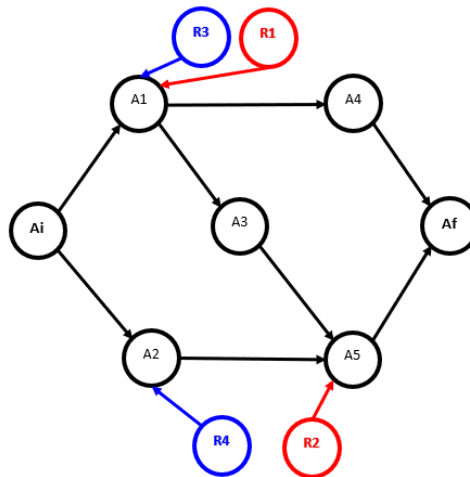


Ilustración 3. Red AON del proyecto con riesgos incluidos. Fuente: elaboración propia.

En este diagrama observamos un código de color respecto a los riesgos. Aquellos destacados en color rojo (R1 y R2) son los riesgos que afectan a la duración de las actividades y el proyecto, mientras que los azules (R3 y R4) son los que afectan al coste.

5.2. Componentes

5.2.1. Actividades

Aprovecharemos este apartado para definir detenidamente cada una de las actividades que forman parte de nuestro proyecto y las distribuciones elegidas para los cálculos de las variables de cada una de ellas, así como los datos necesarios para ello.

Todas las actividades tienen una duración y un coste asociados. A continuación, se presentan dos tablas (Tablas 2 Y 3) que contienen datos previamente establecidos y necesarios para realizar el cálculo de estos factores:

| DURACIÓN | | | | | |
|----------|--------|-------|----------|-----|-----|
| Act. | Distr. | μ | σ | Min | Max |
| A1 | Normal | 5,5 | 1,09 | - | - |
| A2 | Normal | 13 | 1,73 | - | - |



| DURACIÓN | | | | | |
|----------|--------|-------|----------|-----|-----|
| Act. | Distr. | μ | σ | Min | Max |
| A3 | Normal | 7 | 1 | - | - |
| A4 | Normal | 16,5 | 1,58 | - | - |
| A5 | Normal | 10 | 1,16 | - | - |

Tabla 2. Datos para el cálculo de la duración de las actividades

| COSTE | | | | | | | | |
|-------|--------------|-----|-----|-------|----------|-----|-------|------|
| Act | Distr. | Cv | Cf | μ | σ | Min | +prob | Max |
| A1 | Uniforme | 100 | - | - | - | 100 | - | 350 |
| A2 | Determinista | 40 | 120 | - | - | - | - | - |
| A3 | Uniforme | 120 | - | - | - | 200 | - | 1000 |
| A4 | Determinista | 70 | 150 | - | - | - | - | - |
| A5 | Triangular | 60 | - | - | - | 150 | 200 | 500 |

Tabla 3. Datos para el cálculo del coste de las actividades

En estas se utiliza una columna para determinar la distribución que sigue cada una de las actividades; en función de la distribución que se utilice, necesitaremos saber unos datos u otros, presentados en el resto de las columnas. Estos son: μ (media de la actividad), σ (desviación típica de la actividad), *Min* y *Max* (valores mínimo y máximo que toma la actividad dentro de la distribución correspondiente), *+prob* (valor que es más probable que tome la actividad dentro de la distribución correspondiente), *Cv* (valor del coste variable de la actividad) y *Cf* (valor del coste fijo de la actividad).

Como podemos ver, tenemos todos los datos para definir las distribuciones necesarias para cada actividad o riesgo. De este modo, hacemos el cálculo de la duración de las actividades en función de sus distribuciones, utilizando el programa CrystalBall (Oracle, 2023):

- Para las actividades A1, A2, A3, A4 y A5: planteamos el cálculo de una distribución normal con los datos de media y desviación típica ofrecidos en la Tabla 2.

Para el cálculo de los costes de cada actividad, utilizaremos la fórmula $C_i = cf_i + cv_i * d_i$ (siendo *d* la duración de cada actividad, obtenida anteriormente). En esta fórmula, cv_i es un valor determinista estocástico asociado a la duración de la actividad con la que se asocia, tomando el



valor indicado en la Tabla 3 para cada una de las actividades. Respecto al coste fijo (cf_i), está modelado de tres maneras diferentes:

- Para las actividades A1 y A3: modelaremos el coste fijo a través de una distribución uniforme calculada con los datos de mínimos y máximos en la Tabla 3.
- Para las actividades A2 y A4: tomaremos el valor determinista que se nos ofrece en la Tabla 3.
- Para la actividad A5: calcularemos el coste fijo a través de una distribución triangular calculada con los datos de mínimos, más probables y máximos ofrecidos en la Tabla 3.

5.2.2. Riesgos

En el proyecto a estudiar existen dos tipos de riesgos: de duración y de coste. Los riesgos R1 y R2 son del primer tipo e impactarán sobre las actividades A1 y A5 respectivamente; mientras que los riesgos R3 y R4 impactan sobre el coste. A lo largo de este apartado, definiremos los cálculos a realizar para obtener los datos necesarios de estos riesgos para estimar las probabilidades y los impactos de cada uno de ellos.

De nuevo, haremos uso de la fórmula $C_i = cf_i + cv_i * d_i$ para el cálculo de los costes de cada riesgo (siendo d la duración de cada actividad, obtenida anteriormente):

- Para el riesgo R1: calcularemos el coste fijo a través de una distribución uniforme calculada con los datos de mínimos y máximos en la Tabla 4 y aplicaremos la fórmula, teniendo en cuenta que el coste variable que tiene es el de la actividad que le precede.
- Para el riesgo R2: tomaremos el valor determinista que se nos ofrece en la Tabla 4 y aplicaremos la fórmula, teniendo en cuenta que el coste variable que tiene es el de la actividad que le precede.

Del mismo modo, utilizamos los datos de la Tabla 4 para hacer el cálculo de la duración de los riesgos con el programa *CrystalBall*:

- Para el riesgo R3: planteamos el cálculo de una distribución uniforme con los valores mínimo y máximo ofrecidos en la Tabla 4.
- Para el riesgo R4: planteamos el cálculo de una distribución determinista con el dato de media ofrecido en la Tabla 4.



| Riesgo | Act. Impacto | Distr | IMPACTO SOBRE LA DURACIÓN | | | | | | | IMPACTO SOBRE EL COSTE | | | | |
|--------|--------------|--------------|---------------------------|----|-------|----------|-----|-------|-----|------------------------|----------|-----|------|------|
| | | | Cv | Cf | μ | σ | Min | +prob | Max | μ | σ | Min | Max | |
| R1 | A1 | Uniforme | 100 | - | - | - | - | 0,15 | - | 0,25 | - | - | - | - |
| | | | | - | - | - | - | 1 | - | 2,5 | - | - | - | - |
| R2 | A5 | Determinista | 60 | - | 0,2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| R3 | A1 | Uniforme | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,15 | 0,25 |
| | | | | | | | | | | | - | - | 100 | 300 |
| R4 | A2 | Determinista | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,2 | - | - | - |
| | | | | | | | | | | | 600 | - | - | - |

Tabla 4. Datos para el cálculo del impacto de los riesgos

5.3. Simulaciones

Una vez definidas las duraciones y costes de las actividades, y habiendo planteado el grafo que represente a los mismos (Ilustración 4), procedemos a realizar las simulaciones con el programa *CrystalBall*. Para ello es necesario decidir qué variables son entradas y cuáles van a ser salidas para la correcta toma de datos.

Para cada una de las simulaciones, variaremos la media y la desviación típica de la duración de las actividades para ver cómo afecta sobre el coste y duración de las actividades en sí, así como sobre los valores totales del final del proyecto. Como el objetivo de nuestro estudio es realizar un análisis de sensibilidad del proyecto basándonos en las variaciones de la duración media y variabilidad de las actividades del proyecto, disminuirémos los valores de media y desviación estándar de las actividades en un 70, 50, 30 y 10%; así como los aumentaremos en un 10%, en un 30% y en un 50%, como muestran las tablas 5 y 6.

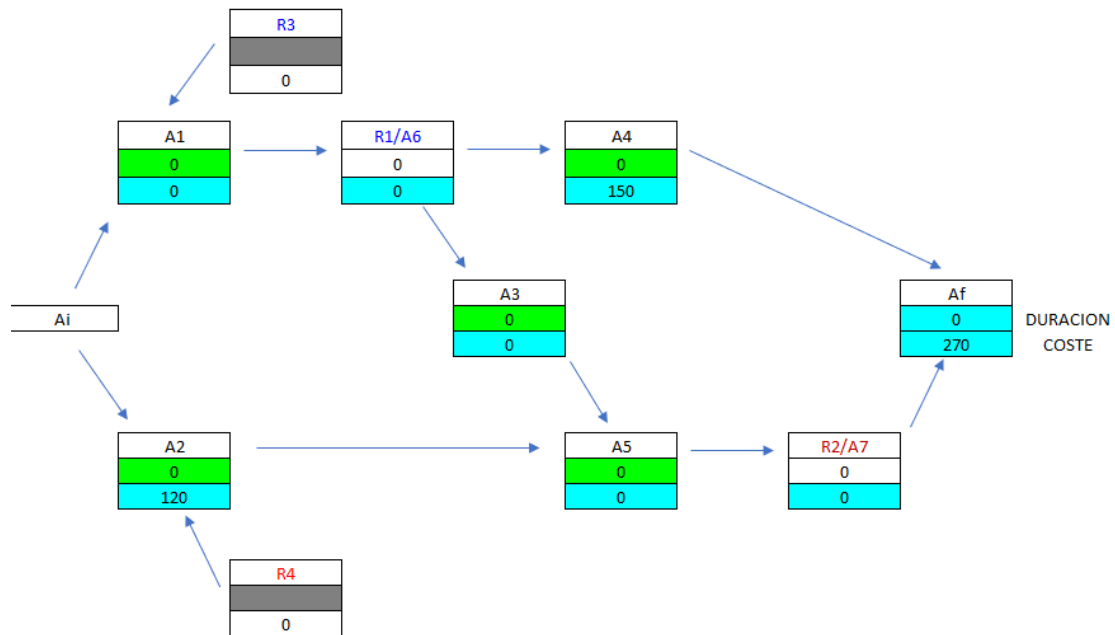


Ilustración 4. Representación del proyecto con actividades y riesgos y sus duraciones y costes. Fuente: elaboración propia.

Un ejemplo puede ser el siguiente: para la primera simulación que realizamos disminuimos en un 70% el valor esperado de duración correspondiente a la actividad A1 y, con el resto de los valores constantes, simulamos. Extraemos los datos que nos sean útiles para el posterior cálculo de los índices explicados en el punto 3. y recalculamos la media de A1, disminuyéndola en un 50% desde el valor que tenía en un principio, simulando de nuevo y repitiendo todos los pasos sucesivamente. A la hora de cambiar de actividad o de factor que modificar (modificamos la desviación en vez de la media) devolvemos el factor que estábamos modificando a su valor original. En las siguientes tablas (Tablas 5 y 6) se presenta el cálculo de las medias y desviaciones típicas a utilizar:

| DURACIÓN | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 |
|----------------|------------|-----------|----------|-------------|-----------|
| +50% | 8,25 | 19,5 | 10,5 | 24,75 | 15 |
| +30% | 7,15 | 16,9 | 9,1 | 21,45 | 13 |
| +10% | 6,05 | 14,3 | 7,7 | 18,15 | 11 |
| Nominal | 5,5 | 13 | 7 | 16,5 | 10 |
| -10% | 4,95 | 11,7 | 6,3 | 14,85 | 9 |
| -30% | 3,85 | 9,1 | 4,9 | 11,55 | 7 |
| -50% | 2,75 | 6,5 | 3,5 | 8,25 | 5 |
| -70% | 1,65 | 3,9 | 2,1 | 4,95 | 3 |

Tabla 5. Datos de variación de la duración por actividad



| Desv. Estándar | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 |
|----------------|-------------|-------------|----------|-------------|-------------|
| +50% | 1,635 | 2,595 | 1,5 | 2,37 | 1,74 |
| +30% | 1,417 | 2,249 | 1,3 | 2,054 | 1,508 |
| +10% | 1,199 | 1,903 | 1,1 | 1,738 | 1,276 |
| Nominal | 1,09 | 1,73 | 1 | 1,58 | 1,16 |
| -10% | 0,981 | 1,557 | 0,9 | 1,422 | 1,044 |
| -30% | 0,763 | 1,211 | 0,7 | 1,106 | 0,812 |
| -50% | 0,545 | 0,865 | 0,5 | 0,79 | 0,58 |
| -70% | 0,327 | 0,519 | 0,3 | 0,474 | 0,348 |

Tabla 6. Datos de la variación de la desviación estándar por actividad

Cuando ya hemos realizado todos los cambios necesarios, nos encontraremos con un total de 40 simulaciones, de las cuales hemos ido tomando los siguientes datos útiles:

- Desviación estándar de las actividades, tanto para coste como para duración
- Desviación estándar del total del proyecto, tanto para coste como para duración
- Medias del coste y la duración finales del proyecto
- Datos de sensibilidad de las actividades, tanto para el coste como para la duración finales del proyecto
- Datos de la criticidad tanto para el coste como para la duración por actividades a través del cálculo de los caminos críticos por simulación

Una vez obtenidos todos estos datos, tendríamos todo lo necesario para proceder al cálculo de los índices de criticidad, crucialidad y sensibilidad del proyecto y el análisis de los resultados obtenidos.



6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado presentaremos los resultados y análisis obtenidos tras realizar la simulación de Monte Carlo con el software Oracle explicada a lo largo de los anteriores capítulos. Se ha representado la incertidumbre en la duración y el coste de las actividades utilizando funciones de distribución diferentes, lo que ha generado numerosos escenarios distintos entre sí. El objetivo es evaluar en cada uno de ellos los índices explicados en el capítulo '3. Análisis de sensibilidad e indicadores'. Recorreremos las distintas gráficas obtenidas para la criticidad, crucialidad y sensibilidad tanto de la duración como el coste de las actividades y del total del proyecto.

Realizaremos una comparación de los resultados obtenidos para cada indicador, mostrando las gráficas que representan la variación de los mismos (adjuntadas en el Anexo I, al cual nos referiremos a lo largo del análisis), en función de la variable modificada durante la simulación. El apartado se estructura en cuatro subapartados, cada uno de ellos destinado a comparar y comentar las gráficas de los resultados obtenidos de las simulaciones. Los tres primeros se centrarán en analizar la variación por actividades de los índices de criticidad, crucialidad y sensibilidad descritos anteriormente; mientras que, en el cuarto apartado (6.4. Generales), analizaremos los totales de duración y coste medios y sus respectivas desviaciones estándar.

A su vez, estos subapartados estarán divididos en función de si lo representado se refiere a los índices de duración o de coste, y de si lo que variamos para las simulaciones es la duración media de las actividades o sus desviaciones típicas.

6.1. Criticidad

En el Anexo I se incluyen todas las gráficas que surgen como resultado de las simulaciones respecto a la criticidad, mostrando las variaciones de los indicadores CI (índice de criticidad para la duración) y RC (índice de criticidad para el coste), variando para estos tanto la duración de las actividades como su desviación típica.

6.1.1. Indicadores de duración

6.1.1.1. Variando la duración

En la Ilustración 25 se muestran las gráficas para CI que surgen al variar la duración nominal de cada una de las actividades. Tomemos como ejemplo la primera de ellas, en la que variamos la duración de A1 (Ilustración 5). En este caso, observamos que a medida que aumenta la duración de esta actividad, aumenta su criticidad, a la vez que aumentan las criticidades de A3 y A4. Esto ocurre porque estas son las actividades que comparten camino con A1, por lo que el aumento de la duración de esta hace que aumente el número de veces que pertenece al camino crítico, implicando que, por ende, A3 o A4 pasen a pertenecer al mismo también.

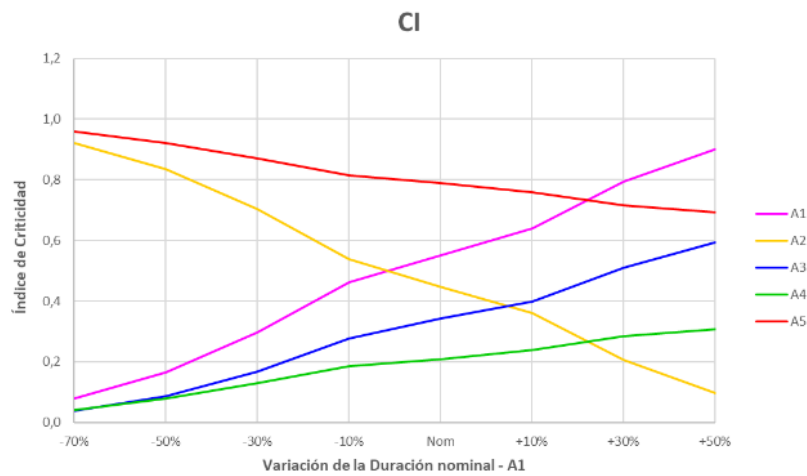


Ilustración 5. Índice de Criticidad variando la duración de A1.

Este mismo patrón se da en el resto de las gráficas. Si analizamos ahora, por ejemplo, la última de las gráficas, en la que modificamos la duración de A5 gradualmente, vemos que su criticidad aumenta, suponiendo que aumente también la criticidad de A2 y A3 por el mismo motivo que comentábamos en el caso anterior: son las actividades directamente relacionadas (puesto que ambas la preceden) con la actividad 5 y, por lo tanto, comparten camino con ella.

6.1.1.2. Variando la desviación

En este caso nos referimos a las gráficas representadas en la Ilustración 26, que representan la variación de CI en función de la variación de la desviación típica de las actividades. En ellas observamos una tendencia constante en todos los casos. Variar la desviación de cualquiera de las actividades no influye sobre cómo se comportan el resto.

Esta casuística puede darse debido a que el número de simulaciones es elevado. Esto supone una gran variedad de resultados, tomando valores alejados del valor medio en unas ocasiones y valores más cercanos a este en otras, provocando que el valor medio tanto de cada una de las actividades como del proyecto acabe siendo el mismo. Un ejemplo de ello es la gráfica presentada en la Ilustración 6 a continuación.

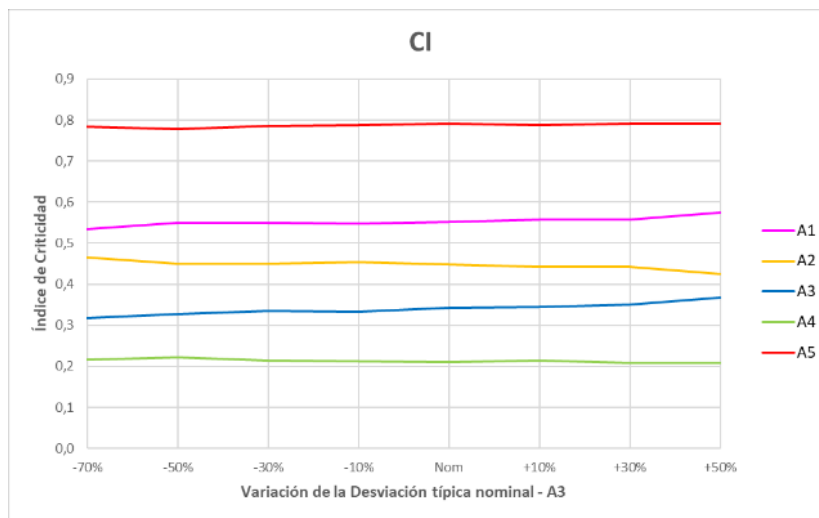


Ilustración 6. Índice de Criticidad variando la desviación estándar de A3.

6.1.2. Indicadores de coste

6.1.2.1. Variando la duración

Centrémonos ahora en las gráficas recogidas en la Ilustración 27. Éstas muestran la variación del indicador RC en función de lo que se modifiquen las duraciones de cada una de las actividades. En estas gráficas observamos una tendencia ligeramente descendiente para cada una de las actividades, salvo para aquella que estemos variando (Ilustración 7). En cualquiera de ellas se puede ver esto, la actividad cuya duración modifiquemos gradualmente, tomará una tendencia ascendente, significando esto que su criticidad aumenta y que, por lo tanto, pertenecerá un mayor número de veces al camino crítico del proyecto.

Este comportamiento tiene lógica ya que, al ser el coste total del proyecto la suma de los costes de todas las actividades, si aumentamos el coste de una de ellas, el coste relativo de las demás deberá disminuir, teniendo en cuenta que el coste individual de cada una de ellas no cambia.

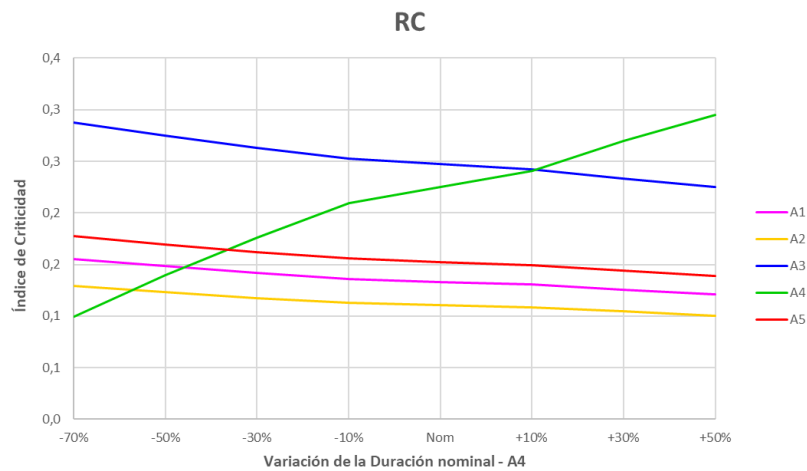


Ilustración 7. Índice de Coste Relativo variando la duración de A4.

6.1.2.2. Variando la desviación

Para el mismo índice, pero modificando la desviación de las actividades, tenemos las gráficas reflejadas en la Ilustración 28. De nuevo, al igual que en el apartado 6.1.2.1., observamos que esta modificación de la desviación para cada una de las actividades no influye sobre la evolución del resto en el proyecto. Se puede ver claramente la constancia para este indicador en este caso concreto en todas y cada una de las gráficas, por ejemplo, tomemos la gráfica representada para A5 (Ilustración 8).

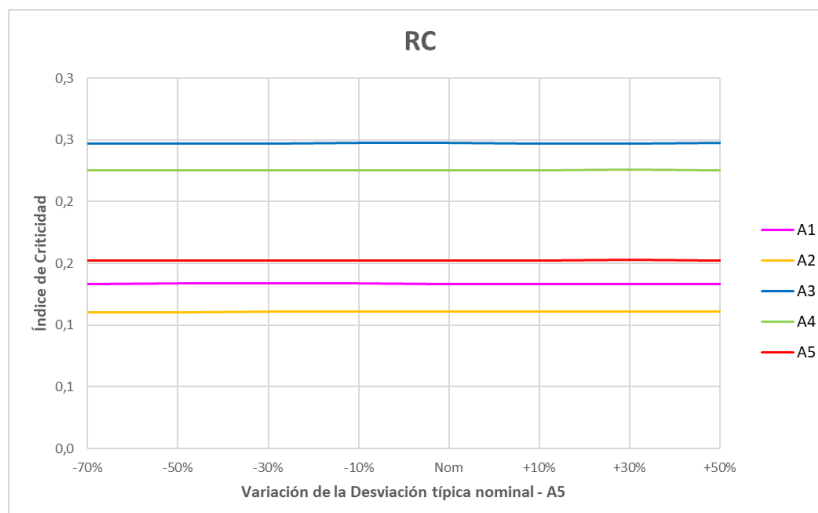


Ilustración 8. Índice de Coste Relativo variando la desviación estándar de A5.

6.2. Crucialidad

En el Anexo II se incluyen todas las gráficas que surgen como resultado de las simulaciones respecto a la crucialidad, mostrando las variaciones de los indicadores CrI (índice de crucialidad para la duración) y CCI (índice de crucialidad para el coste), variando para estos tanto la duración de las actividades como su desviación típica.

6.2.1. Indicadores de duración

6.2.1.1. Variando la duración

De la misma manera que ocurre con la criticidad, en las gráficas recogidas en la Ilustración 29, vemos que aumenta la crucialidad (CrI) de aquella actividad cuya duración aumentemos, así como la de sus actividades directamente relacionadas.

Fijémonos en la cuarta de las gráficas (Ilustración 9), en la que hacemos una modificación de la duración media de la actividad A4. Podemos ver que la crucialidad de las actividades A2, A3 y A5 disminuye a medida que aumenta la duración de A4, mientras que la crucialidad de esta y la de A1 (que se encuentra en el mismo camino que A4) aumentan. Esto implica que estas dos actividades, en este caso, serán cruciales para el proyecto, significando esto que un retraso en estas tendrá un impacto significativo sobre la duración total del proyecto.

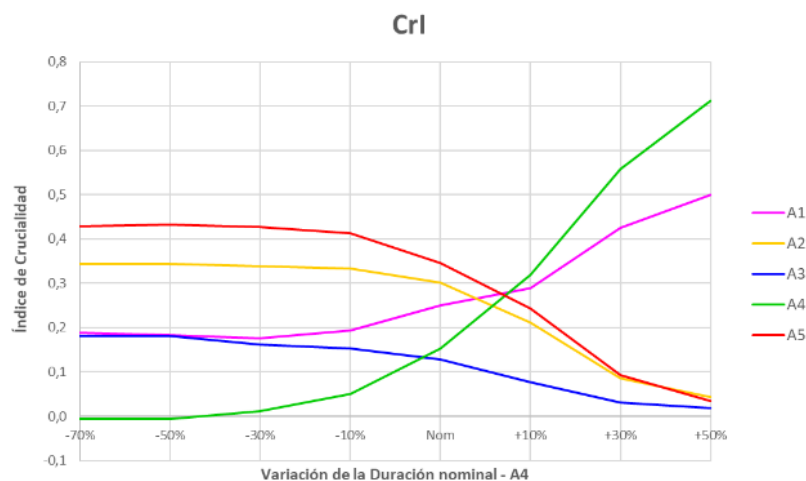


Ilustración 9. Índice de Crucialidad variando la duración de A4.

6.2.1.2. Variando la desviación

Para el CrI en función de la variación de las desviaciones de las actividades pasamos a fijarnos en la Ilustración 30. En ella podemos observar un comportamiento similar en todas las gráficas puesto que las actividades se mantienen más o menos constantes, excluyendo a la actividad que modifiquemos que tendrá una tendencia ascendente.

Podemos tomar como ejemplo el caso de la actividad A5 (Ilustración 10), cuya crucialidad es mínima cuando la desviación de esta es también muy pequeña, y va aumentando según su desviación también lo hace, llegando a convertirse en la actividad con la crucialidad más elevada cuando su desviación es máxima.

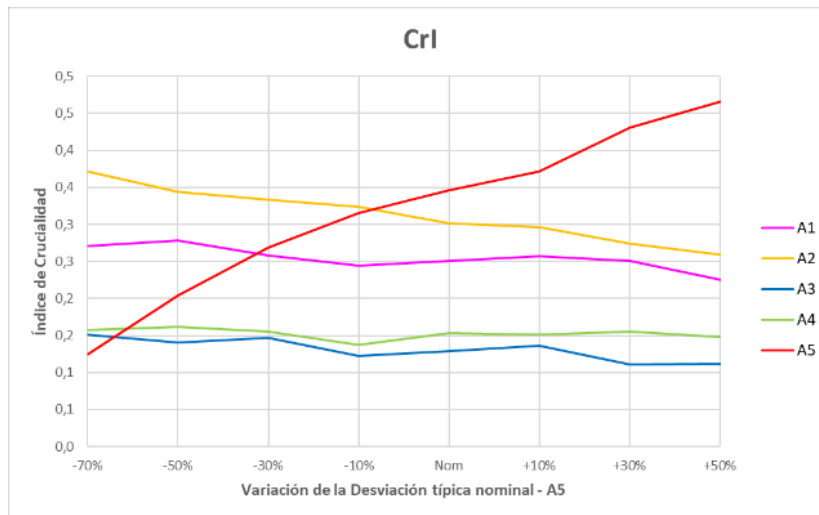


Ilustración 10. Índice de Crucialidad variando la desviación estándar de A5.

6.2.2. Indicadores de coste

6.2.2.1. Variando la duración

Respecto al CCI, cuya evolución vemos reflejada en las gráficas de la Ilustración 31, vemos que mantiene una tendencia constante en todo momento para todas y cada una de las actividades, tomemos como ejemplo la actividad A2 (Ilustración 11). Teniendo que este índice relaciona la variabilidad individual de coste de las actividades y el coste total del proyecto, esta constancia tiene sentido al estar modificando solamente la duración de las actividades, que no influye en el cálculo de este índice.

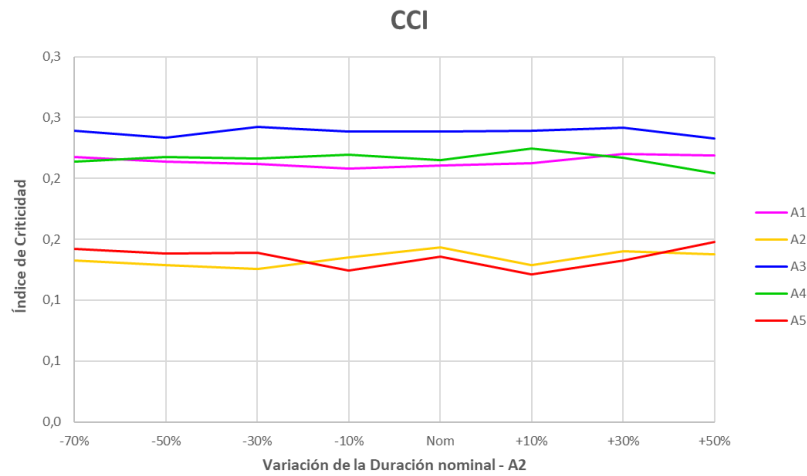


Ilustración 11. Índice de Crucialidad de Coste variando la duración de A2.

6.2.2.2. Variando la desviación

De nuevo, insistimos en que el índice que analizamos es la relación entre la variabilidad del coste de las actividades y el coste total del proyecto. Por ello, modificar la varianza de alguna de las actividades supondrá que la crucialidad de esta aumente, como vemos en las gráficas recogidas en la Ilustración 32.

Tomemos como ejemplo la tercera gráfica (Ilustración 12), en la que aumenta la crucialidad de la actividad A3 al aumentar su varianza. Al no modificar el resto de las actividades, aumenta la relación entre la varianza de esta actividad respecto al resto del proyecto, aumentando por definición su índice de crucialidad.

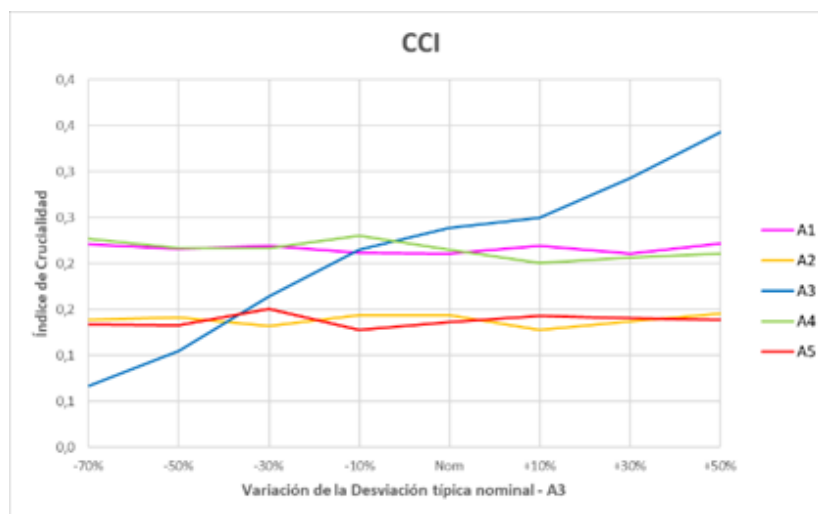


Ilustración 12. Índice de Crucialidad de Coste variando la desviación estándar de A3.

6.3. Sensibilidad

En el Anexo III se incluyen todas las gráficas que surgen como resultado de las simulaciones respecto a la sensibilidad, mostrando las variaciones de los indicadores SSI (índice de sensibilidad para la duración) y CSI (índice de sensibilidad para el coste), variando para estos tanto la duración de las actividades como su desviación típica.

6.3.1. Indicadores de duración

6.3.1.1. Variando la duración

En la Ilustración 33 podemos ver las gráficas que resultan de las simulaciones para SSI variando la duración de las actividades. Teniendo en cuenta que este índice es una relación entre CI y CrI, cabe esperar que obtengamos gráficas del estilo a las obtenidas para estos indicadores.

De nuevo, podemos ver que la sensibilidad de la actividad cuya duración vayamos aumentando, aumentará también y hará que aumente la de las actividades que pertenezcan a su mismo camino. Para verlo más claro, podemos observar la gráfica de A3 (Ilustración 13), en la cual se ve ese aumento en la sensibilidad de la propia actividad, así como de las actividades A1 y A5, que comparten camino con ella.

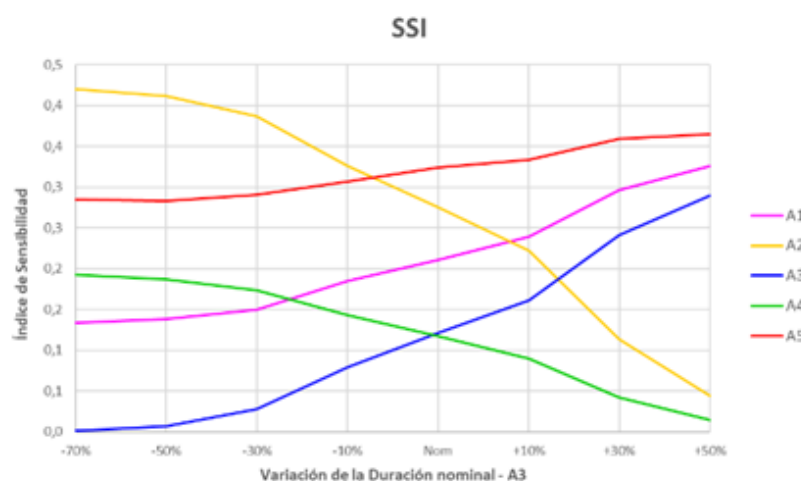


Ilustración 13. Índice de Sensibilidad de la duración variando la duración de A3.

6.3.1.2. Variando la desviación

Del mismo modo que ocurre en el apartado anterior, las gráficas de la Ilustración 34 muestran resultados similares a los obtenidos para CI y CrI. Como ocurría en CrI, todas las actividades se muestran más o menos constantes salvo en el caso de la actividad que estemos modificando.

Como hicimos en el apartado 6.3.2., nos centraremos en la quinta gráfica (Ilustración 14), en la que la actividad más sensible termina siendo la A5 a medida que aumentamos su desviación

típica, ya que su SSI alcanza valores elevados en relación con el resto de las actividades, cuyos parámetros no cambian. Esto supone que la duración final del proyecto será susceptible a cualquier cambio sobre la desviación de A5.

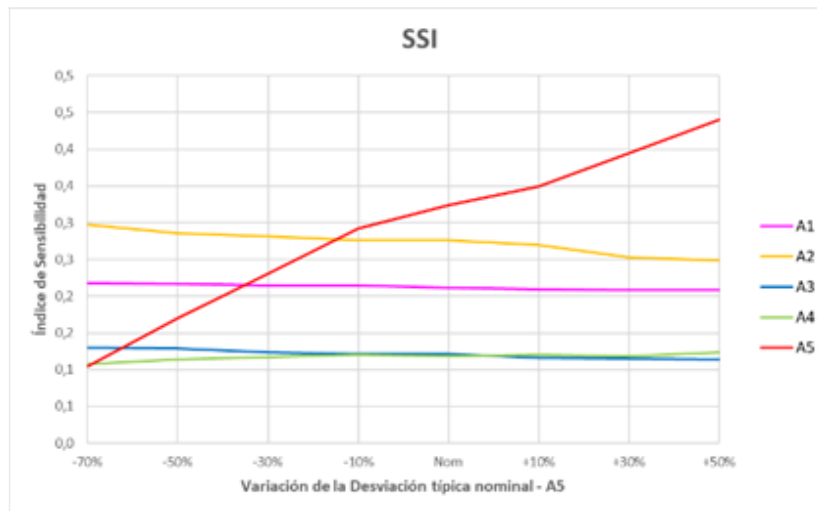


Ilustración 14. Índice de Sensibilidad de la duración variando la desviación estándar de A5.

6.3.2. Indicadores de coste

6.3.2.1. Variando la duración

En las gráficas plasmadas en la Ilustración 35 observamos que las actividades presentan tendencias ligeramente descendientes, excluyendo a aquella cuya duración variemos. Teniendo en cuenta que este índice (CSI) es una ponderación de los anteriores (RC y CCI), su evolución será similar a la de estos. Siguiendo la lógica y definiciones aplicadas hasta ahora para estos indicadores, tiene sentido llegar a la conclusión de que el aumento de la duración de una actividad conllevará a un aumento en el coste total del proyecto.

Analizando en conjunto las gráficas obtenidas como resultado, podemos concretar qué actividad será la más importante para el coste del proyecto, basándonos en lo que varíe su CSI en comparación al resto. Claramente, este es el caso de A3 y A4 (Ilustración 15). Al variar sus duraciones medias, van mostrando un aumento considerable en comparación al que muestran el resto de las actividades al ser desviadas. Por ello serán las que más tendremos que controlar puesto que su aumento, supondrá un aumento considerable del coste total del proyecto.

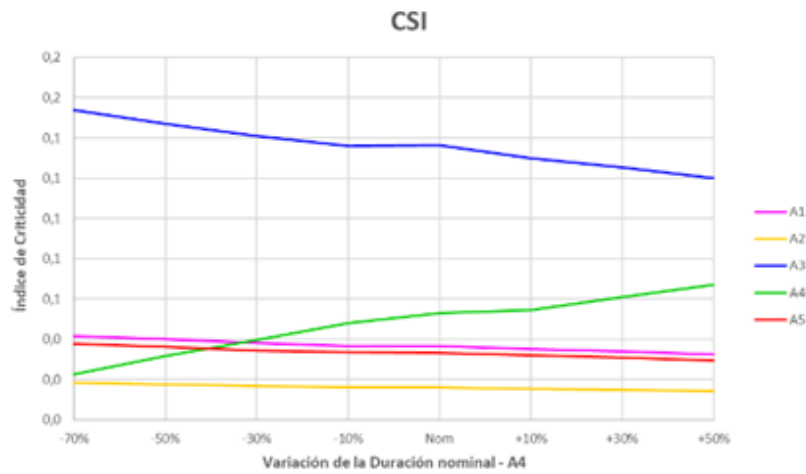


Ilustración 15. Índice de Sensibilidad de Coste variando la duración de A4.

6.3.2.2. Variando la desviación

De nuevo, obtenemos unas gráficas similares a las de RC y CCI en el caso de modificar la desviación de las actividades para este indicador (Ilustración 36). Las actividades muestran cierta constancia en cada una de las gráficas, salvo aquella cuya desviación típica se está viendo modificada. Llegamos entonces, haciendo un análisis conjunto de las gráficas, a la misma conclusión que en el apartado anterior: las actividades a estudiar con detalle son A3 (Ilustración 16) y A4. La sensibilidad de coste para estas actividades aumenta de manera drástica en cuanto se produce un cambio en sus desviaciones, al igual que ocurría cuando variábamos su duración, llegando ambas a convertirse en las más importantes y que destacan sobre el resto. Esto nos obliga a prestar especial atención a la desviación de la duración de las actividades, por su efecto sobre el coste final del proyecto, y no sólo a la variación de sus duraciones.

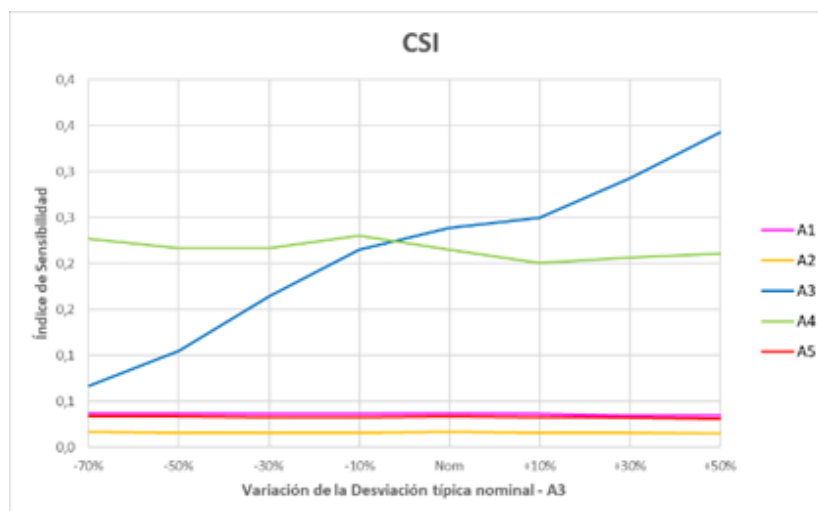


Ilustración 16. Índice de Sensibilidad de Coste variando la desviación estándar de A3.

6.4. Generales

En este último apartado analizaremos las gráficas con los resultados generales sobre la duración y coste totales del proyecto, presentadas en el Anexo IV. Al realizar las simulaciones, para cada una de las modificaciones de los valores de media y desviación típica de las actividades, tomamos los valores correspondientes de duración final del proyecto y de coste final del proyecto. Con estos valores, generamos las gráficas que analizamos y comparamos a continuación a través del estudio de sus comportamientos y tendencias.

6.4.1. Duración media

6.4.1.1. Variando la duración

En la Ilustración 37 vemos las gráficas que representan la variación de la duración media del proyecto respecto a la variación de la duración de las actividades. En todos los casos, la variación es mínima y las gráficas son prácticamente exactas entre sí.

Podemos explicar esta constancia con la existencia de caminos paralelos o basándonos en el hecho de que los valores en los que varía la duración son pequeños y poco notables. El pensamiento lógico, nos lleva a pensar que, si esas variaciones fuesen más notables, debería verse reflejado en las gráficas ya que la variación de la duración total del proyecto depende directamente de lo que varíe la duración de sus actividades. Un ejemplo de este caso lo encontramos a continuación en la Ilustración 17:

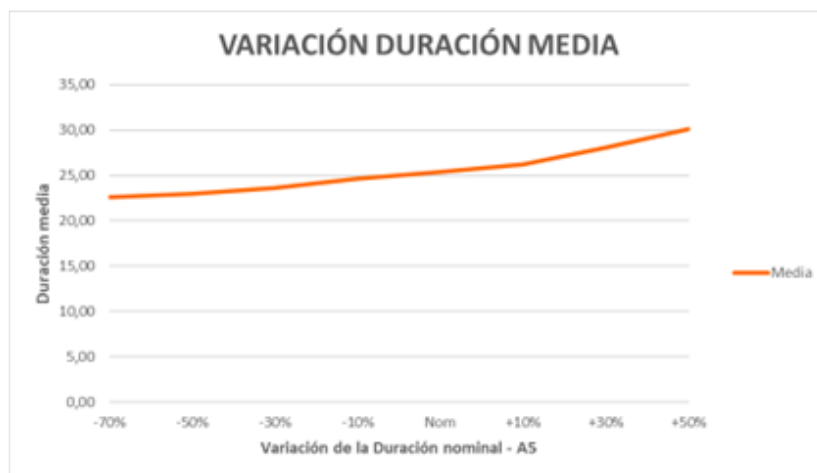


Ilustración 17. Variación de la duración media total del proyecto variando la duración de A5.

6.4.1.2. Variando la desviación

En el apartado '6.1.2. Variando la desviación', en el cual describíamos el comportamiento de los indicadores para la duración cuando variábamos la desviación de cada una de las actividades, existía una tendencia constante en las gráficas que representaban los resultados para este caso. De nuevo, el razonamiento que ofrecíamos para explicar este comportamiento era que, al tener un número muy elevado de simulaciones, los resultados unas veces se alejarán del valor nominal

y otras se acercarán. El resultado de esto será una igualación de los valores medios de la actividad y del proyecto.

La Ilustración 38 confirma este caso. Aquí se representa la variabilidad de la duración del proyecto a través de la relación entre la variación de la duración media del proyecto y la variación de la desviación de las actividades. Todas las gráficas tienen una tendencia creciente constante y con pocos cambios, alcanzando en cada caso más o menos el mismo valor para la media. Tomemos como ejemplo aquella relacionada con la variación de la desviación de la actividad A2 (Ilustración 18):

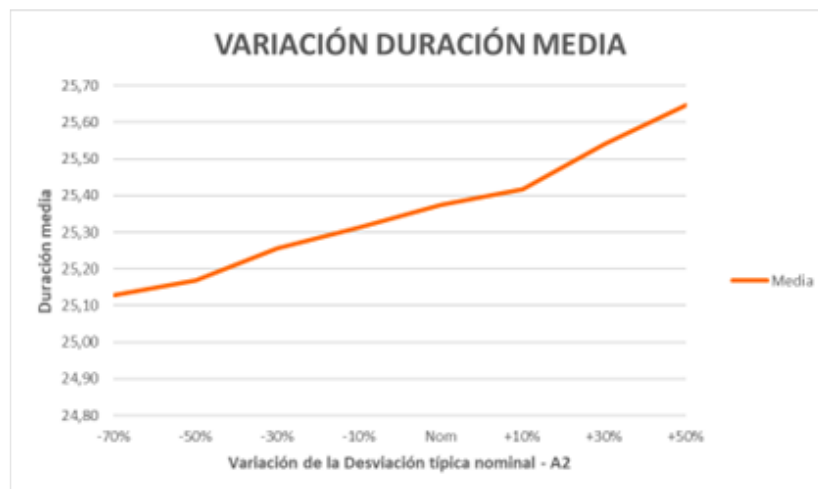


Ilustración 18. Variación de la duración media total del proyecto variando la desviación estándar de A2.

6.4.2. Desviación estándar Duración

6.4.2.1. Variando la duración

La relación entre la desviación estándar de la duración en función de la variación de la duración de las actividades se representa en las gráficas de la Ilustración 39. Observamos un cambio en la dispersión que encontraremos para los cambios en cada actividad. Concretamente, podemos centrarnos en las gráficas de las actividades A1 y A2 que son contrarias entre sí. En cuanto a A2 (Ilustración 19), a medida que aumenta el valor de su duración media, la dispersión que genera sobre la desviación estándar de la duración total del proyecto va aumentando; mientras que, en A1 ocurre al contrario, la dispersión disminuye a medida que la duración de la actividad aumenta.

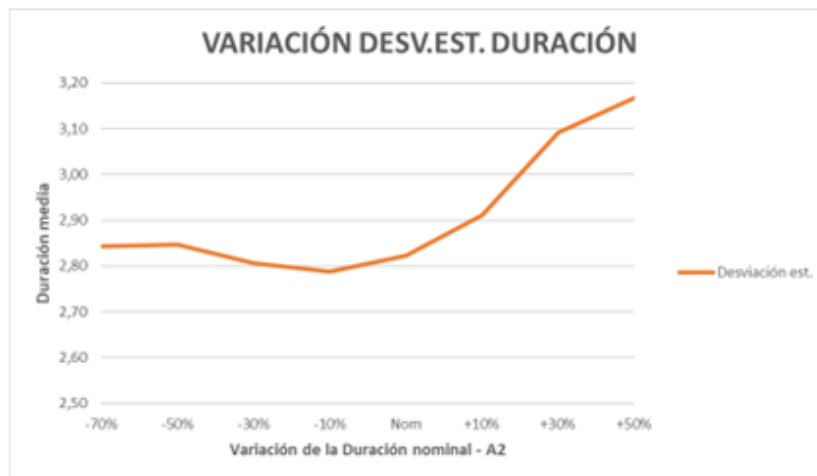


Ilustración 19. Variación de la desviación estándar de la duración total del proyecto variando la duración de A2.

Si nos fijamos en el resto de las gráficas, vemos que la obtenida para la variación de la duración de A4 presenta el mismo comportamiento que la de A1 (una tendencia a la baja y, por lo tanto, disminución de la dispersión); mientras que, las de A3 y A5 se asemejan a la de A2 (una tendencia creciente). Esto ocurre por la relación que tienen las actividades entre sí, es decir, A1 y A4 comparten camino por lo que tiene sentido que sus tendencias sean similares. Y lo mismo ocurre con A2 y A3, cuyo camino se relaciona directamente con el de A5.

6.4.2.2. Variando la desviación

La desviación estándar de la duración nos sirve para medir en qué medida se alejan los datos del valor medio y aporta información sobre la variabilidad de la duración del proyecto. En la Ilustración 40 se presentan las gráficas que ofrecen esta información sobre la variabilidad de la duración total del proyecto, en función de los cambios que sufren las desviaciones típicas de cada una de las actividades.

Destaca entre ellas la gráfica obtenida para la actividad A4 (Ilustración 20), puesto que es la única que presenta una tendencia descendente a medida que el valor de su desviación típica aumenta. Esto se interpreta como que la dispersión de los datos es menor, es decir, se van acercando más al valor de la media del proyecto; mientras que, para el resto de las actividades, la dispersión va en aumento y por lo tanto obtendremos una mayor variabilidad de los datos.

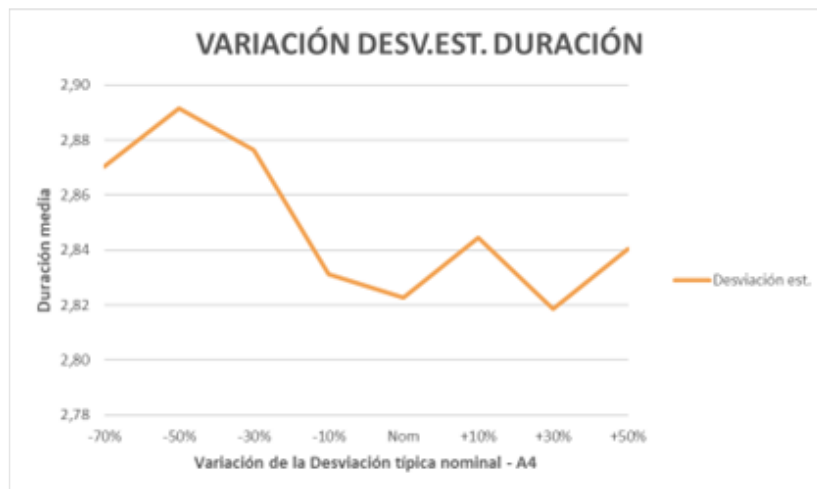


Ilustración 20. Variación de la desviación estándar de la duración total del proyecto variando la desviación estándar de A4.

6.4.3. Coste medio

6.4.3.1. Variando la duración

En la Ilustración 41 tenemos las gráficas que se obtienen como resultado al representar la variación del coste medio del proyecto en función de la variación de la duración de las actividades. Observamos que esta variación es mínima y que la tendencia se podría considerar constante para todas las actividades. Como ejemplo, mostramos en la Ilustración 21 su comportamiento para A1.

Este resultado tiene un sentido lógico y es que la variación de la duración de las actividades no influye sobre cómo cambia el coste del proyecto. Recordemos que el cálculo del coste final del proyecto se calcula como la suma de los costes de las actividades que lo componen, por lo que la duración de las mismas y las variaciones sobre estas no afectan sobre este cálculo.

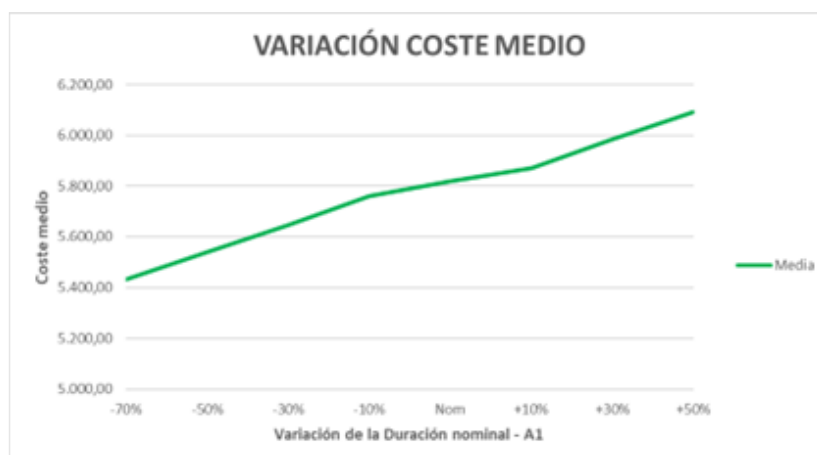


Ilustración 21. Variación del coste medio total del proyecto variando la duración de A1.

6.4.3.2. Variando la desviación

En la Ilustración 42, se observan las gráficas que representan la variación del coste medio total del proyecto en función de los cambios en la desviación estándar de las actividades individuales. De nuevo, utilizamos la desviación estándar del coste para estimar la dispersión de los datos respecto al valor medio del coste del proyecto y estudiar su variabilidad.

Si tomamos como ejemplo la gráfica obtenida para A5 (Ilustración 22), que presenta un comportamiento similar al de A1, vemos que al principio el coste medio es constante, luego disminuye y posteriormente muestra fluctuaciones antes de finalizar con una leve reducción. Esto supone que la variabilidad en la duración de A5 parece tener un impacto moderado y generalmente reductivo sobre el coste medio.

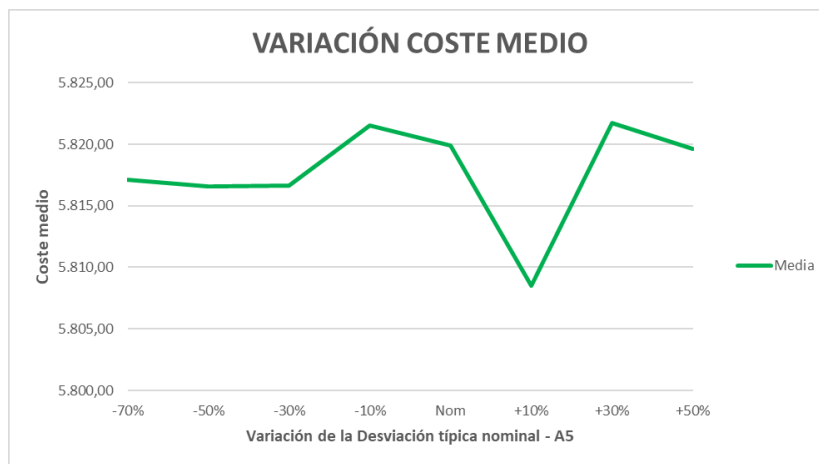


Ilustración 22. Variación del coste medio total del proyecto variando la desviación estándar de A5.

6.4.4. Desviación estándar Coste

6.4.4.1. Variando la duración

Al igual que en el apartado '6.11.1. Variando la duración', las gráficas que observamos en la Ilustración 43 presentan el mismo comportamiento en todos los casos, obteniendo el gráfico más o menos los mismos valores en cada punto para cada una de las actividades. En este caso analizamos la variación de la desviación estándar del coste general del proyecto respecto a la variación de la duración de las actividades. De nuevo, la duración de las actividades no influye directamente sobre el cálculo del coste final del proyecto, por lo que cualquier variación relacionada con la duración, no influirá sobre los resultados relacionados con el coste. Vemos un ejemplo de estas gráficas en la Ilustración 23.

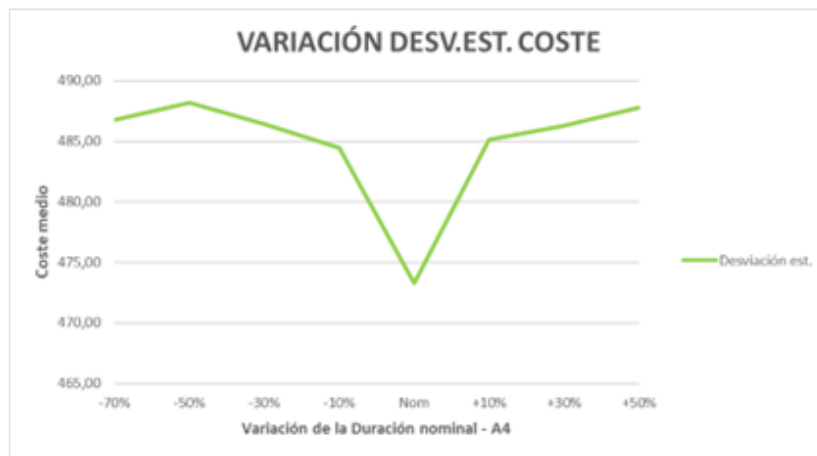


Ilustración 23. Variación de la desviación estándar del coste total del proyecto variando la duración de A4.

6.4.4.2. Variando la desviación

En la Ilustración 44 encontramos las gráficas que representan la variabilidad de la desviación estándar del coste del proyecto respecto a la variación de las desviaciones típicas de las actividades. Todas ellas presentan un comportamiento idéntico y ligeramente creciente (Ilustración 24), que presenta mayor dispersión y se aleja más del valor nominal según aumenta el valor de la desviación de cada actividad; y se acercan más a este valor a medida que disminuimos esa variación de la desviación.

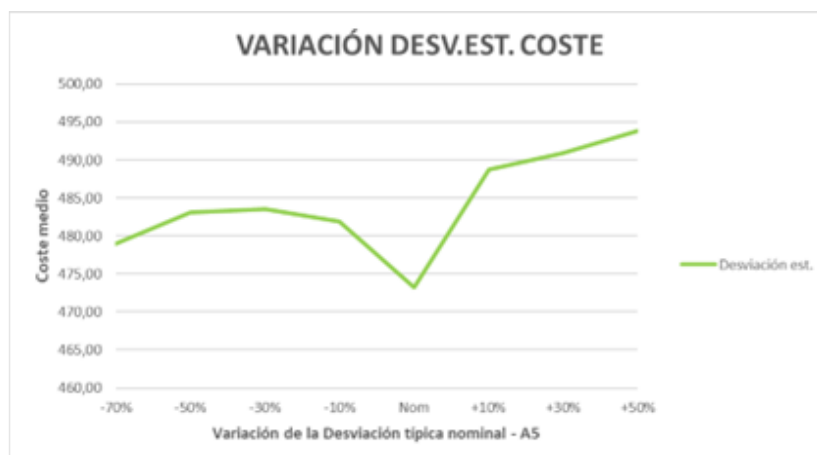


Ilustración 24. Variación de la desviación estándar del coste total del proyecto variando la desviación estándar de A5.

6.5. Resumen de resultados

Del análisis completo obtenemos que, en lo que a criticidad respecta, tan sólo la variación de la duración de las actividades nos da algo de información ahora de elegir la importancia de las actividades. Los indicadores CI y RC no presentan variaciones cuando modificamos la desviación típica de las actividades, es decir, no ofrecen información útil a nuestro estudio.



En las gráficas obtenidas para CI variando la duración de las actividades observamos que crece el CI de aquella actividad cuya duración aumentamos, así como el de aquellas con las que comparte camino. Esto supone que pasan a pertenecer un número mayor de veces al camino crítico, aumentando así su importancia sobre el resto de las actividades.

En cuanto a la criticidad de coste, representada con el indicador RC, de nuevo aumenta el RC de la actividad cuya duración incrementamos gradualmente, mientras el resto de las actividades decrecen levemente. Esto es debido a que el coste final del proyecto se debe regular y, si una actividad aumenta su duración y, por consecuencia, el coste asociado a esta también aumenta, el del resto de actividades deberá disminuir levemente para que el coste final del proyecto se vea afectado lo menos posible.

No obstante, como se comenta a lo largo del trabajo, la criticidad ha de estudiarse en conjunto con la crucialidad para obtener unas conclusiones más reales y completas. En cuanto al indicador de crucialidad para la duración (Crl) observamos que, variando la duración, los resultados ofrecen la misma información que para la criticidad en este caso: la crucialidad de la actividad cuya duración estamos modificando aumenta, así como la de las actividades con las que comparte camino. En cambio, las gráficas de CCI variando la duración no ofrecen información útil ya que al tratarse de un indicador de coste, las modificaciones en la duración de las actividades no influirán sobre el comportamiento de la crucialidad respecto al coste de las mismas.

En este caso, la variación de la desviación estándar de las actividades sí ofrece información, que en la criticidad no obteníamos. Tanto para Crl como para CCI, la actividad cuya desviación vamos incrementando, evoluciona desde una crucialidad mínima hasta convertirse en la actividad más importante en comparación al resto.

Otro modo de analizar la criticidad y la crucialidad de manera conjunta es a través de los indicadores de sensibilidad (SSI y CSI). Estos representan una relación entre la criticidad y la crucialidad de las actividades en cuanto a la duración y al coste, respectivamente. Obtenemos del análisis de estos indicadores lo comentado hasta ahora: el aumento de la duración de una actividad supone el aumento del índice de sensibilidad de la misma y de las que coinciden en el mismo camino que esta, al igual que ocurre con el aumento de su desviación estándar. Esto supone que los cambios en la duración y desviación de las actividades tendrán un efecto directo sobre la duración y el coste final del proyecto, y habrá que tenerlo en cuenta y controlarlo.

Finalmente, analizamos los resultados para la duración media y el coste medio finales del proyecto, usando las mismas métricas que hasta ahora: variando la duración y la desviación de las actividades. De estas gráficas podemos concretar que la mayoría de ellas ofrecen resultados obvios y lógicos que se pueden explicar con el elevado número de simulaciones ejecutadas, como es el caso de la variación de la duración media respecto a la variación tanto de la duración como de la desviación de cada una de las actividades. Lo mismo ocurre para las gráficas que representan la variación del coste medio respecto a la variación de la duración de las actividades y aquellas que muestran la variación de la desviación estándar del coste, puesto que su comportamiento apenas se modifica para los diferentes escenarios.



Las únicas que ofrecen algo de información útil a nuestro análisis son las que muestran los resultados obtenidos para la variación de la desviación estándar de la duración, ya que sí presentan variaciones en función de la actividad que estemos modificando, suponiendo esto que se ha de tener en cuenta la dispersión de los datos, además de las conclusiones obtenidas anteriormente, a la hora de elegir la jerarquización de las actividades en función de su importancia.

Si tomamos en consideración todo lo comentado hasta ahora y analizamos de manera conjunta todas las gráficas obtenidas para los distintos indicadores y actividades, se puede concluir con que, en definitiva, la actividad que más habrá que observar y controlar a lo largo de la evolución de nuestro proyecto es la A4. Esta tiene un comportamiento reductivo en lo que a la variación de la desviación estándar de la duración respecta, así como alcanza en todos los casos los mayores valores de crucialidad y criticidad en comparación al resto de actividades. Esto supondrá que cualquier modificación sobre la duración, coste o cualquier variable asociada a esta actividad, influirá notablemente sobre el resultado final del proyecto.



7. ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se analizan y cuantifican los costes generados en la realización del presente Trabajo de Fin de Grado (en adelante, TFG) “Análisis de sensibilidad de actividades considerando los riesgos del proyecto”.

El estudio económico sirve de ayuda a la hora de valorar la viabilidad del proyecto, teniendo en cuenta su ciclo de vida completo, desde que se idea hasta que se elabora el proyecto real planteado.

Antes de presentar y comentar las fases que forman el proyecto, es importante conocer y definir los recursos empleados en la realización del mismo, comenzando por las personas intervinientes en el proceso:

- **Director o jefe del proyecto:** corresponde con la figura del tutor. Es el encargado de proponer la idea y el esquema del proyecto, así como de sugerir y supervisar cambios en el mismo, aprobar las propuestas de trabajo y coordinar los recursos necesarios para el avance de este.
- **Ingeniero de Organización Industrial:** corresponde con la figura del autor del documento. Es el encargado de la evaluación y estudio de la idea y el esquema ofrecidos por el jefe del proyecto, así como de elaborar las propuestas de trabajo, el desarrollo de las fases del proyecto y la evaluación de los resultados.

A continuación, haremos un desglose de las fases que engloba el ciclo de vida del proyecto de inicio a fin, así como de los costes y su asociación con los recursos empleados.

7.1. Fases del proyecto

El proyecto se ha dividido en un total de 7 fases, siendo estas:

- **Fase 1: Definición de las bases del proyecto:** los responsables plantean la idea inicial de proyecto que tienen en mente y su desarrollo futuro, especificando qué necesidades, objetivos y alcance quieren lograr, en base a los requerimientos del cliente.
- **Fase 2: Recogida de información:** se trata de una etapa de información en la cual el ingeniero de organización tiene una primera toma de contacto con el entorno en el que se desarrollará el proyecto y las condiciones del trabajo del mismo.
- **Fase 3: Estudio de las actividades y riesgos:** el ingeniero realiza un análisis de las actividades que forman el proyecto y plantea los posibles riesgos que puedan surgir de las mismas.
- **Fase 4: Recogida de datos:** una vez planteadas las actividades y riesgos del proyecto, se hace una recogida de los datos de coste y duración asociados a estos.
- **Fase 5: Elaboración del análisis:** teniendo todos los datos de duración y coste de las actividades y riesgos planteados en la red del proyecto, comienza la elaboración del análisis de sensibilidad de las actividades considerando los riesgos del mismo. Esto incluye el cálculo de indicadores o la realización de las gráficas, entre otras cosas.



- **Fase 6: Elaboración de la memoria:** el ingeniero documenta los resultados de las simulaciones y redacta el análisis asociado a estos, así como sus conclusiones y propuestas para proyectos futuros.
- **Fase 7: Presentación:** el ingeniero prepara y expone ante un tribunal el resultado final del TFG.

7.2. Costes de la Realización del TFG

Para hacer un estudio económico consistente y completo, es necesario realizar el análisis del coste total que supone la realización de este trabajo de fin de grado, haciendo un desglose de los costes del mismo, diferenciando entre costes directos e indirectos.

7.2.1. Costes Directos

Definimos costes directos, en lo que a este TFG respecta, como los imputables de manera directa a la realización del trabajo. Los costes directos que se pueden asociar al mismo son los relativos a la mano de obra y al material de oficina empleados.

Para el cálculo de los costes de personal, recogeremos el número total de horas empleadas por cada persona interviniente en el proyecto, así como el coste por hora que supone tener a esas personas empleadas. En la Tabla 7, planteamos la relación entre estos costes asociados a las respectivas figuras, así como el cálculo del total de los costes de personal:

| Personal | Horas | Coste (€/h) | Total (€) |
|------------------|-------|-------------|--------------|
| Jefe de proyecto | 300 | 16,67 | 5.000 |
| Ingeniero | 10 | 12,5 | 125 |
| Total | - | - | 5.125 |

Tabla 7. Costes Directos de Personal

También es necesario hacer el cálculo del coste total de los recursos físicos empleados en la realización del proyecto, siendo estos los presentados en la Tabla 8:

| Recurso | Total (€) |
|---------------------|--------------|
| Ordenador | 800 |
| Material de Oficina | 90 |
| Sistema Operativo | 120 |
| Impresora | 120 |
| Teléfono Móvil | 550 |
| Total | 1.680 |

Tabla 8. Costes Directos de Recursos Físicos



Podemos concluir con el resultado total de los costes directos imputables al TFG en cuestión, siendo estos un total de 6.805€.

7.2.2. Costes Indirectos

Los costes indirectos son aquellos que se imputan al proceso de desarrollo del proyecto, que no están directamente relacionados con este, pero sin los cuales no sería posible su realización. En la siguiente tabla (Tabla 9), se presentan los costes indirectos asociados con el proyecto:

| Recurso | Total (€) |
|-------------------------------|------------------|
| Consumo Eléctrico | 150 |
| Internet | 230 |
| Consumo Telefónico | 70 |
| Consumo de Combustible | 500 |
| Total | 950 |

Tabla 9. Costes Indirectos

7.3. Costes Totales de la Realización del TFG

Finalmente, el total de los costes de la realización de este trabajo, teniendo en cuenta los costes directos e indirectos, asciende a un total de 7.755€, como se muestra en la Tabla 10:

| Tipo de coste | Total (€) |
|----------------------|------------------|
| Directo | 6.805 |
| Indirecto | 950 |
| Total | 7.755 |

Tabla 10. Costes Totales



8. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolla un estudio de la incertidumbre en un proyecto teniendo en cuenta sus actividades y unos riesgos concretos asociados a estas. Este estudio se lleva a cabo analizando cómo la aparición de los riesgos influye sobre la duración y el coste de las actividades y del proyecto final. Este impacto se mide mediante el cálculo de los indicadores de criticidad, crucialidad y sensibilidad de duración y coste, obtenidos tanto para cada una de las actividades como para el total final del proyecto; a través de la aplicación del método de Monte Carlo. El objetivo principal de este trabajo se fijó inicialmente como el estudio de cómo distintos tipos de riesgos, aplicados en diferentes etapas del proyecto, y afectando de manera indistinta al coste o duración de estas etapas, afectan sobre el resultado final del proyecto. En definitiva, queremos ver qué actividades del proyecto tienen más importancia sobre el resultado final del mismo, evaluando cómo variaciones sobre las variables de las mismas influyen sobre este.

Para lograr dicho objetivo, se diseñó un proyecto sobre el que ejecutar simulaciones utilizando el método de Monte Carlo, con ayuda del software CrystalBall. Para ejecutar estas simulaciones, se modeló la incertidumbre de la duración y el coste de las actividades y los riesgos mediante diferentes funciones de distribución como normal, uniforme, triangular o determinista. Con esto, conseguimos simular numerosos escenarios obteniendo una cantidad suficiente de resultados para poder realizar un análisis completo y realista sobre el efecto de los cambios en las variables de las actividades sobre la duración y el coste del proyecto.

A lo largo del trabajo, recogemos y analizamos los resultados obtenidos para cada escenario, calculando los indicadores definidos para cada uno de ellos y comparando los resultados en función de si variamos la duración media de las actividades o su desviación típica, y de si lo hacemos respecto a la duración o el coste de las mismas. De este modo, podemos medir la importancia de las actividades en función de cómo influyen estas modificaciones sobre el resultado final del proyecto. A continuación, presentamos los resultados obtenidos de este análisis.

El análisis realizado muestra que, en términos de criticidad, solo las variaciones en la duración de las actividades proporcionan información útil sobre la importancia de las mismas, ya que los indicadores CI (criticidad en duración) y RC (criticidad en coste) no presentan cambios cuando se modifica la desviación estándar. Se observa que aumentar la duración de una actividad incrementa su CI, así como el de las actividades que comparten su camino crítico, aumentando su relevancia. En cuanto al coste, el indicador RC de la actividad cuya duración se incrementa también aumenta, mientras que el de las demás disminuye levemente, debido a la necesidad de equilibrar el coste total del proyecto.

Además, la crucialidad, tanto en duración (C_{RI}) como en coste (C_{CI}), sigue un comportamiento similar al de la criticidad. Las actividades cuya duración o desviación estándar aumentan tienden a ganar importancia, especialmente la actividad A4, que se destaca por alcanzar los valores más altos de crucialidad y criticidad en todos los escenarios. Los indicadores de sensibilidad (SSI y CSI) confirman que los cambios en la duración y desviación de las actividades afectan



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

directamente la duración y el coste final del proyecto, siendo la actividad A4 la que más impacto tendrá sobre el resultado final.



9. REFERENCIAS

- AACE - American Association of Cost Engineering, 2011. Integrated cost and schedule risk analysis using Monte Carlo simulation of a CPM model. AACE International Recommended Practice No. 57R-09.
- Acebes, F., Curto, D., González-Varona, J. M., & Poza, D. (2022). Impact of aleatoric, stochastic and epistemic uncertainties on project cost contingency reserves. *International Journal of Production Economics*, 253, 108626.
- Acebes, F., González-Varona, J. M., López-Paredes, A., & Pajares, J. (2024). Beyond probability-impact matrices in project risk management: A quantitative methodology for risk prioritisation. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11(1), 1-13.
- Acebes, F., Pajares, J., Galán, J. M., & López-Paredes, A. (2014). A new approach for project control under uncertainty. Going back to the basics. *International Journal of Project Management*, 32(3), 423-434.
- Acebes, F., Pajares, J., Galán, J. M., & López-Paredes, A. (2015). Exploring the relations between project duration and activity duration. In *Project Management and Engineering: Selected Papers from the 17th International AEIPRO Congress held in Logroño, Spain, in 2013* (pp. 19-30). Springer International Publishing.
- Acebes, F., Poza, D., González-Varona, J. M., Pajares, J., & López-Paredes, A. (2021). On the project risk baseline: Integrating aleatory uncertainty into project scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 160, 107537.
- Acebes, F., Pajares, J., González-Varona, J. M., & López-Paredes, A. (2021). Project risk management from the bottom-up: Activity Risk Index. *Central European Journal of Operations Research*, 29(4), 1375-1396.
- Acebes, F., Pereda, M., Poza, D., Pajares, J., & Galán, J. M. (2015). Stochastic earned value analysis using Monte Carlo simulation and statistical learning techniques. *International Journal of Project Management*, 33(7), 1597-1609.
- Acebes Senovilla, F., Pajares Gutiérrez, J., & López-Paredes, A. (2015). GESTIÓN DE RIESGOS DEL PROYECTO. DESDE LA GESTIÓN DE RIESGOS A LA GESTIÓN DE LA INCERTIDUMBRE. XIX International Congress on Project Management and Engineering, 15-17.
- Acebes Senovilla, F., Pajares Gutiérrez, J., & López Paredes, A. (2016). INDICADORES DE SENSIBILIDAD DE COSTES PARA LAS ACTIVIDADES DEL PROYECTO. XX International Congress on Project Management and Engineering, 130-141.
- Al-Duais, F. S., & Al-Sharpi, R. S. (2023). A unique Markov chain Monte Carlo method for forecasting wind power utilizing time series model. *Alexandria Engineering Journal*, 74, 51-63.



- Alleman, G., Coonce, T., & Price, R. (2018). Increasing the probability of program success with continuous risk management. *Coll. Perform. Manage*, 4, 27-46.
- Alleman, G. B., Coonce, T. J., & Price, R. A. (2018). What is risk. *Meas. News*, 1(1), 25-34.
- Baccarini, D., & Love, P. E. (2014). Statistical characteristics of cost contingency in water infrastructure projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(3), 04013063.
- Bazzani, C. L., & Trejos, E. A. C. (2008). Análisis de riesgo en proyectos de inversión un caso de estudio. *Scientia et Technica*, 1(38).
- Beck, U. (1998 (1986)). *La sociedad del riesgo: Hacia una nueva modernidad.* (J. Navarro, D. Jiménez, & B. M. Rosa, Trads.) Barcelona: Paidós.
- Berrío, J. G. R. (2007). La borrosa distinción riesgo-incertidumbre. *TecnoLógicas*, (19), 13-46.
- Bucero, A. (2013). *La dirección de proyectos.* Lima: Díaz de Santos.
- Capuz Rizo, S., & Ordieres Meré, J. (2022). Hoja de ruta de los estándares y metodologías para la dirección de proyectos, programas y carteras.
- Curto Lorenzo, D., Pajares Gutiérrez, J., Martín Cruz, T. N., & Acebes Senovilla, F. (2023). Influencia de los diferentes tipos de incertidumbre en la Gestión de Riesgos en Proyectos: un análisis de sensibilidad.
- Gálvez Ahumada, E. D. (2015). Análisis de incertidumbre y análisis de sensibilidad global en la duración de proyectos usando la matriz de estructura dependiente (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Guerrero Chanduví, D. A. (2014). Capítulo 1. Teoría General del Proyecto, Marco Teórico.
- Hillson, D. (2014, October). *How to manage the risks you didn't know you were taking.* Newtown Square, PA, USA: Project Management Institute.
- Hillson, D. (2017). *Managing risk in projects.* Routledge.
- Johan Fernando Abad-Cevallos, & Patricio Fernando Cevallos-Jiménez. (2022). Propuesta, según PMBoK, para gestionar los riesgos de proyectos del Departamento de Planificación PACARSI S.A. *Revista Científica FIPCAEC (Fomento De La investigación Y publicación científico-técnica multidisciplinaria)*. ISSN: 2588-090X. *Polo De Capacitación, Investigación Y Publicación (POCAIP)*, 7(1), 56-81. Recuperado a partir de <https://fipcaec.com/index.php/fipcaec/article/view/507>
- Lavell, A. (2001). Sobre la gestión del riesgo: apuntes hacia una definición. *Biblioteca Virtual en Salud de Desastres-OPS*, 4, 1-22.



- Lefley, F. (1997). Approaches to risk and uncertainty in the appraisal of new technology capital projects. *International Journal of Production Economics*, 53(1), 21-33.
- Linares Llamas, P., & Sánchez Miralles, J. (2023). Dirección de Proyectos.
- Martin, J., 1965. Distribution of the time through a directed, acyclic network. *Operations Research* 13, 46–66
- Martínez, G., Moreno, B., & Rubio, M. D. C. (2012). Gestión del riesgo en proyectos de ingeniería. El caso del campus universitario PTS. Universidad de Granada (España). *Dyna*, 79(173), 7-14.
- Muñoz, B., ROMANA, M., & Ordóñez, J. (2016, June). Análisis de Sensibilidad de una Metodología de Decisión Multicriterio desarrollada para la Selección de Tipologías de Estructuras de Contención en una Autovía Urbana. In XII Congreso de ingeniería del transporte. 7, 8 y 9 de Junio, Valencia (España) (pp. 624-629). Editorial Universitat Politècnica de València.
- Oracle, 2023. Crystal Ball [WWW Document]. URL <https://www.oracle.com/es/applications/crystalball/> (fecha de acceso 20-02-2023).
- Pajares, J., Acebes, F., Poza, D., Martín-Cruz, N., & Lopez-Paredes, A. (2022). Gestión de la complejidad en proyectos. Aportaciones desde el Pensamiento Sistémico.
- Pasman, H., & Reniers, G. (2014). Past, present and future of Quantitative Risk Assessment (QRA) and the incentive it obtained from Land-Use Planning (LUP). *Journal of loss prevention in the process industries*, 28, 2-9.
- Project Management Institute, "A Guide to The Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guides)," 6th edition, pag. 724.
- Rodríguez-Aragón, L. J. (2011). Simulación, método de montecarlo. Recuperado de: https://previa.uclm.es/profesorado/licesio/docencia/mcoi/tema4_guion.pdf.
- Riveros, A. (2023). Conceptos básicos para la gestión de proyectos según el PMBOK® Guide. EALDE Business School. <https://www.ealde.es/conceptos-proyectos-pmbok-guide/>
- Romano, G., & Yacuzzi, E. (2011). Elementos de la gestión de proyectos (No. 449). Serie Documentos de Trabajo.
- Vanhoucke, M., 2012. Using activity sensitivity and network topology information to monitor project time performance.. *International Journal of Production Research*.
- Vasvari, T., 2015. Risk, risk perception, risk management - a review of the literature. *Publ. Finance Quart.* 60 (1), 29–48, 0031-496X.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Williams, T.M., 1992. Criticality in Stochastic Networks. *Journal of the Operational Research Society* 43, 353–357

Anexo I - Criticidad

Indicadores de duración Variando la duración

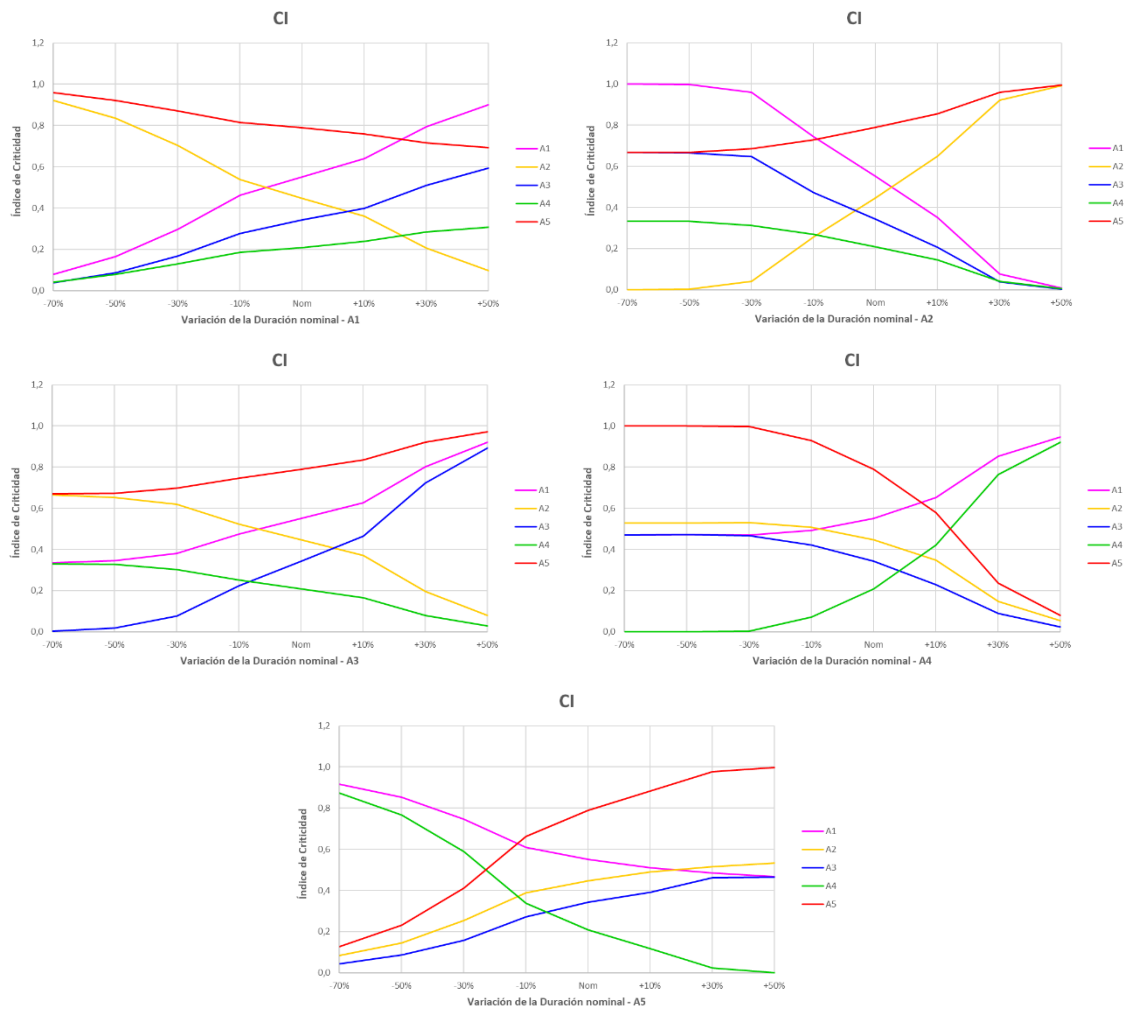


Ilustración 25. Índice de Criticidad variando la duración de cada actividad.



Variando la desviación

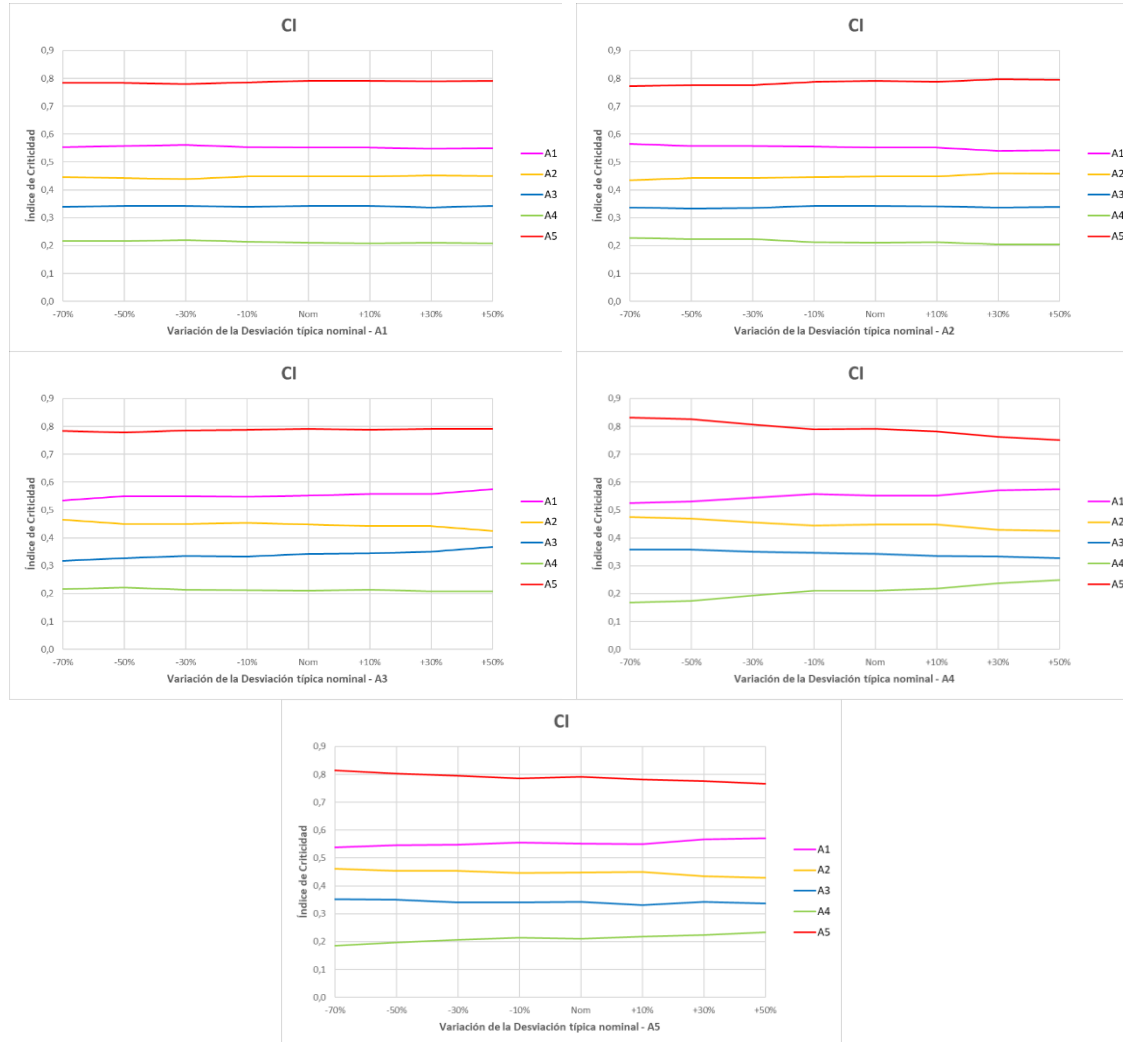


Ilustración 26. Índice de Criticidad variando la desviación estándar de cada actividad.



Indicadores de coste Variando la duración

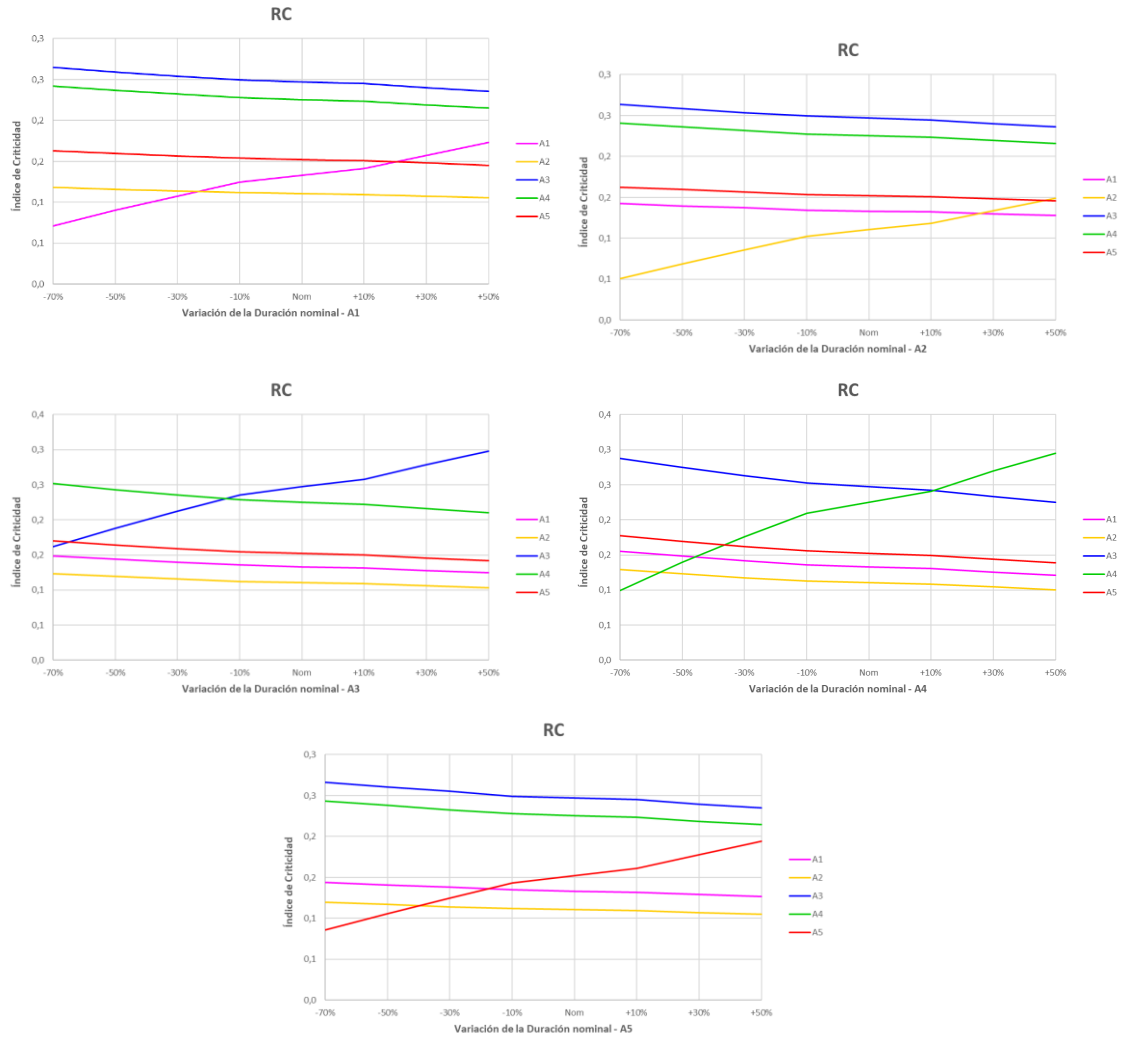


Ilustración 27. Índice de Coste Relativo variando la duración de cada actividad.

Variando la desviación

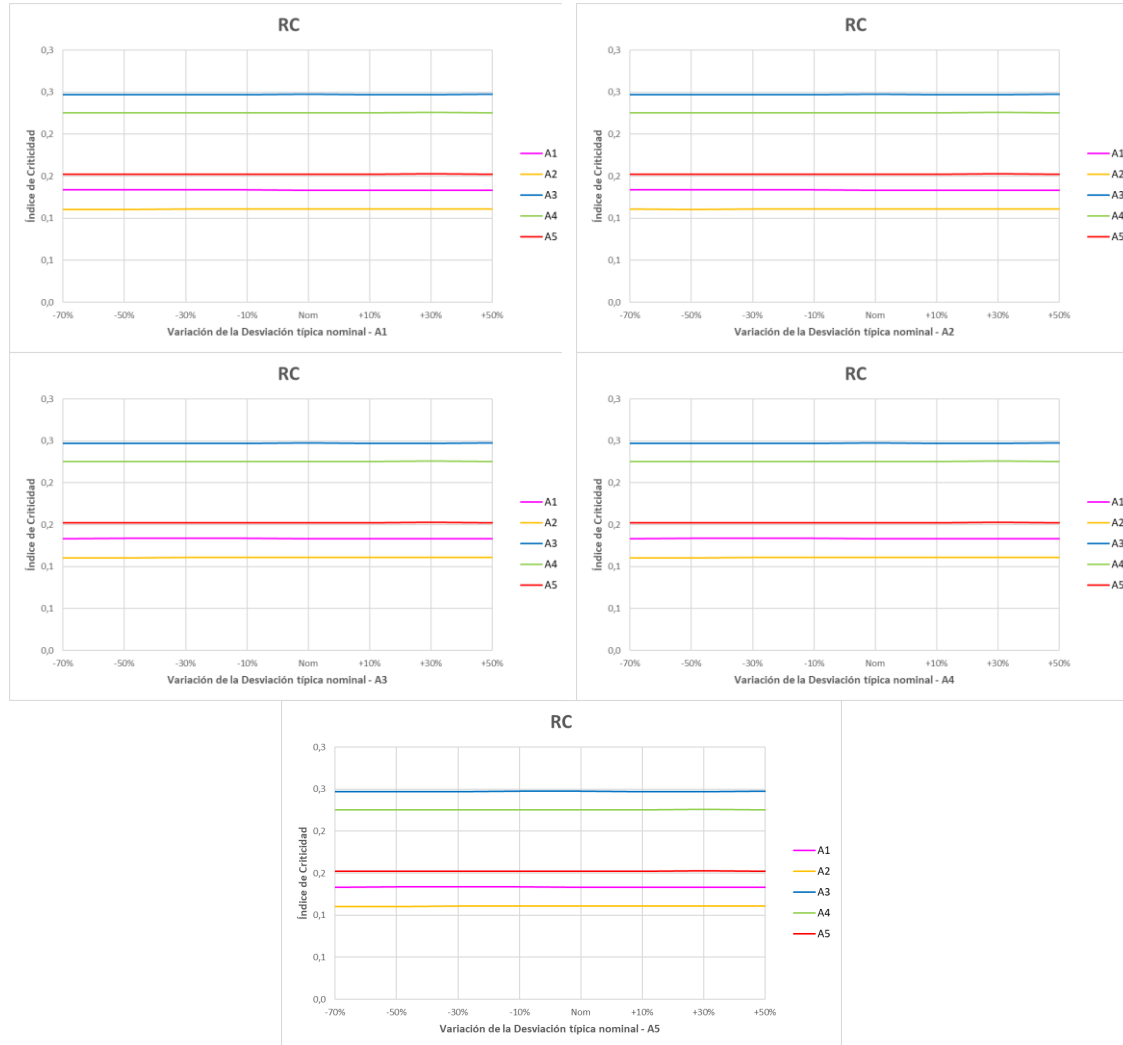


Ilustración 28. Índice de Coste Relativo variando la desviación estándar de cada actividad.

Anexo II- Crucialidad

Indicadores de duración

Variando la duración

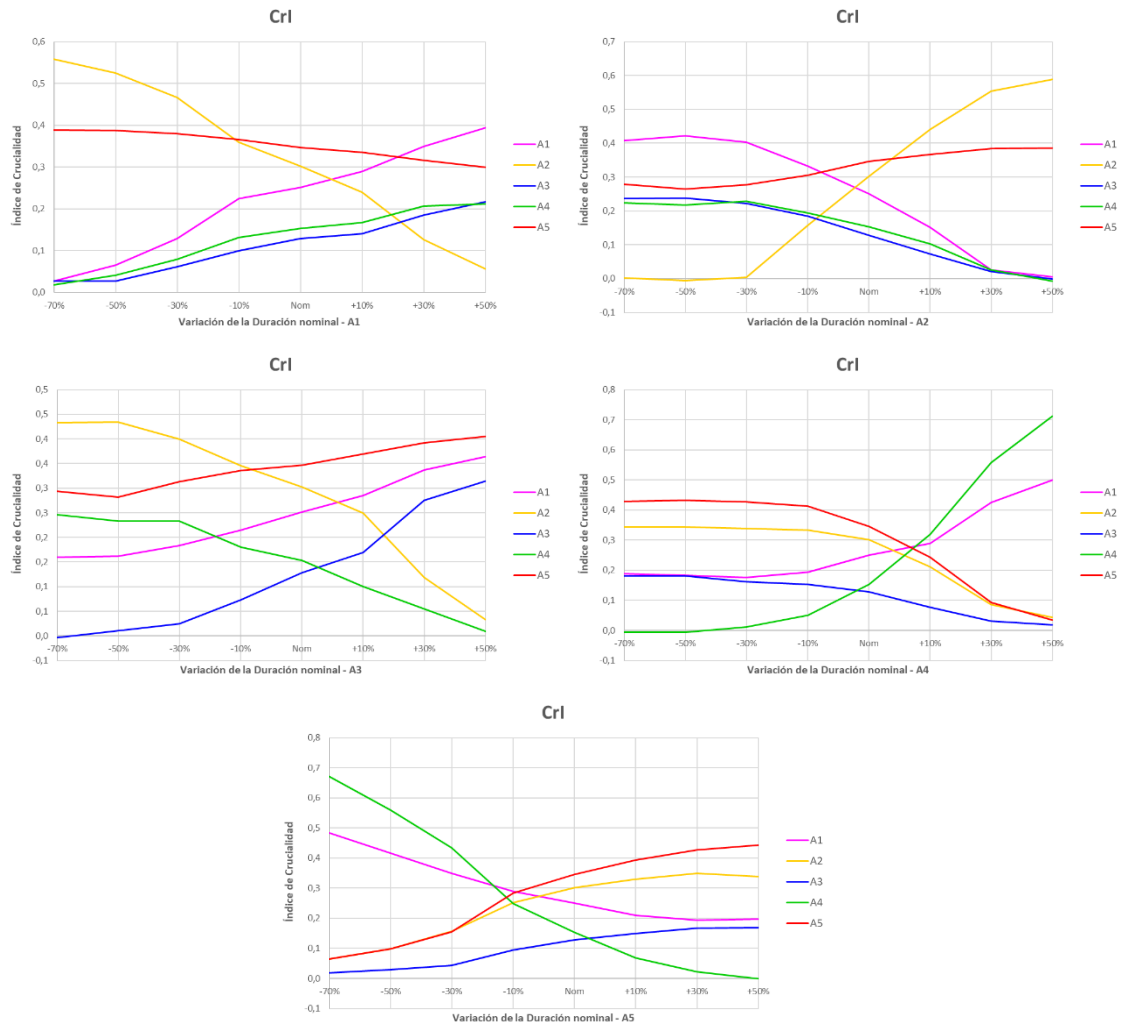


Ilustración 29. Índice de Crucialidad variando la duración de cada actividad.

Variando la desviación

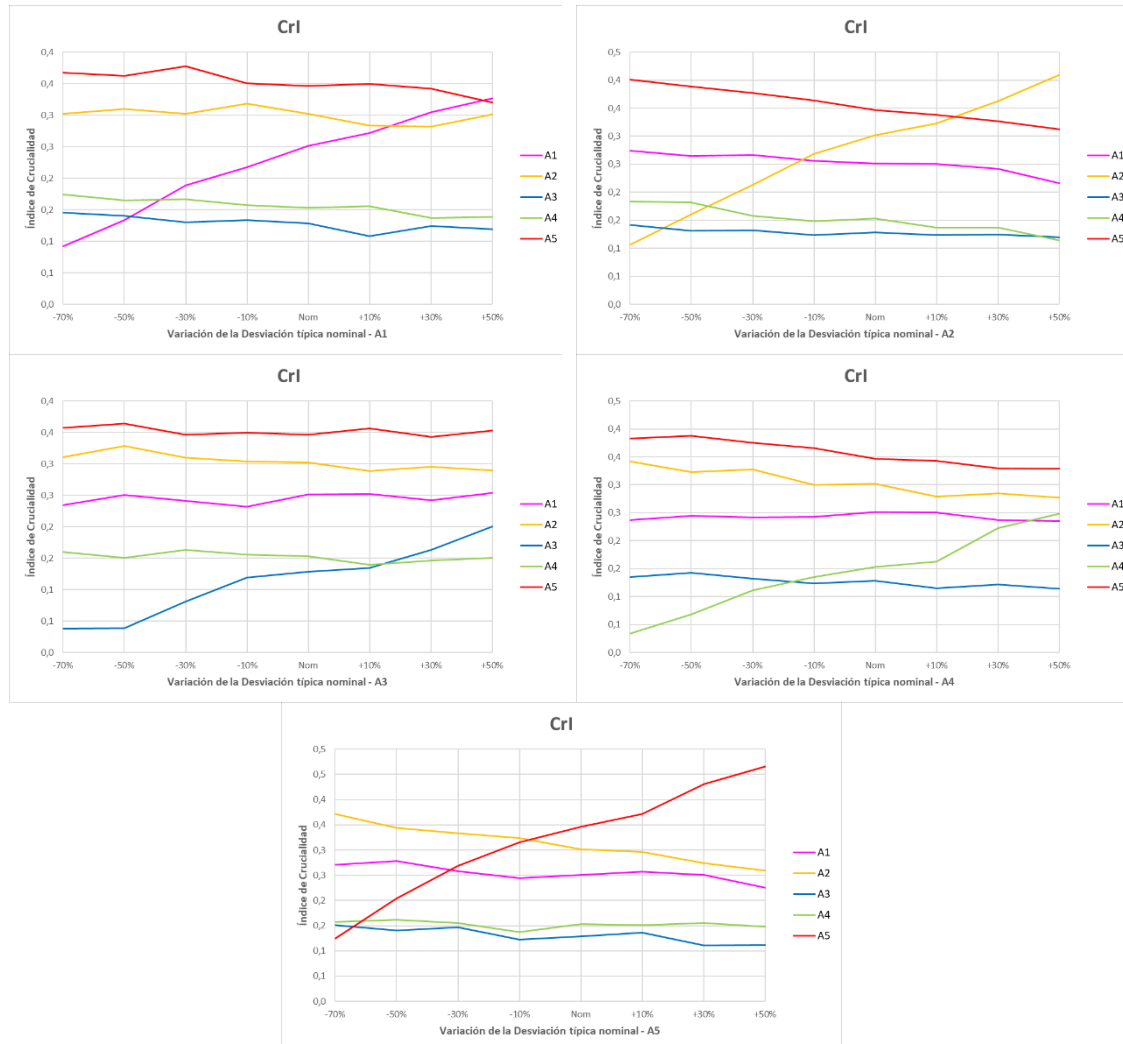


Ilustración 30. Índice de Crucialidad variando la desviación estándar de cada actividad.



Indicadores de coste Variando la duración

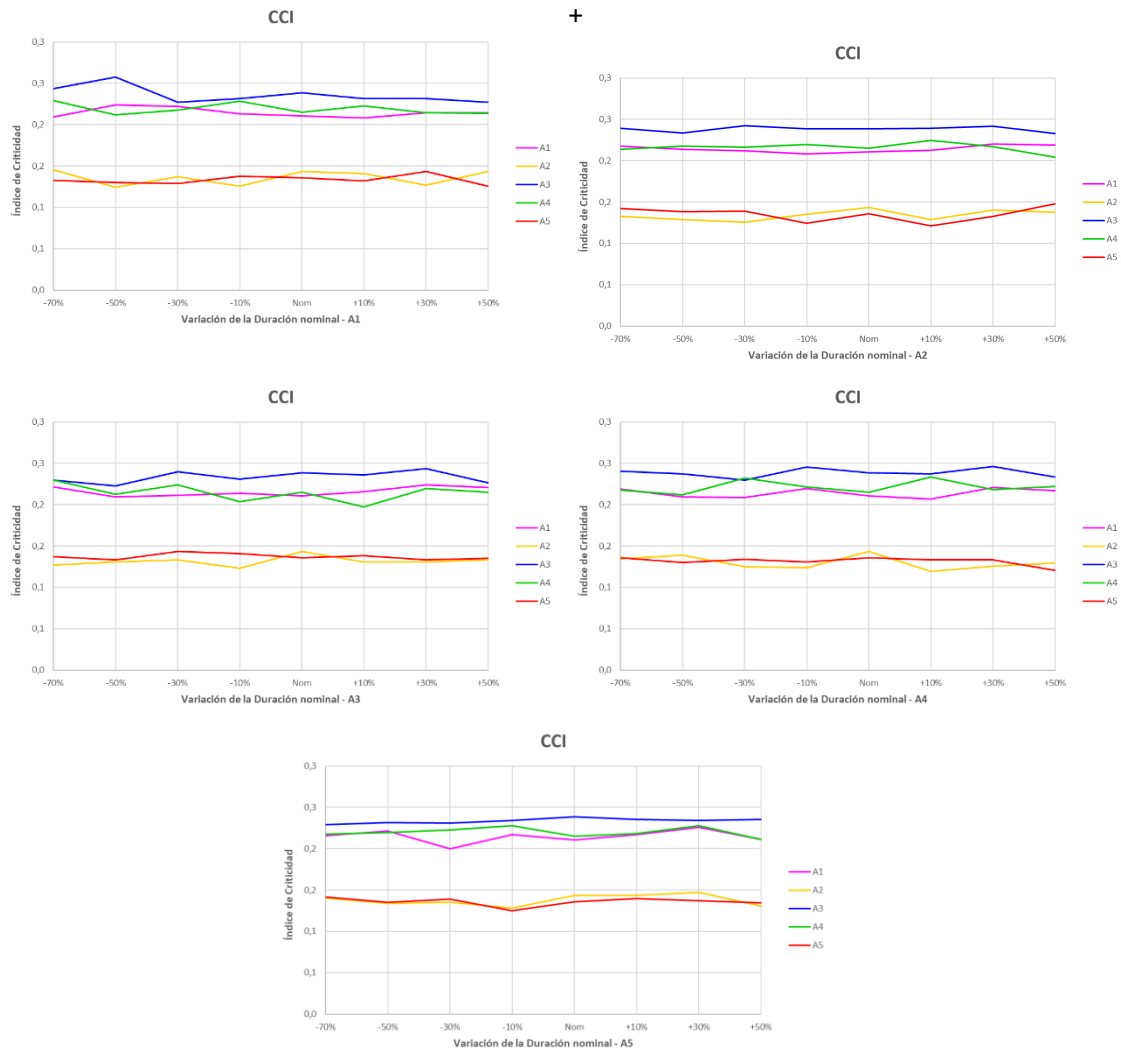


Ilustración 31. Índice de Crucialidad de Coste variando la duración de cada actividad.



Variando la desviación

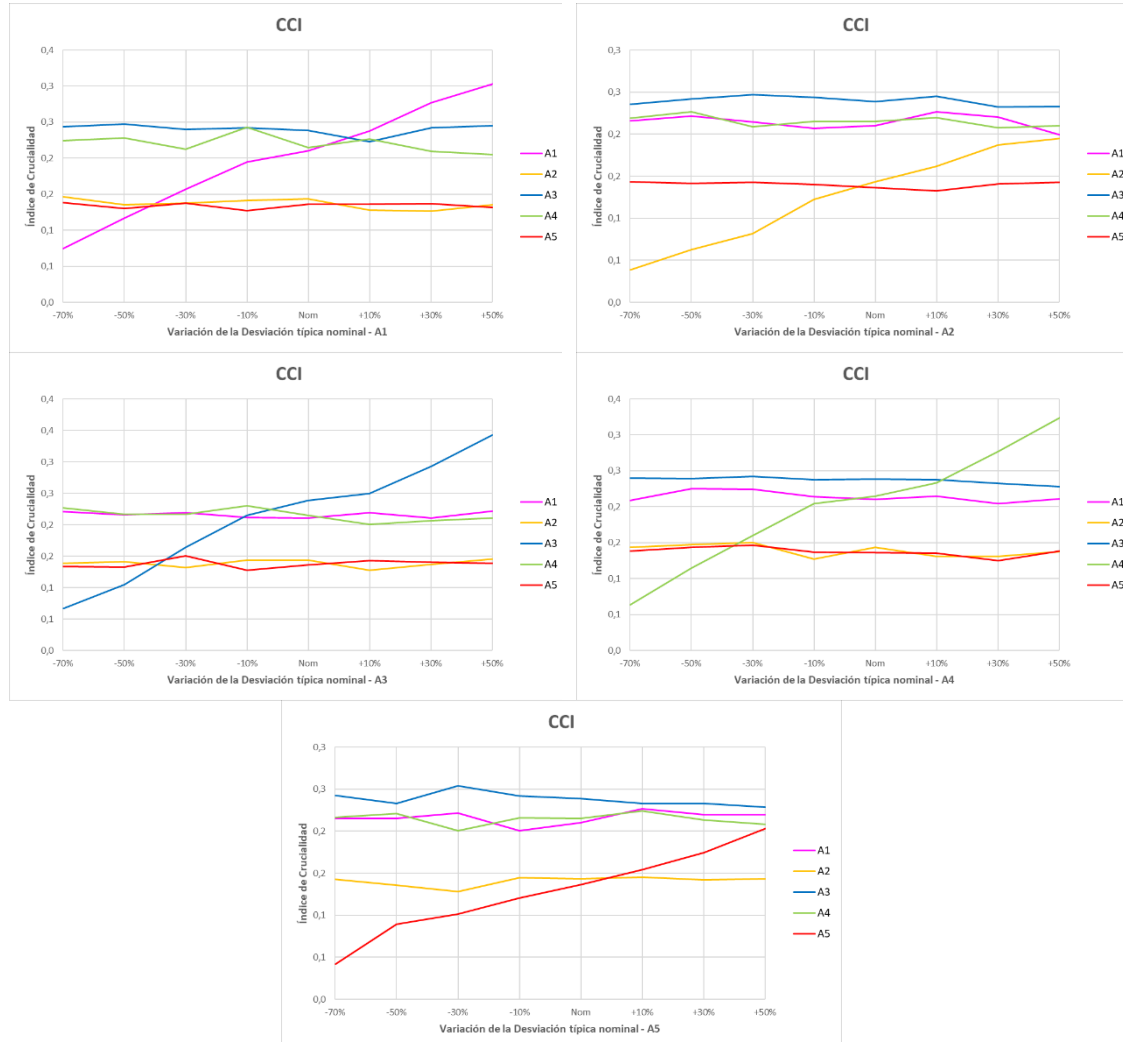


Ilustración 32. Índice de Crucialidad de Coste variando la desviación estándar de cada actividad.

Anexo III- Sensibilidad

Indicadores de duración

Variando la duración

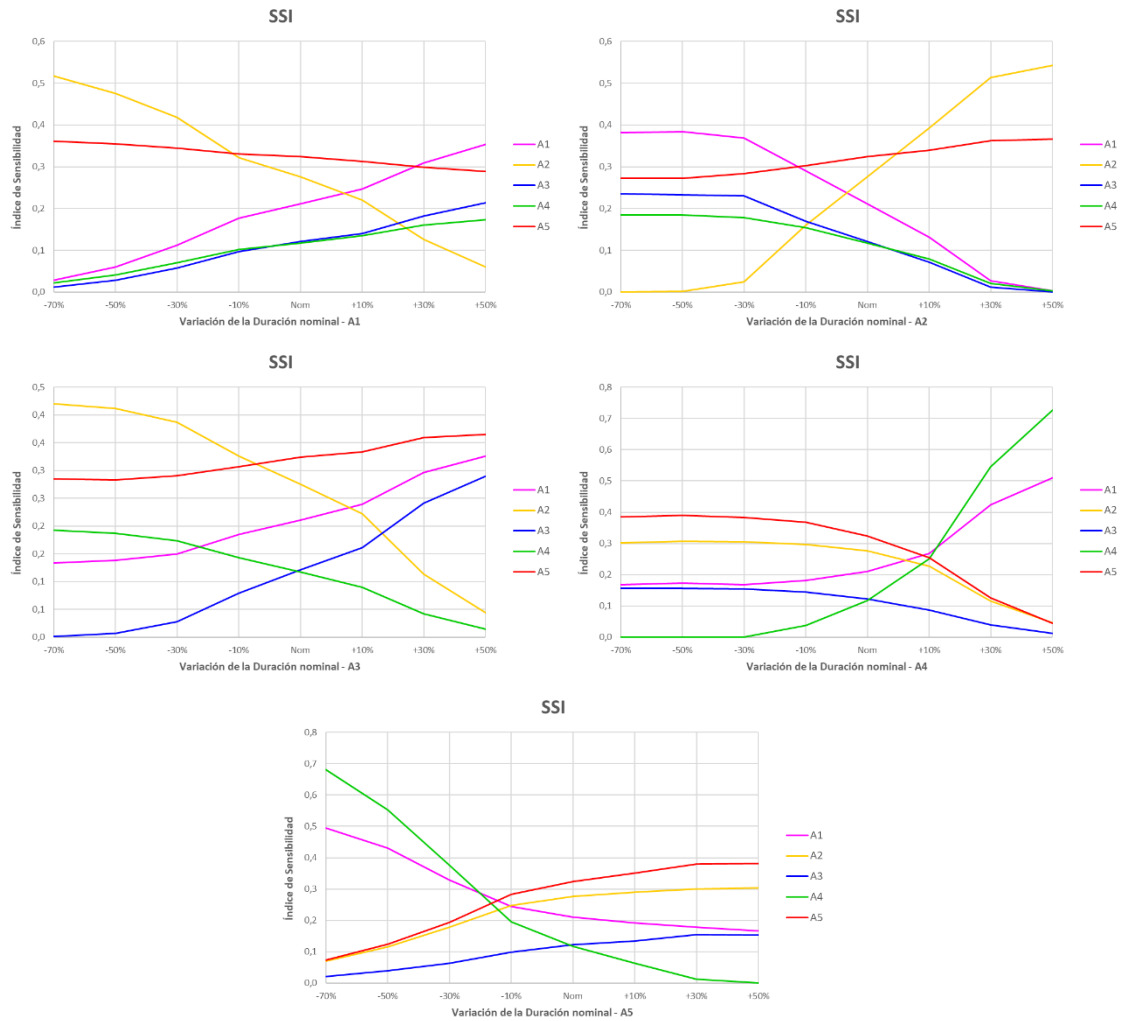


Ilustración 33. Índice de Sensibilidad de la duración variando la duración de cada actividad.



Variando la desviación

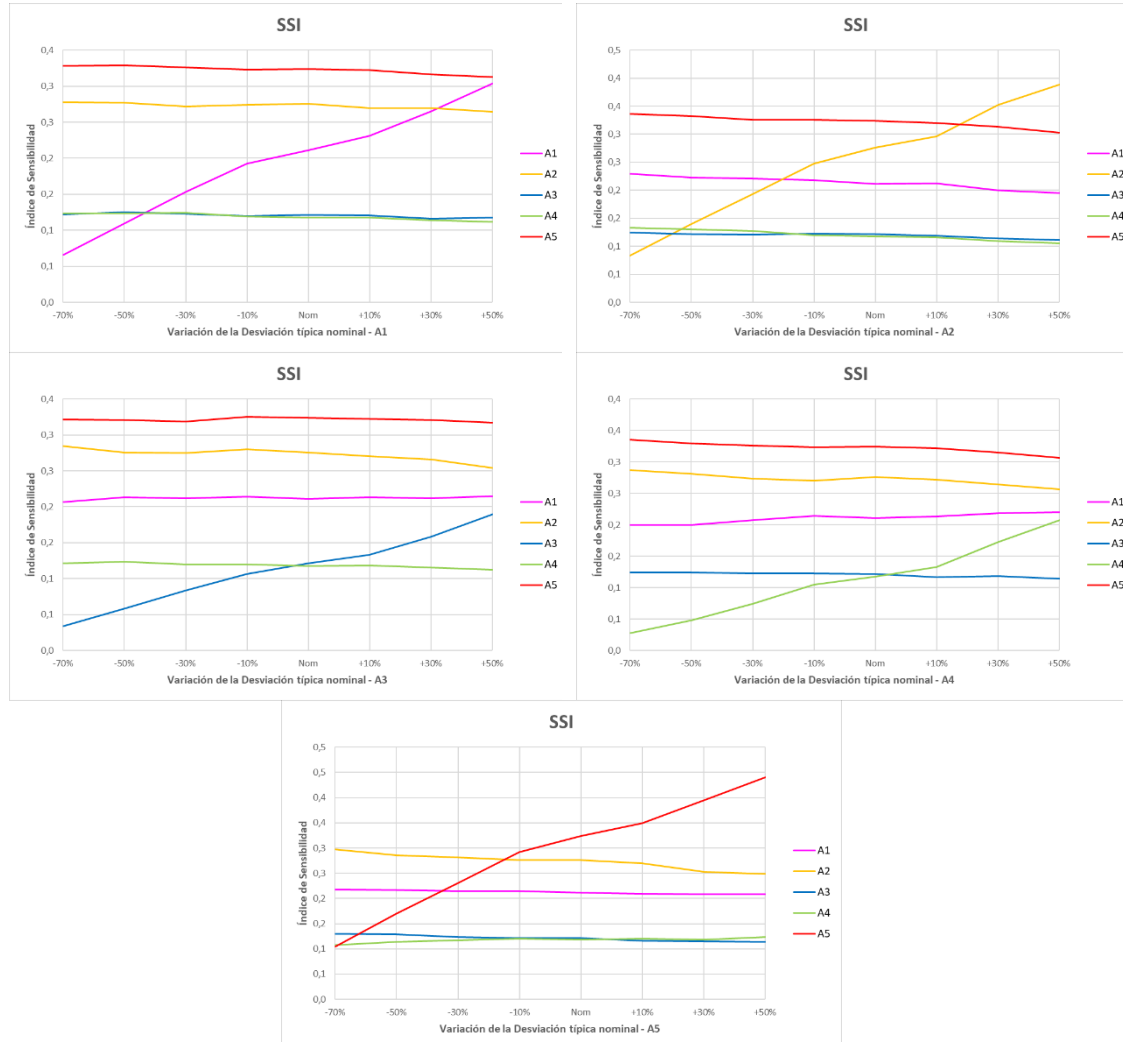


Ilustración 34. Índice de Sensibilidad de la duración variando la desviación estándar de cada actividad.



Indicadores de coste Variando la duración

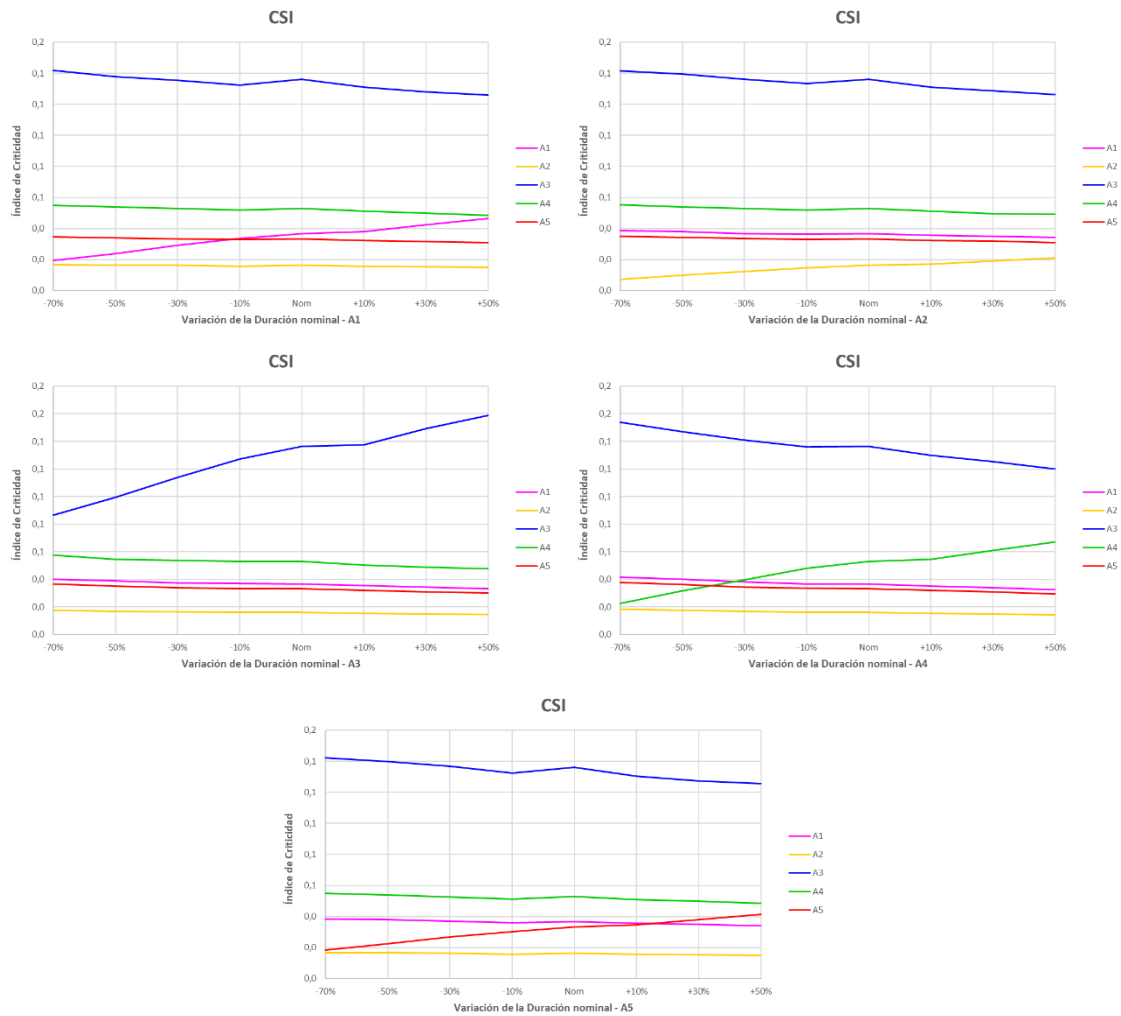


Ilustración 35. Índice de Sensibilidad de Coste variando la duración de cada actividad.

Variando la desviación

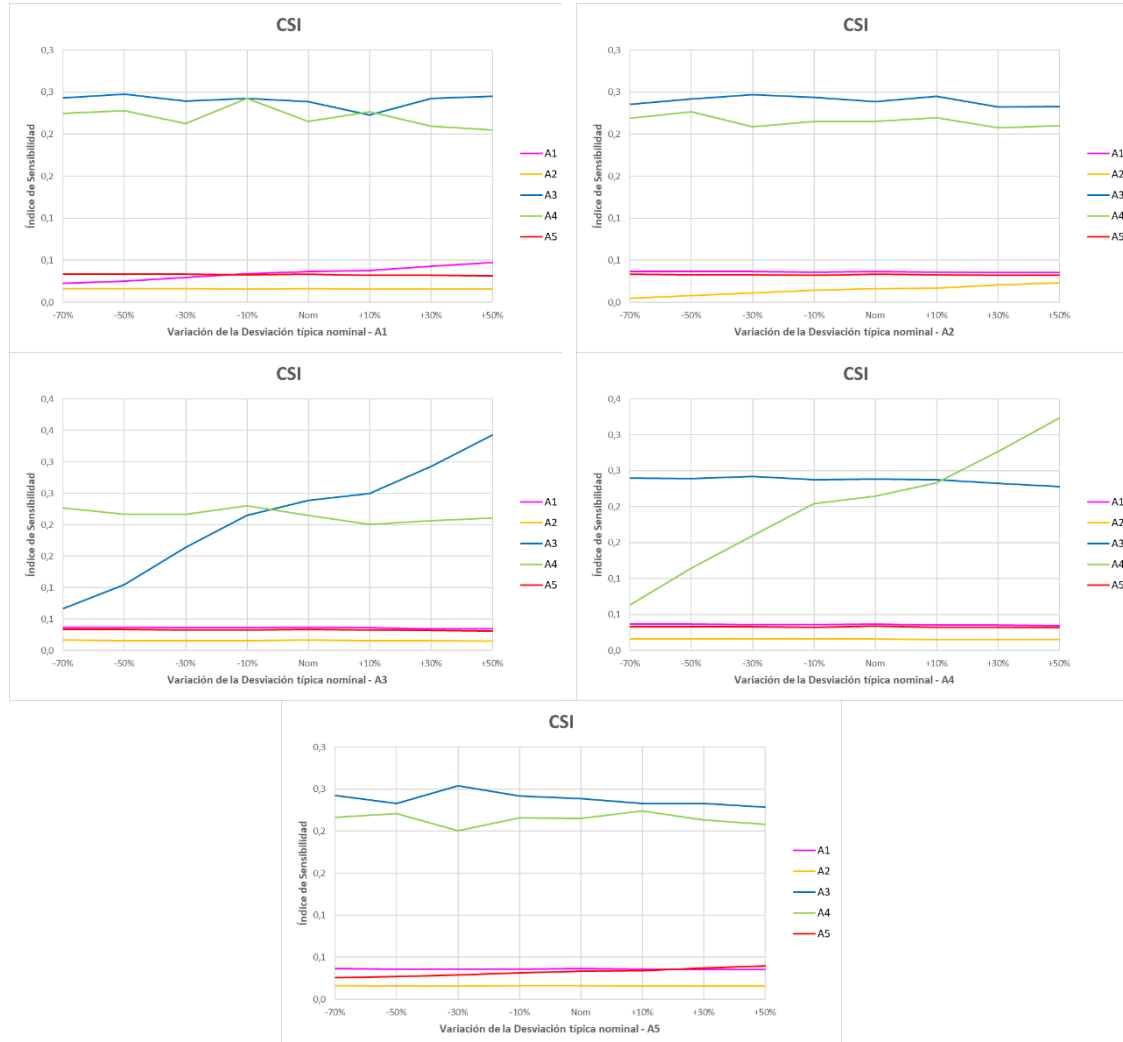


Ilustración 36. Índice de Sensibilidad de Coste variando la desviación típica de cada actividad.

Anexo IV- Generales

Duración media

Variando la duración



Ilustración 37. Variación de la duración media total del proyecto variando la duración de cada actividad.

Variando la desviación



Ilustración 38. Variación de la duración media total del proyecto variando la desviación estándar de cada actividad.

Desviación estándar Duración Variando la duración

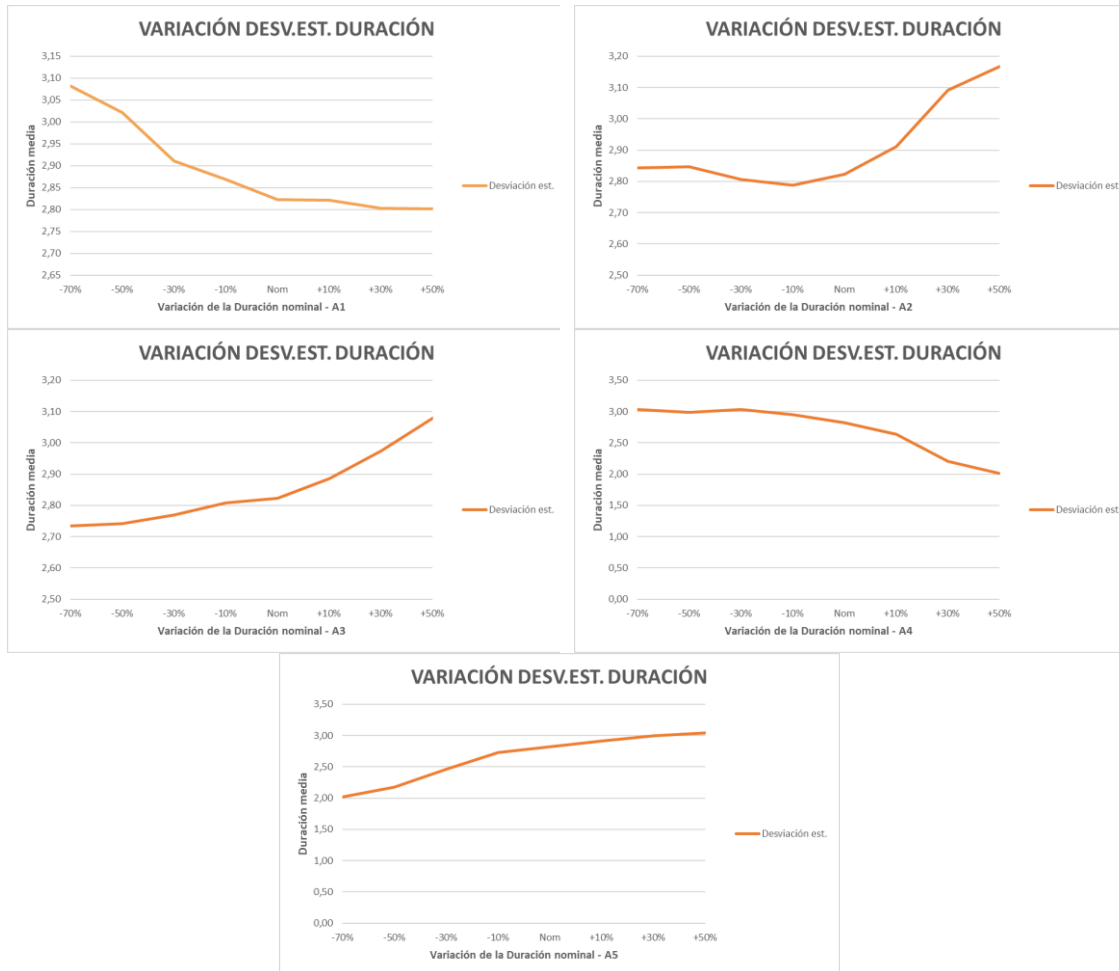


Ilustración 39. Variación de la desviación estándar de la duración total del proyecto variando la duración de cada actividad.

Variando la desviación

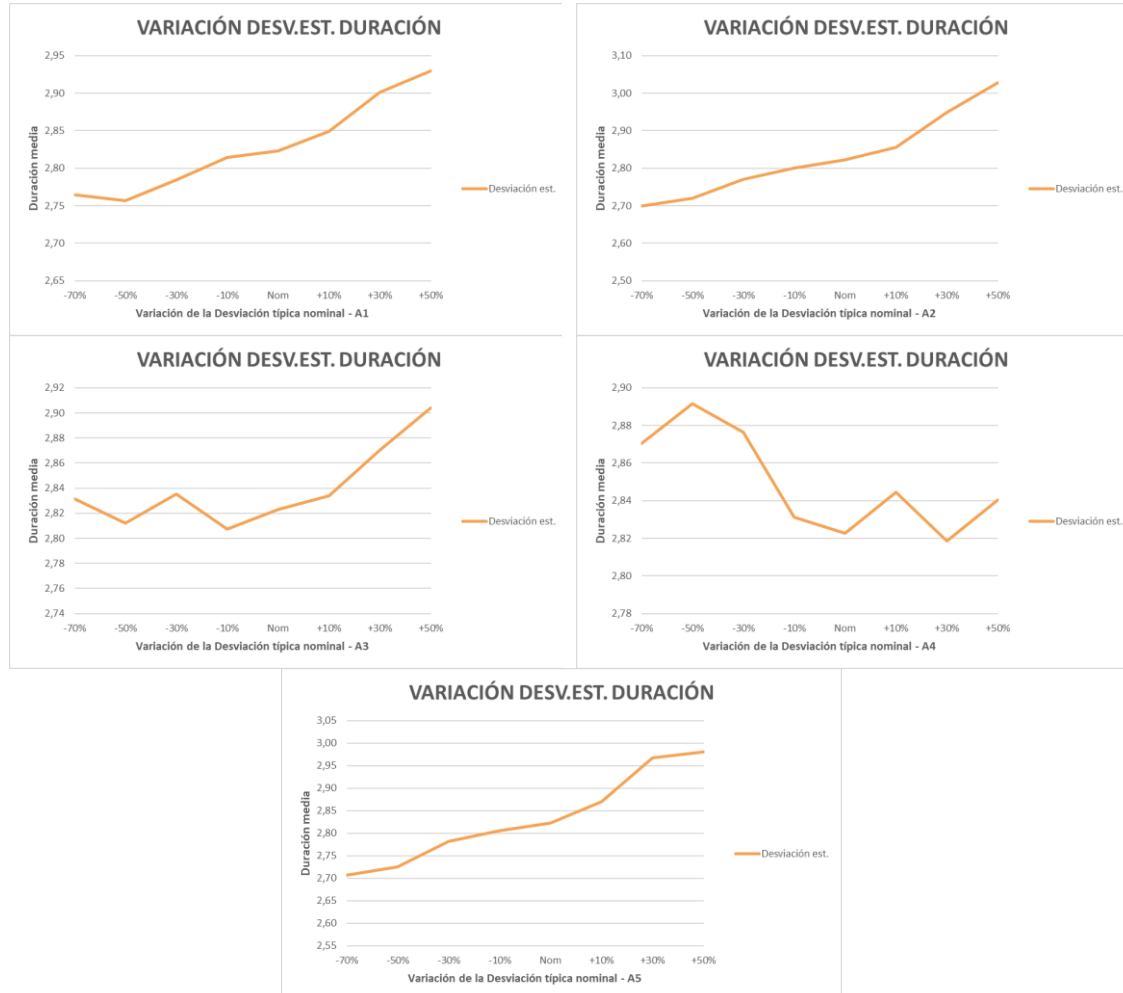


Ilustración 40. Variación de la desviación estándar de la duración total del proyecto variando la desviación estándar de cada actividad.



Coste medio

Variando la duración



Ilustración 41. Variación del coste medio total del proyecto variando la duración de cada actividad.

Variando la desviación



Ilustración 42. Variación del coste medio total del proyecto variando la desviación estándar de cada actividad.



Desviación estándar Coste Variando la duración



Ilustración 43. Variación de la desviación estándar del coste total del proyecto variando la duración de cada actividad.



Variando la desviación

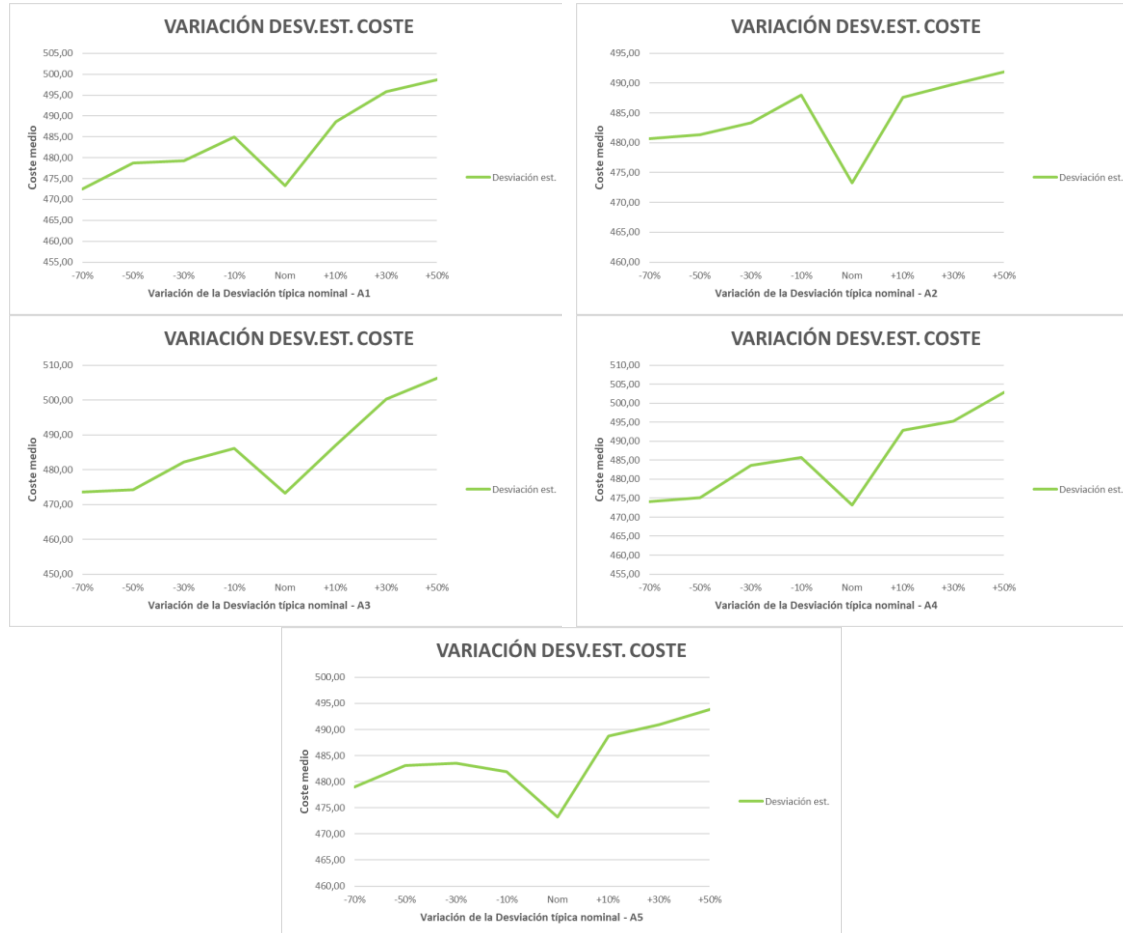


Ilustración 44. Variación de la desviación estándar del coste total del proyecto variando la desviación estándar de cada actividad.