

GUÍA METODOLÓGICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA PRACTICA
RECOMENDADA 57R-09 AACE: ANÁLISIS INTEGRADO DE LOS RIESGOS DE
COSTOS Y DE CALENDARIO MEDIANTE FACTORES DE RIESGO Y SIMULACIÓN
MONTE CARLO DE UN MODELO CPM

JOSE LUIS ACOSTA BAYONA
CAMILO ANDRES PEREZ PEÑA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
ESPECIALIZACION EN GERENCIA DE PROYECTOS DE CONSTRUCCION
BUCARAMANGA

2022

GUÍA METODOLÓGICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA PRACTICA
RECOMENDADA 57R-09 AACE: ANÁLISIS INTEGRADO DE LOS RIESGOS DE
COSTOS Y DE CALENDARIO MEDIANTE FACTORES DE RIESGO Y SIMULACIÓN
MONTE CARLO DE UN MODELO CPM

JOSE LUIS ACOSTA BAYONA
CAMILO ANDRES PEREZ PEÑA

Monografía para optar al título de Especialista en Gerencia de Proyectos de
Construcción

DIRECTOR
Guillermo Mejía Aguilar
Doctor en Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
ESPECIALIZACION EN GERENCIA DE PROYECTOS DE CONSTRUCCION
BUCARAMANGA
2022

Dedicatoria

El presente trabajo investigativo lo dedicamos principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A nuestros padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos.

A nuestros hermanos por estar siempre presentes, acompañándonos y por el apoyo moral, que nos brindaron a lo largo de esta etapa de nuestras vidas.

A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Gracias a nuestros padres: Francy, Jose; y, Rubiela y Francisco, por ser los principales promotores de nuestros sueños, por confiar y creer en nuestras expectativas, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.

Agradecemos a nuestros docentes de la especialización en gerencia de proyectos de construcción de la escuela de ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestro posgrado, de manera especial, al doctor Guillermo Mejía Aguilar, tutor de nuestro proyecto de investigación quien nos ha guiado con su paciencia, y su rectitud como docente.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCION	13
OBJETIVOS	15
OBJETIVO GENERAL	15
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1. ALCANCE	16
2. MARCO TEORICO.....	17
2.1. EL CRONOGRAMA DEL PROYECTO.	17
2.2. MÉTODO DEL CAMINO CRÍTICO	17
2.3. RIESGOS.....	18
2.4. RECOLECCIÓN DE RIESGOS (BASES DE DATOS)	18
2.5. RIESGOS EN SERIE Y PARALELO.....	19
2.6. PROBABILIDAD.....	20
2.7. MÉTODO DE FACTORES DE RIESGOS.....	20
2.8. IMPACTO DE LOS RIEGOS CON 100% PROBABILIDAD	21
2.9. IMPACTO DE LOS RIEGOS CON MENOS DEL 100% PROBABILIDAD	22
2.10. ASIGNACIÓN DE RIESGOS A MÚLTIPLES ACTIVIDADES	24
2.11. IMPACTO DE VARIOS RIESGOS SOBRE ACTIVIDADES.....	24
2.12. SIMULACIÓN DE MONTE CARLO.....	27
2.13. FONDOS DE CONTINGENCIA	27
2.13.1. Contingencias Derivadas Del Análisis De Riesgos Del Proyecto	28

2.13.2. Contingencia De Crecimiento De Costos	28
2.14. PROCESO DE GESTIÓN DEL TIEMPO DEL PROYECTO.	28
2.15. DIAGNÓSTICO DE LA EMPRESA	29
3. METODOLOGIA.....	30
3.1. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS	31
3.2. ASIGNACIÓN DE RIESGOS EN MODELO CPM	32
3.3. ASIGNACIÓN DE FACTORES DE RIESGO	32
3.4. ANÁLISIS DE RIESGO INTEGRADO.....	33
3.5. ANÁLISIS Y GESTIÓN DE RESULTADOS	35
4. CASO DE ESTUDIO	37
4.1. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS - PROYECTO.....	38
4.2. ASIGNACIÓN DE RIESGOS EN MODELO CPM - PROYECTO.....	42
4.3. ASIGNACIÓN DE FACTORES DE RIESGO - PROYECTO	44
4.4. ANÁLISIS DE RIESGO INTEGRADO.....	48
4.4.1 Resultados Con Nivel De Confiabilidad Del 80% - Proyecto.....	50
4.5. ANÁLISIS Y GESTIÓN DE RESULTADOS - PROYECTO	52
5. CONCLUSIONES.....	54
6. REFERENCIAS.....	55
7. ANEXOS	57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Método de ruta crítica.....	17
Figura 2: Riegos en serie y paralelo.....	19
Figura 3: Asignación factor 100% probabilidad – Riesgo 1.1.....	22
Figura 4: Modelado riesgo con 100% probabilidad – Riesgo 1.1.....	22
Figura 5: Asignación factor 60% probabilidad – Riesgo 1.2.....	23
Figura 6: Modelado riesgo con 60% probabilidad – Riesgo 1.2.....	23
Figura 7: Asignación de riesgos a múltiples actividades.....	24
Figura 8: Correlación de actividades con un riesgo.....	25
Figura 9: Actividades correlacionadas al 100% - Riesgo común.....	25
Figura 10: Correlación de actividades con múltiples riesgos.....	26
Figura 11: Actividades correlacionadas al 39% - Múltiples riesgos.....	27
Figura 12: Proceso de gestión del cronograma.....	29
Figura 13: Diagrama flujo – Análisis de riesgos integrado.....	30
Figura 15: Asignación de riesgos en modelo CPM.....	32
Figura 16: Asignación de factores de riesgo.....	33
Figura 17: Análisis de riesgo integrado.....	35
Figura 18: Análisis y gestión de resultados.....	36
Figura 19: Modelo CPM – Concreto rígido - 250 Metros Lineales.....	38
Figura 20: Asignación de riesgos en Safran Risk (r).....	44
Figura 21: Asignación Factores de riesgo - Riesgo 1 -Safran Risk ®.....	47
Figura 22: Asignación Factores de riesgo - Riesgo 7 -Safran Risk ®.....	47
Figura 23: Histograma de distribución de probabilidad de la duración del cronograma y resultados de la curva S - Safran Risk ®.....	49

Figura 24: Histograma de distribución de probabilidad del costo del proyecto y resultados de la curva S - Safran Risk ®.....50

Figura 25: Diagrama de dispersión del costo y fecha de finalización del proyecto con riesgos asignados - Safran Risk ®51

Figura 26: Par de costo y fecha de finalización más probable con P-80 - Safran Risk ®52

Figura 27: Riesgos priorizados por impacto en el calendario para nivel de confianza P-80 - Safran Risk ®53

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Matriz de Identificación de Riesgos.....	39
Tabla 2. Riesgos – Safran Risk ®	43
Tabla 3. Matriz probabilística de riesgos	45

ANEXOS

Pág.

Anexo A. Práctica recomendada AACE RP 57R – 09 adaptada al español.....57

RESUMEN

TÍTULO: GUÍA METODOLÓGICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA PRÁCTICA RECOMENDADA 57R-09 AACE: ANÁLISIS INTEGRADO DE LOS RIESGOS DE COSTOS Y DE CALENDARIO MEDIANTE FACTORES DE RIESGO Y SIMULACIÓN MONTE CARLO DE UN MODELO CPM*

AUTORES: JOSÉ LUIS ACOSTA BAYONA Y CAMILO ANDRÉS PÉREZ PEÑA**

PALABRAS CLAVE: AACE 57R-09, CRONOGRAMA, COSTOS, INTEGRACIÓN, MONTE CARLO, RIESGOS.

DESCRIPCIÓN:

La monografía consiste en la aplicación de la práctica recomendada 57R-09 de la AACE (Asociación para el Avance de la Ingeniería de Costos), en un proyecto desarrollado por una compañía inmobiliaria, donde se busca determinar los riesgos presentes en el proyecto para cada una de las actividades y su respectivo impacto en los costos y tiempos del proyecto. Se implementarán herramientas de identificación y gestión de riesgos mediante la simulación de Monte Carlo (MCS) y factores de riesgo, que permitan un mayor control de los riesgos presentes en el desarrollo de los costos y tiempos del proyecto. Haciendo un comparativo que muestre la diferencia entre utilizar las buenas prácticas recomendadas según la AACE y la forma en la que se desarrollan actualmente este tipo de proyectos.

En el siguiente documento se realizará un diagnóstico de la forma actual del manejo de los riesgos presentes en los proyectos de la empresa simulando el impacto sobre los tiempos y costos de un modelo CPM (método de la ruta crítica), se busca identificar las falencias con el objetivo de presentar una solución y que la gestión de los riesgos se desarrolle de manera apropiada, minimizando el impacto de los mismo en el correcto desarrollo del proyecto.

* Monografía

**Facultad de Ingenierías Físico – mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Guillermo Mejía Aguilar, Doctor en Ingeniería de la Construcción.

ABSTRACT

TITLE: METHODOLOGICAL GUIDE FOR THE IMPLEMENTATION OF AACE RECOMMENDED PRACTICE 57R-09: INTEGRATED COST AND SCHEDULE RISKS ANALYSIS USING RISK DRIVERS AND MONTE CARLO SIMULATION OF A CPM MODEL *

AUTHORS: JOSÉ LUIS ACOSTA BAYONA, CAMILO ANDRÉS PÉREZ PEÑA**

KEY WORDS: AACE 57R-09, SCHEDULE, COSTS, INTEGRATION, MONTE CARLO, RISK.

DESCRIPTION:

The monograph consists of the application of the recommended practice 57R-09 of the AACE (Association for the Advancement of Cost Engineering), in a project developed by a real estate company, where the aim is to determine the risks present in the project for each of the activities and their respective impact on the costs and times of the project. Risk identification and management tools will be implemented by means of Monte Carlo simulation (MCS) and risk factors, which will allow a better control of the risks present in the development of the costs and times of the project. Making a comparative that shows the difference between using the best practices recommended by the AACE and the way in which this type of projects are currently developed.

In the following document a diagnosis will be made of the current way of managing the risks present in the company's projects by simulating the impact on the time and costs of a CPM model, it seeks to identify the shortcomings in order to present a solution and that risk management is developed appropriately, minimizing the impact of the same in the proper development of the project.

* Monograph

**Facultad de Ingenierías Físico – mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Guillermo Mejía Aguilar, Doctor en Ingeniería de la Construcción.

INTRODUCCION

En el sector de la construcción en Colombia se han presentado falencias en la ejecución de proyectos, un ejemplo son aquellos que se han desarrollado en el sector público y privado, en los cuales se ha evidenciado un aumento en los costos, modificación de alcances y tiempos de ejecución debido a la ineficaz programación y mala gestión de los riesgos presentes en el desarrollo de los proyectos, debido a eso se ve afectada la economía y desarrollo del país lo cual conlleva a problemas sociales y presupuestales. El cambio recurrente en la duración y la secuencia de las actividades de trabajo tiene un impacto significativo en la exactitud del cronograma y los costos planificados de un proyecto de construcción, de ahí la necesidad de determinar la incertidumbre asociada al cronograma y los costos del proyecto. Como método de programación más implementado, el método del camino crítico (CPM) se ha utilizado ampliamente en la industria de la construcción. Sin embargo, el CPM, un método de programación determinista, a menudo no consigue hacer frente a los riesgos del cronograma. Como complemento al CPM, la simulación de Monte Carlo (MCS) permite la incertidumbre en la duración de las actividades de trabajo.

Mediante la guía de la práctica recomendada 57R-09 de la AACE se plantea el análisis integrado de los costos y calendarios del proyecto utilizando los factores de riesgo mediante el uso de la simulación de Monte Carlos de un modelo CPM cargado de recursos en el software SAFRAN RISK®, por lo cual se podrá determinar la afectación directa sobre las actividades el proyecto con el fin de minimizar estos imprevistos y su impacto.

La empresa está enfocada en el sector inmobiliario siendo una compañía posicionada en el sector con cinco años prestando su servicio, actualmente se encuentra en la categoría de pequeña y mediana empresa. Entre sus proyectos está la construcción de locales

comerciales, edificaciones, casas campestres, campamentos petroleros, entre otros. La compañía a pesar de que ha desarrollado numerosos proyectos y que tiene la capacidad de desarrollar proyectos en simultaneo se ha dado cuenta que los márgenes de ganancia inicialmente planteados no son los mismo que se dan al culminar el proyecto, un comportamiento en común que se ha presentado en estos proyectos mencionados es la cantidad de imprevistos que han generado modificaciones a lo inicialmente planificado; bajo esta situación se dio la pregunta del por qué estos imprevistos no han sido posible tenerlos en cuenta desde el principio y darle una correcta clasificación y/o importancia para su gestión y la necesidad de poder buscar una manera para corregir esta situación, la cual será abordada en esta monografía.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Crear una metodología de análisis de riesgos en los costos y cronogramas de un modelo CPM mediante la simulación de Monte Carlo y los factores de riesgos en una empresa localizada en la ciudad de Bucaramanga, basados en la práctica 57R-09.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar el análisis de riesgos en los costos y cronogramas implementado en los proyectos constructivos actuales desarrollados en la empresa.
- Establecer una metodología para el análisis de riesgos en los costos y cronogramas eficiente mediante la simulación de Monte Carlos (MCS) y los factores de riesgo de modelos CPM, la cual brinde una mejora a los desarrollos actuales y futuros proyectos.
- Implementar la metodología de análisis integrado de riesgos propuesta en este documento en un proyecto del sector de la construcción en el territorio colombiano.

1. ALCANCE

De acuerdo al estudio desarrollado para la caracterización de los métodos empleados en la actualidad para el análisis de riesgos en la empresa seleccionada, la cual está localizada en Bucaramanga, Santander, se establece una metodología con un paso a paso que permitan la identificación de los riesgos y sus impacto en los proyectos de tipo privado de acuerdo con la práctica 57R-09, se propone la implementación en un conjunto de actividades críticas las cuales pueden afectar el correcto desarrollo del proyecto.

Conforme a esto se evaluará el resultado final de la estimación de la probabilidad planteada inicialmente para que el proyecto se realice en las fechas previstas de inicio y final, determinaremos los riesgos que provocaron la mayor alteración en los tiempos y costos del proyecto, y evaluaremos la contingencia de costos y plazos necesaria para proporcionar un grado de confianza elegido con el fin de alcanzar ambos objetivos.

2. MARCO TEÓRICO

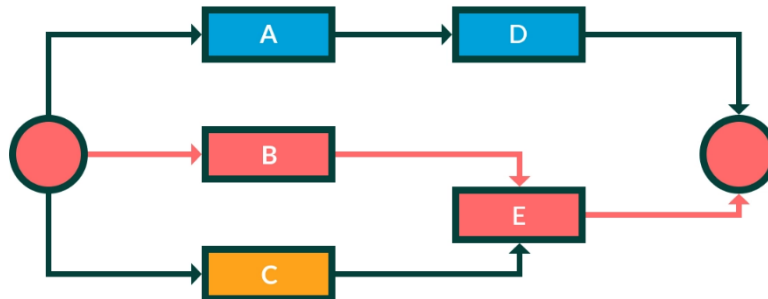
2.1. EL CRONOGRAMA DEL PROYECTO

El cronograma del proyecto es una salida de un modelo de programación que presenta actividades vinculadas con fechas planificadas, duraciones, hitos y recursos. (Project Management Institute, 2017).

2.2. MÉTODO DEL CAMINO CRÍTICO

El método del camino crítico es una técnica de análisis de la red del cronograma, el cual calcula las fechas teóricas de inicio y finalización tempranas, y las fechas de inicio y finalización tardías, para todas las actividades del cronograma sin tener en cuenta ninguna limitación de recursos, realizando un análisis de paso hacia adelante y un análisis de paso hacia atrás a través de las rutas de la red del cronograma del proyecto. Sirve para encontrar el camino que toma más tiempo en un grupo de actividades. (Project Management Institute, 2017).

Figura 1: Método de ruta crítica.



Fuente: (Stsepanets, 2022). [Sitio Web]

2.3. RIESGOS

Un riesgo en proyectos es un evento o condición incierta que, en caso de que ocurra, tiene un efecto positivo o negativo sobre al menos un objetivo del proyecto, llámese tiempo, costo, alcance o calidad. (Project Management Institute, 2017).

2.4. RECOLECCIÓN DE RIESGOS (BASES DE DATOS)

La selección correcta de información y datos específicos para este proyecto con su respectivo análisis es crucial para alimentar los valores debidamente y obtener una simulación más realista de la ocurrencia de estos eventos de riesgos en el proyecto, para esto se contemplan diferentes formas de recopilación de datos.

Los talleres de riesgo consisten en la reunión de expertos en temas de riesgos los cuales analizan, identifican y cuantifican la probabilidad de ocurrencia de riesgos con su respectivo impacto en la duración y costos de las actividades. Es de conocimientos de los participantes que hay riesgos que pueden llevar al incumplimiento contractual por lo que no los mencionan y quedan siendo parte de los “desconocidos” ya sea para no generar conflicto con la dirección o los clientes, o ya sea para no generar represalias por las declaraciones, adicionalmente cosas negativas de estos talleres son el no dar la suficiente importancia a las ideas distintas a la mayoría del grupo o del líder del grupo, como también que la opinión se desvincule del interés de la compañía.

Las entrevistas confidenciales son un medio donde las personas se sienten más seguras para dar las ideas de su análisis de riesgos que se pueden presentar en el proyecto sin recibir algún tipo de represaría de los demás. Este método se caracteriza por compartir la información recolectada con el equipo, pero sin revelar el autor de esta, haciendo que la información compartida sea igualmente atendida por todos los participantes.

La revisión de bases de datos históricos de riesgos materializados de proyectos similares y recientes de la compañía u otras. Esta materialización deja una serie de lecciones aprendidas reales que se aplicaran en los proyectos subsiguientes en la asignación de rangos de probabilidad e incertidumbre de los riesgos. Como forma de aprender de la base de datos de proyectos pasados, un método de análisis basado en la regresión estadística de los excesos en relación con los riesgos sistémicos contribuye a los resultados de la simulación y los comprueba.

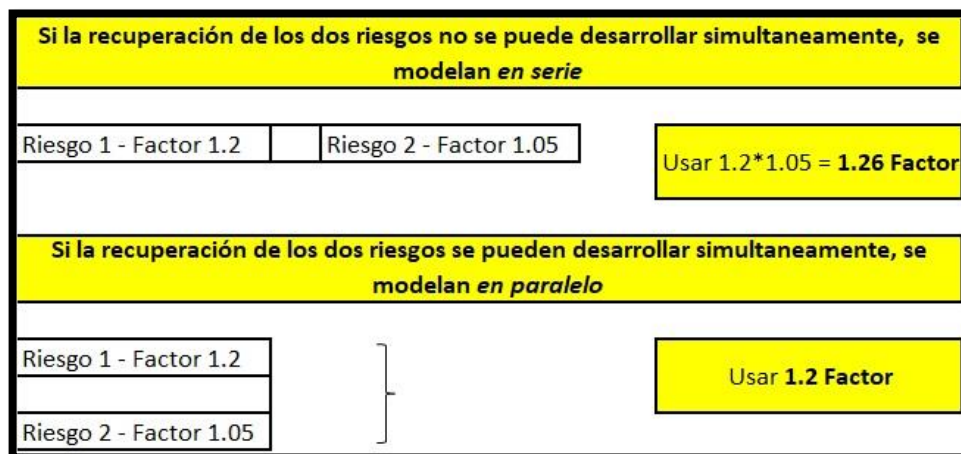
2.5. RIESGOS EN SERIE Y PARALELO

La asignación de los riesgos permite influir en la duración de cada una de las actividades, estos riesgos se pueden modelar en serie o paralelo de acuerdo al comportamiento natural del riesgo y no depende de las actividades a las cuales estén asignados.

- Algunos riesgos se pueden presentar de manera simultánea y pueden afectar en diferente magnitud el desarrollo de las actividades a las que se le asignaron, pero no es indicativo que afecte el tiempo o costo final del proyecto, estos se deben modelar en paralelo.
- Algunos riesgos que se materializan pueden conllevar al desarrollo de nuevos riesgos los cuales siempre van afectar el proyecto en su tiempo y costo, estos se deben modelar en serie.

A continuación, se presenta la asignación de los multiplicadores de duración frente a riesgos que se pueden desarrollar en serie o paralelo.

Figura 2: Riesgos en serie y paralelo.



Fuente: AACE International, 2019

2.6. PROBABILIDAD

Aunque los juegos de azar han abundado en diferentes culturas, el inicio de la teoría matemática de la probabilidad ha sido tardío, sin que haya un acuerdo sobre las razones de este retraso, sugieren que las creencias que ligaron el azar con las ceremonias religiosas o mágicas y la concepción determinista del mundo pueden haber sido una razón para no intentar matematizar estos fenómenos. Lo que es cierto es que la probabilidad, desde su emergencia, ha estado sujeta a diferentes interpretaciones y debates filosóficos que todavía continúan y se relacionan con la concepción y definición del azar en diferentes periodos históricos. Una vez iniciado el cálculo de probabilidades, se han diferenciado dos puntos de vista complementarios: por un lado, la probabilidad trata de medir el grado de creencia personal en la verosimilitud de los sucesos inciertos (perspectiva epistémica); por otro, la probabilidad trata de medir objetivamente esta verosimilitud a partir de datos de experimentos y observaciones (perspectiva estadística). (Gómez Torres et al., 2015).

2.7. MÉTODO DE FACTORES DE RIESGOS

El método del factor de riesgo comienza con un registro de riesgo, explicaremos y demostraremos el método usando:

- Riesgos individuales aplicados a una actividad. Estos riesgos muestran cómo la duración de la actividad reacciona ante riesgos con diferentes supuestos de probabilidad e impacto.
- Actividades con múltiples riesgos aplicados.
- Los factores de riesgo se expresan en la forma tradicional en que describimos los eventos de riesgo, con la probabilidad de que ocurran y el impacto si ocurren.
- La probabilidad de que el factor de riesgo ocurra en este proyecto se evalúa durante las entrevistas (bases de datos). Los riesgos se consideraron importantes durante el proceso de análisis cualitativo de riesgos que produjo el registro de riesgos, por lo que esperamos que cada riesgo tenga una

probabilidad significativa de ocurrir. Las entrevistas comprueban y calibran esta expectativa.

- Impacto en la duración de la actividad si el riesgo ocurre. Este impacto se expresa como un porcentaje de la duración del cronograma de actividades y se utiliza como un factor multiplicativo cuando se aplica a la duración de una actividad.
- También recopilamos información sobre la identidad de las actividades en las que impactan los riesgos, en caso de que ocurran. Esta información es necesaria para la asignación de riesgos a las actividades en el cronograma.
- El factor multiplicativo funciona así: supongamos que un riesgo, digamos que la supervisión de la construcción puede ser escasa, se asigna a una actividad como Columnas con una duración de 100 días. Quizás el rango del factor de riesgo, determinado durante las entrevistas, sea 0.90, 1.00, 1.15, el valor del riesgo puede seleccionarse al azar para que sea 1,05 para una iteración específica. Aplicado a la duración de 100 días tendría una duración de 105 días para esa iteración. Si no ocurre para otra iteración, el factor es 1.0 y la duración del trabajo del sitio es de 100 días. (D. T. Hulett, 2009).
- En el software “Safran Risk” el modelo toma la simulación de impacto de tres puntos.

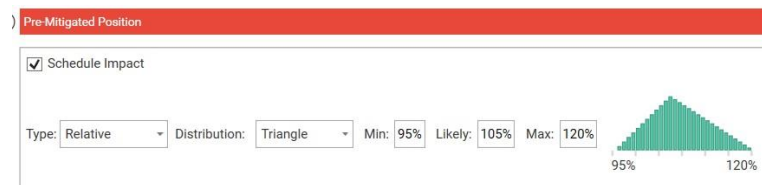
2.8. IMPACTO DE LOS RIEGOS CON 100% PROBABILIDAD

En la figura 3, se ilustra la configuración de un factor de riesgos de un cronograma afectando la actividad A por el riesgo 1.1, el cual tiene una probabilidad de ocurrencia del 100%, puede abarcar los valores mínimos y máximos de acuerdo al factor multiplicativo asignado. Para este caso el factor multiplicador se expresó como una distribución triangular donde se presenta los valores Mínimo, Mas probable y Máximo - los cuales para este caso corresponden al 95%, 105% y 120% respectivamente.

Este riesgo es en realidad una incertidumbre: la existencia de algún valor de la productividad laboral no es incierta, pero su nivel es incierto. (D. T. Hulett, 2009) El impacto puede tomar diferentes valores cuando se aplica a la duración de las

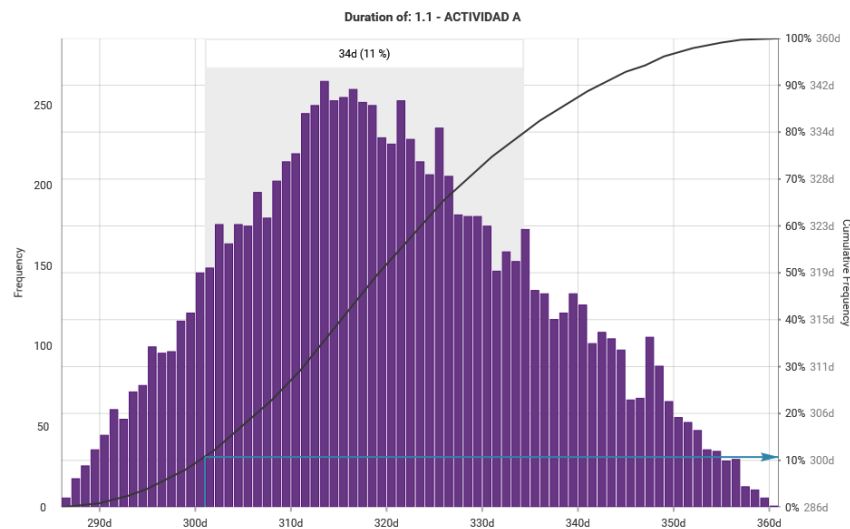
actividades. Es una fortaleza del método del factor de riesgo que puede abarcar riesgos con un 100 por ciento de probabilidad, llamados incertidumbres o ambigüedades, pero un impacto incierto y que el impacto puede ser tanto oportunidades (factor < 100 por ciento) como amenazas (factor > 100 por ciento). En la figura 4, podemos observar el impacto de la materialización del riesgo sobre la actividad A.

Figura 3: Asignación factor 100% probabilidad – Riesgo 1.1.



Fuente: Autor – Safran Risk

Figura 4: Modelado riesgo con 100% probabilidad – Riesgo 1.1



Fuente: Autor – Safran Risk.

2.9. IMPACTO DE LOS RIEGOS CON MENOS DEL 100% PROBABILIDAD

En la Figura 5, el riesgo 1.2, es asignado a la actividad del proyecto con una probabilidad de ocurrencia del 60%, para este caso se presenta una distribución

triangular para determinar el impacto sobre la duración de la actividad con valores mínimos, más probable y máximo de 90, 110 y 140 respectivamente en caso de materializarse el riesgo. De acuerdo a lo anterior y lo mostrado en la Figura 6, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

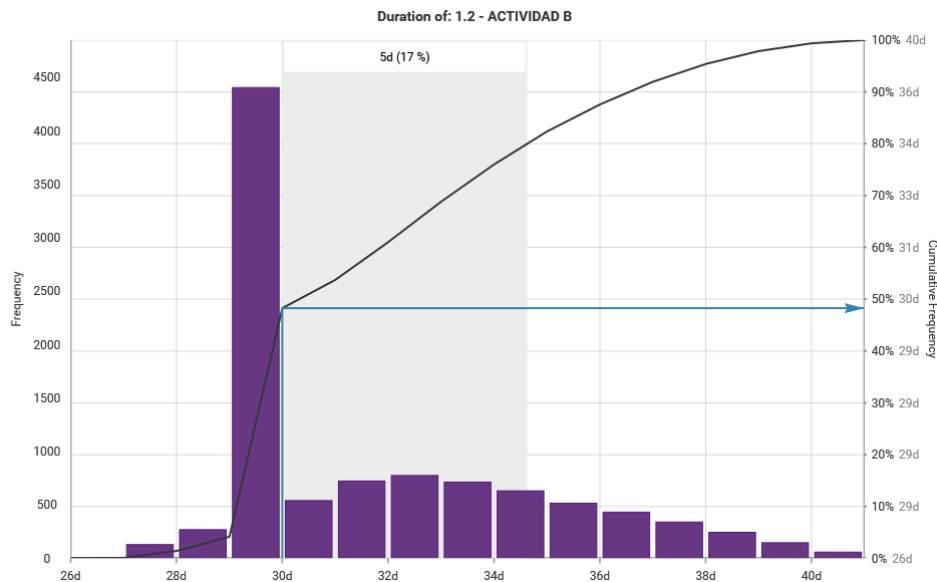
- El 40% de los resultados se corresponden con la duración determinista original de 30 días laborables.
- El 60% restante de los resultados se ve afectado por el Riesgo 106, representado por una gama de duraciones que se extienden formando una distribución triangular.

Figura 5: Asignación factor 60% probabilidad – Riesgo 1.2



Fuente: Autor – Safran Risk

Figura 6: Modelado riesgo con 60% probabilidad – Riesgo 1.2



Fuente: Autor – Safran Risk

2.10. ASIGNACIÓN DE RIESGOS A MÚLTIPLES ACTIVIDADES

A menudo el riesgo se describe a un nivel alto, por lo que puede afectar a múltiples actividades, si relacionamos el impacto del riesgo más común en el desarrollo de proyectos como son las condiciones climáticas de la zona de trabajo, podemos observar que este puede estar asignado a múltiples actividades, esto lo conocemos como riesgo sistémico. En la Figura 7, podemos observar la asignación de riesgos, además de la asignación de un riesgo afectando varias actividades.

Figura 7: Asignación de riesgos a múltiples actividades

Description	Risk-101	Risk-102	Risk-103	Risk-104	Risk-105	Risk-106	Risk-107	Risk-108	Risk-109	Risk-110	Risk-111
Offshore Gas Production Platform	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Milestones and Hammocks	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Decision Making	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Engineering	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Procurement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Procurement of LLE	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Procurement of Other Equipment	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Fabrication	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Drilling	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Installation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
HUC	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Fuente: AACE International, 2019

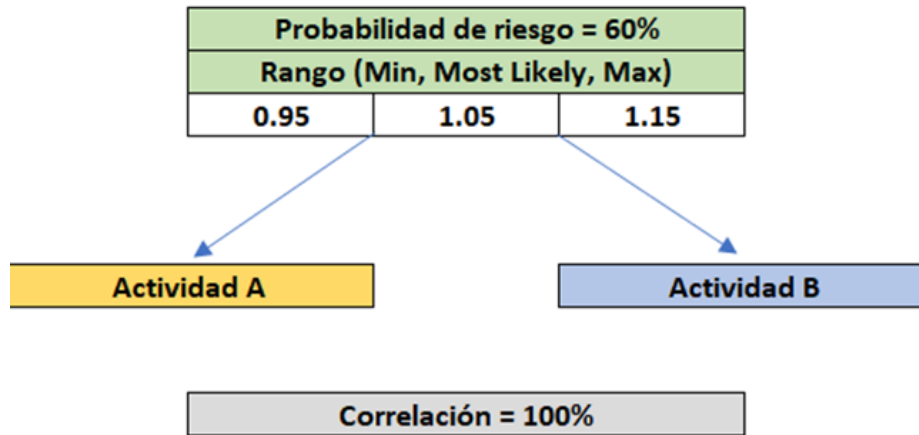
2.11. IMPACTO DE VARIOS RIESGOS SOBRE ACTIVIDADES

Puede ser difícil estimar los coeficientes de correlación entre las duraciones de las actividades en situaciones complejas en las que hay muchos riesgos. Con el método de los factores de riesgo, la correlación entre las duraciones de las actividades se crea automáticamente durante la simulación, evitando tener que estimar o adivinar los coeficientes de correlación.

Las duraciones de las actividades se correlacionan cuando algún factor incierto (es decir, un factor de riesgo) afecta a ambas. Si se modela cómo se genera la correlación, utilizando un riesgo que sea común a ambas actividades, no se producirá una matriz de correlación incoherente. (AACE International, 2019).

Las Figuras 8 y 9, ilustran cómo un riesgo aplicado a dos actividades diferentes hace que estén correlacionadas al 100%.

Figura 8: Correlación de actividades con un riesgo.

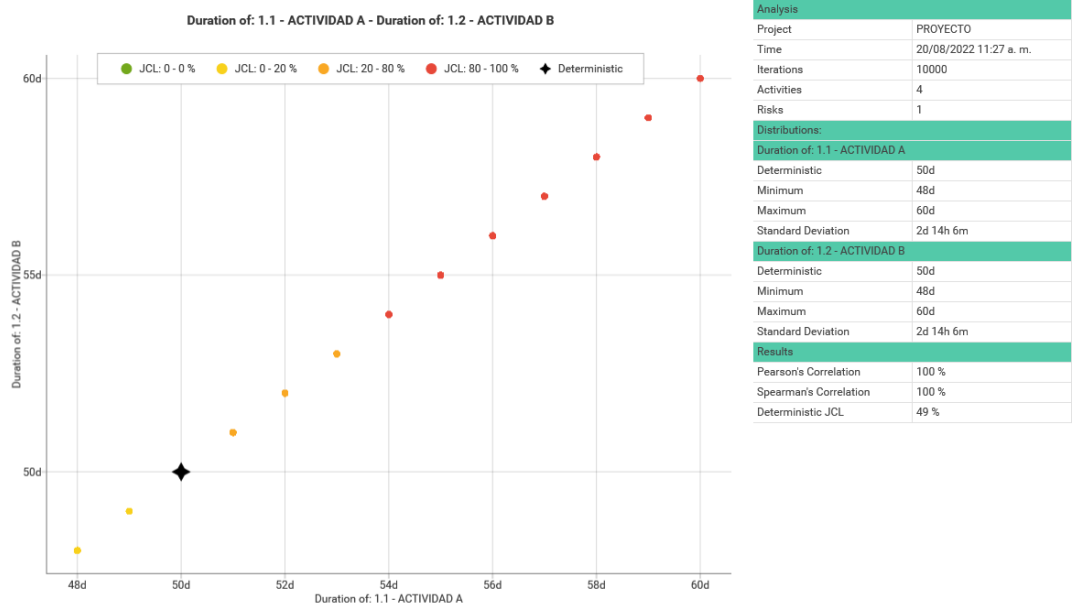


Fuente: Practica AACE 57R-09

Cuando al menos un riesgo adicional afecta a una de las dos actividades correlacionadas, pero no a la otra, la correlación entre las duraciones de estas dos actividades se reduce.

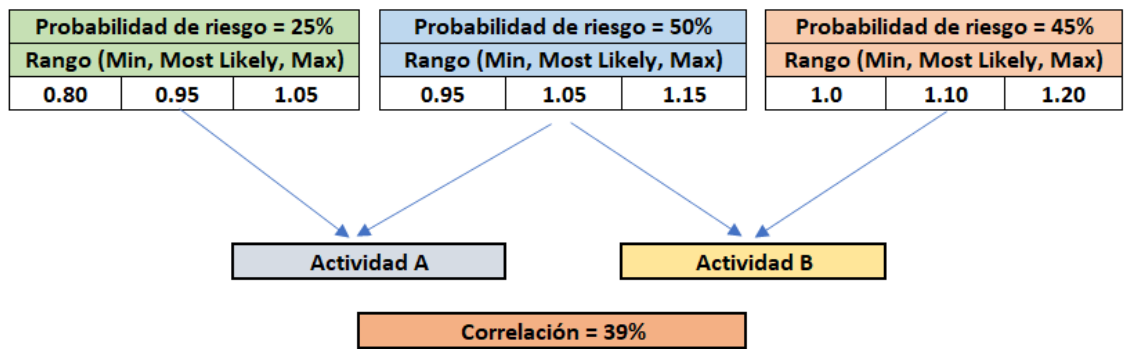
El modelo de la Figura 10 muestra un riesgo común que afecta a dos actividades y otros dos riesgos que afectan a una actividad cada uno. El resultado es un coeficiente de correlación del 39% entre las dos actividades, como se muestra en la Figura 11. Utilizar el modelo libera al analista de tener que adivinar los coeficientes entre las duraciones de muchas actividades. (AACE International, 2019).

Figura 9: Actividades correlacionadas al 100% - Riesgo común



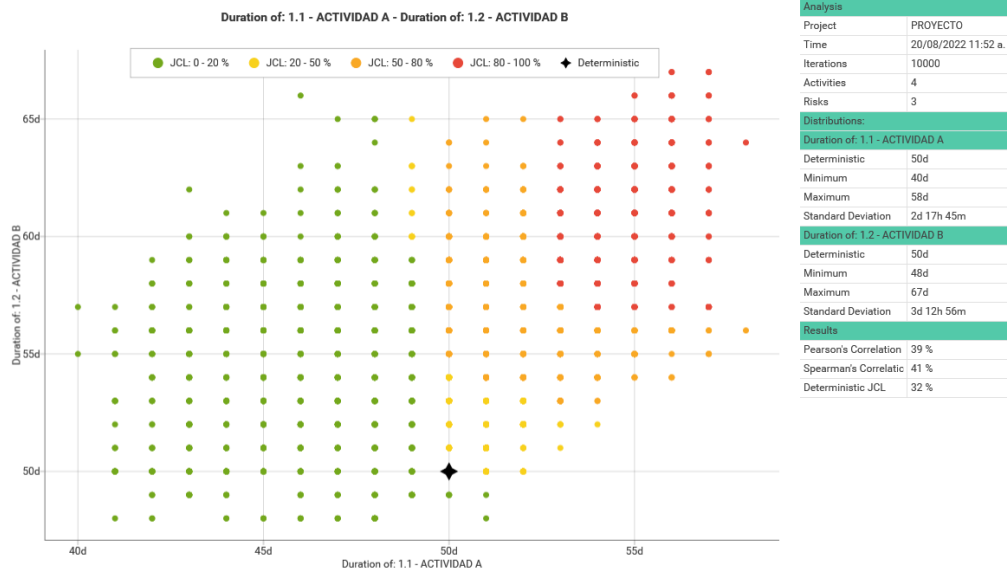
Fuente: Autor – Safran Risk.

Figura 10: Correlación de actividades con múltiples riesgos.



Fuente: AACE International, 2019

Figura 11: Actividades correlacionadas al 39% - Múltiples riesgos



Fuente: Autor – Safran Risk

2.12. SIMULACIÓN DE MONTE CARLO

Como metodología en este documento se implementó la simulación de Monte Carlo (MCS por sus siglas en inglés). Dicha metodología se origina en el trabajo de investigación de Neumann y Ulam en 1949, es una clase de metodología utilizada ampliamente en simulaciones por computadora, su funcionamiento corresponde en generar un número (grande pero finito) de puntos aleatorios que se distribuyan uniformemente dentro del dominio de interés (de acuerdo a la media y desviación del ejemplo a estudiar), las evaluaciones para cada proceso son representadas mediante la probabilidad de falla del grupo de variables generadas (Xin-She, Yang, 2010).

2.13. FONDOS DE CONTINGENCIA

Son para el caso de materialización de un riesgo. Es imprescindible dotar adecuadamente los fondos de provisiones de contingencia, para estimar con

precisión el costo del proyecto y proteger el beneficio asignado hacia él. Si no se materializan, estos fondos irían a engrosar los beneficios del proyecto. (Ocaña, 2013)

En función de la naturaleza del riesgo que lleve asociado la contingencia podemos encontrarnos con:

2.13.1. Contingencias Derivadas Del Análisis De Riesgos Del Proyecto. Son aquellos eventos de carácter imprevisibles (no se puede asegurar su ocurrencia), que pueden ser identificados mediante un análisis de riesgos del proyecto. (Ocaña, 2013)

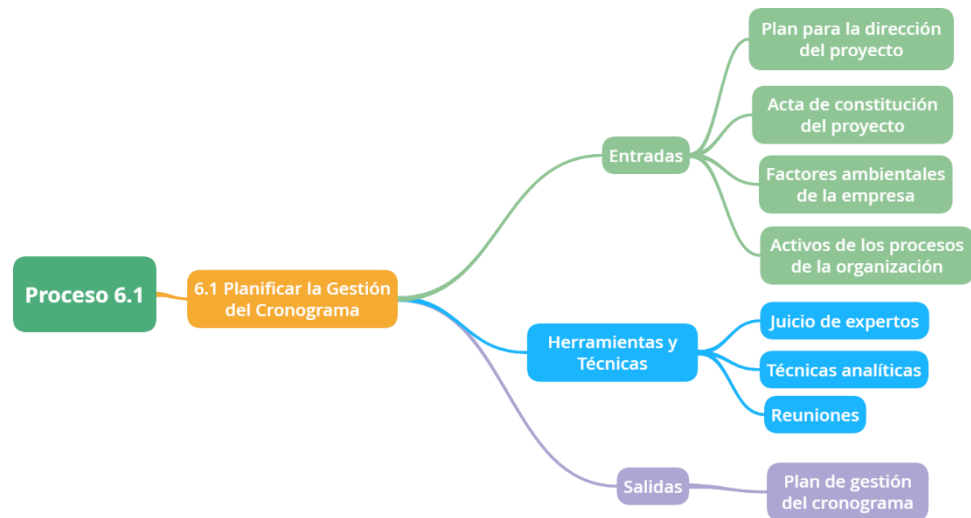
2.13.2. Contingencia De Crecimiento De Costos. Serían las provisiones de gastos para determinadas actividades o componentes del EDT que habrán de ser desarrollados, y que, a día de hoy, no disponemos de suficiente información para hacer su estimación.

Este costo normalmente se incurre en el cuándo se tiene suficiente información. Su imprevisibilidad es menor que en la contingencia derivadas del análisis de riesgos del proyecto. (Ocaña, 2013)

2.14. PROCESO DE GESTIÓN DEL TIEMPO DEL PROYECTO

Contiene los procesos de dirección de proyectos necesarios para estudiar y establecer que tiempo es necesario para garantizar que el proyecto posea un plazo viable para ejecutar la entrega del resultado esperado del proyecto. (Avilez, 2019)

Figura 12: Proceso de gestión del cronograma



Fuente: Avilez, 2019 [Sitio Web]

El objetivo principal es buscar definir y determinar el mejor plazo y calendario posible para el proyecto. Establecemos también la forma en la que controlaremos que el proyecto se complete dentro de los límites aprobados. (Avilez, 2019)

2.15. DIAGNÓSTICO DE LA EMPRESA

En la actualidad la empresa inmobiliaria realiza un proceso casi nulo para el análisis de riesgo de los proyectos los cuales desarrolla, siendo esta una gran oportunidad de mejora para los procesos de gestión de los proyectos.

3. METODOLOGIA

Para cumplir con el objetivo principal de estudio del proyecto planteado el cual consiste en evaluar la aplicabilidad de la práctica recomendada por AACE (57R-09) en los procesos internos de gestión de riesgos de proyectos de construcción, se presenta la metodología propuesta en el diagrama de procesos de la Figura 13, para un análisis de riesgos de los costos y cronograma de un modelo CPM mediante la asignación de factores de riesgos y la simulación de Monte Carlo (MCS).

Figura 13: Diagrama flujo – Análisis de riesgos integrado

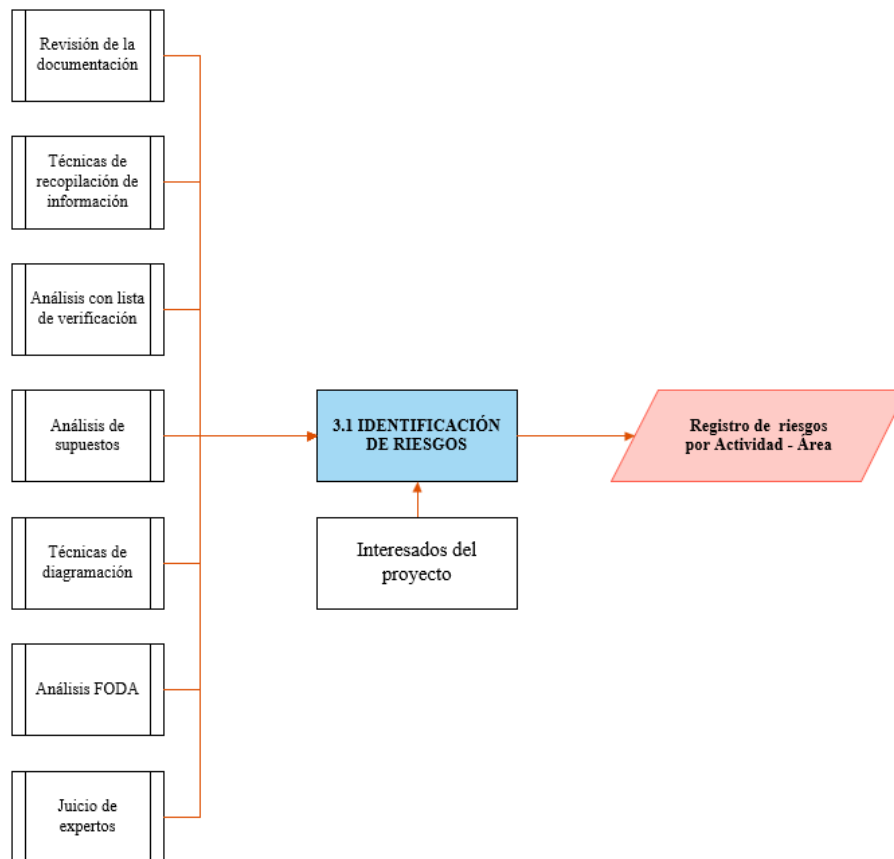


Fuente: Autor

3.1. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

Es un proceso iterativo, constante y que evoluciona a medida que se desarrolla el proyecto, el cual corresponde el determinar, analizar y documentar los riesgos que pueden afectar el desarrollo en el proyecto, esto se debe realizar involucrando todos los interesados del proyecto y a lo largo del ciclo de vida del mismo con el fin de asignarlo en el modelo CPM para que el equipo de trabajo pueda anticiparse ante los posibles eventos si se materializan mediante el análisis de factores de riesgos en una simulación de Monter Carlo. En la figura 14, se pueden observar las entradas, herramientas y técnicas, y salidas de este proceso.

Figura 14: Identificación de riesgos



Fuente: Autor

3.2. ASIGNACIÓN DE RIESGOS EN MODELO CPM

Para este proceso se realiza la asignación de riesgos a las actividades en el modelo del camino crítico (CPM) de estudio, de acuerdo al registro de riesgos por actividad – área desarrollada por el grupo de desarrollo del proyecto. Como salida se obtendrá el modelo CPM cargado con los riesgos para cada una de las actividades del cronograma como se muestra en la Figura 15.

Figura 15: Asignación de riesgos en modelo CPM

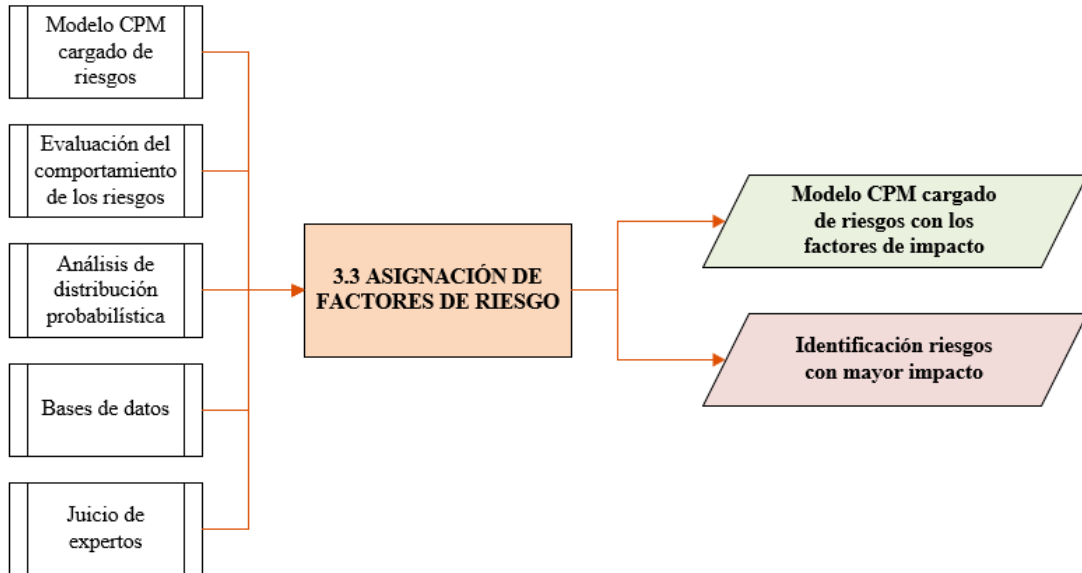


Fuente: Autor

3.3. ASIGNACIÓN DE FACTORES DE RIESGO

Para este proceso se asigna a cada uno de los riesgos la probabilidad de ocurrencia y el factor de riesgo (multiplicativo) del modelo CPM cargado de riesgos, esto de acuerdo al tipo de distribución probabilística asignada a cada riesgo, conforme a lo anterior el juicio de expertos y las bases de datos de las cuales se tenga disponibilidad es de gran importancia en caso de materializarse el riesgo, la asignación de los valores mínimos y máximos que pueda tomar la duración y/o costo de la actividad, en la Figura 16 podemos observar el proceso de asignación de factores.

Figura 16: Asignación de factores de riesgo



Fuente: Autor

3.4. ANÁLISIS DE RIESGO INTEGRADO

Es el proceso de priorizar riesgos para el análisis o acción posterior, y compaginando la probabilidad de ocurrencia y el impacto de los riesgos sobre los objetivos del proyecto, como beneficio para el correcto análisis del proyecto es que se genera información cuantitativa y cualitativa que permite a la dirección del proyecto minimizar el nivel de incertidumbre y concentrarse en los riesgos de alta prioridad, en la Figura 17 podemos observar el proceso para el análisis del riesgo integrado.

Inicialmente cuando se cuenta con los datos suficientes para realizar modelos adecuados se procede a realizar el análisis cualitativo de riesgos identificados a través de la probabilidad relativa de ocurrencia, los cuales se evalúa la importancia de su impacto respecto a los objetivos del proyecto si estos riesgos llegaran a materializarse, como también los plazos de respuesta y la tolerancia a los mismos por parte de la dirección con respecto a las restricciones del proyecto en sus límites

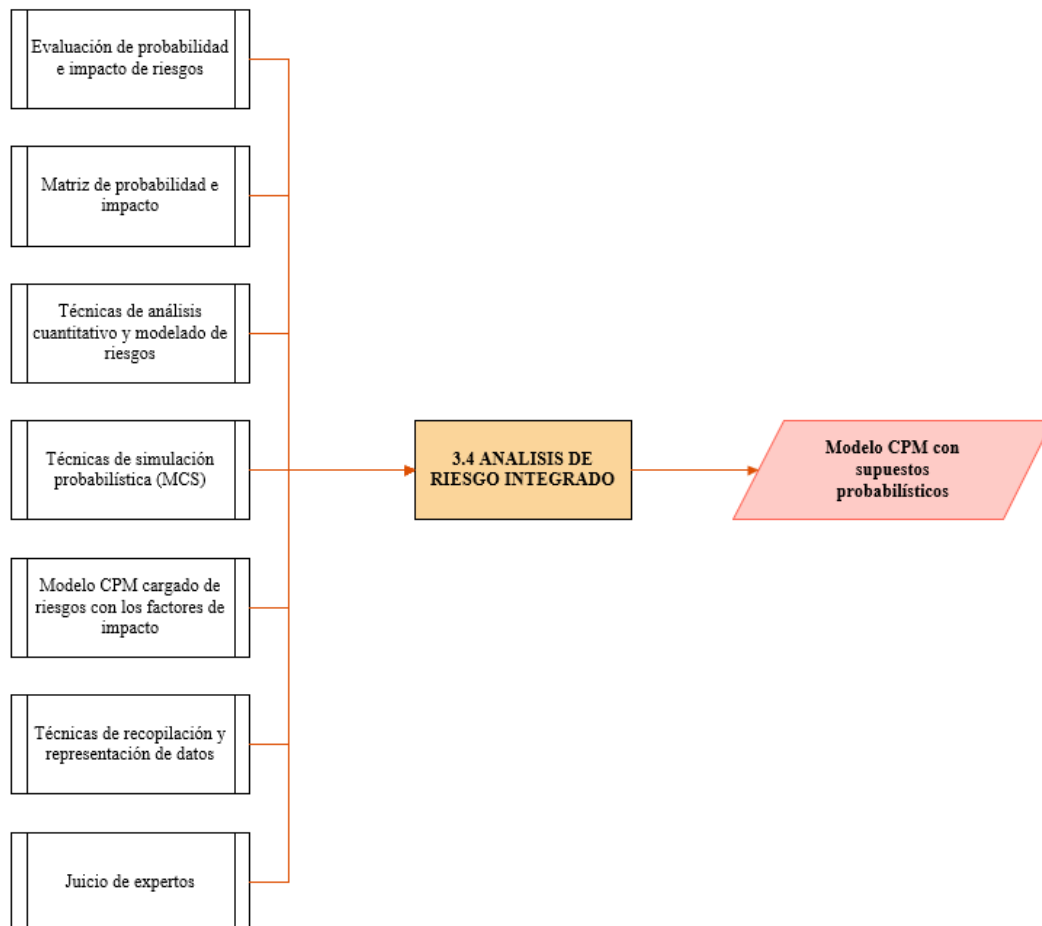
de alcance, cronograma, calidad y costo. Este análisis se puede realizar de manera regular a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

Para que esta evaluación sea eficaz se requiere la identificación clara y la gestión de las perspectivas frente al riesgo por parte de los interesados en el ámbito del proceso. Estas perspectivas del riesgo introducen sesgos en la evaluación de estos, por lo cual se debe prestar atención a estos sesgos para su corrección, una manera para reducir la influencia de estos es definiendo niveles de probabilidad e impacto de los riesgos en el proyecto y otra es la evaluación de la calidad de información que se tiene de estos riesgos.

Posteriormente según la necesidad y la viabilidad dada por el juicio de expertos se realiza el análisis cuantitativo de riesgos el cual se ejecuta a los riesgos priorizados en el análisis anterior por tener un posible mayor impacto sobre las necesidades concurrentes del proyecto. El fin de este análisis es para evaluar el efecto acumulativo de todos los riesgos que afectan el proyecto, en este proceso se puede asignar a esos riesgos una prioridad numérica individual.

Para establecer si se ha reducido el riesgo global del proyecto y controlar, se debe repetir el análisis cuantitativo según las necesidades, y a partir de estos resultados nos indica si se necesita un mayor o menor cuidado de las actividades.

Figura 17: Análisis de riesgo integrado



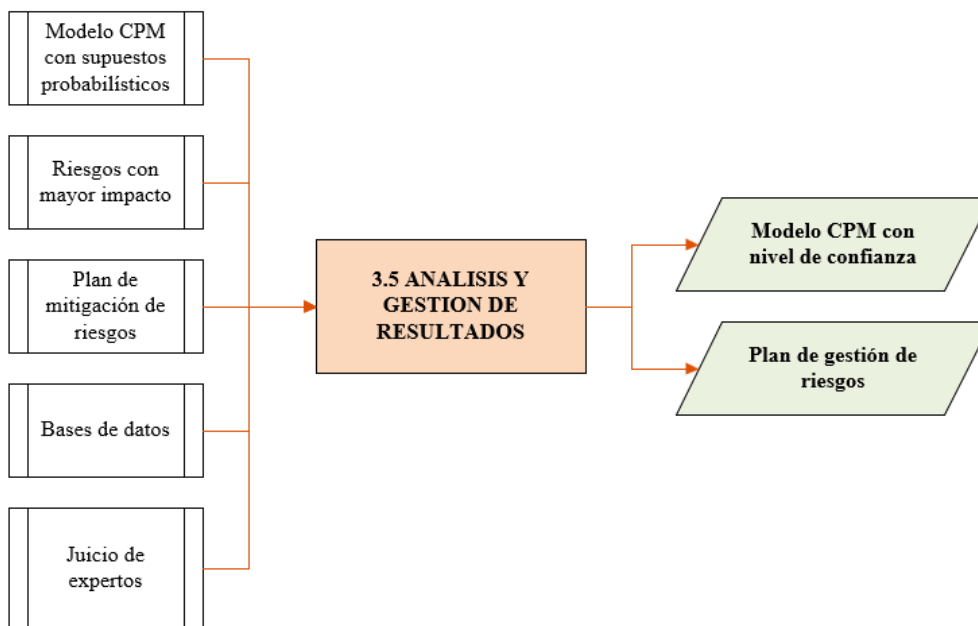
Fuente: Autor

3.5. ANÁLISIS Y GESTIÓN DE RESULTADOS

Para el desarrollo de este proceso se busca implementar acciones para mejorar las oportunidades y mitigar el impacto de las amenazas, esto con respecto al modelo CPM obtenido en el proceso anterior, con el objetivo de atacar los riesgos que pueden afectar con mayor probabilidad y efecto el correcto desarrollo del proyecto, dentro de este proceso se busca implementar planes de respuesta a los riesgos identificados con el fin de mitigarlos, controlarlos y/o eliminarlos.

En el proceso de control de riesgos se implementa los planes de respuesta, seguimiento de los riesgos ya identificados, vigilar los riesgos nuevos y evaluar en el proyecto la gestión de los riesgos, con esta evaluación se implementa mejoras continuas durante el proyecto de la forma en que se lleva gestionando los riesgos, es importante que en el seguimiento de gestión de los riesgos ir evaluando el plan para sus respectivas evaluaciones y/o modificaciones. Mediante la información que se va recolectando en la ejecución del proyecto se realiza el análisis de variación y de tendencias que aporta a las decisiones de control, como parte importante se debe ir evaluando si las condiciones iniciales tomadas por ejemplo en los supuestos, procedimientos de gestión, condiciones de manifestación de los riesgos y nuestras reservas de contingencia de costo o cronograma, continúan o han sufrido variaciones. En la figura 18 podemos observar el diagrama de procesos para el análisis y gestión de resultados.

Figura 18: Análisis y gestión de resultados



Fuente: Autor

4. CASO DE ESTUDIO

Con el objetivo de mejorar los procesos para el análisis de riesgos y dar claridad a los conceptos expuestos, se busca implementar la metodología anteriormente mencionada, se realizará el respectivo análisis de riesgo integrado de costos y cronograma de un modelo CPM mediante el uso de factores de riesgo y la simulación de monte Carlos en el programa Safran Risk ®.

El proyecto elegido para la implementación de la metodología es el proyecto con código interno CS – 002 el cual tiene por objeto la PAVIMENTACIÓN EN CONCRETO RIGIDO UN TRAMO DE 250 METROS LINEALES EN LA VIA DE ACCESO DEL CAMPAMENTO PRETOLERO CAÑO SUR, este proyecto tiene un presupuesto oficial de trescientos once millones setecientos veinticuatro mil veinticinco pesos (\$ 311.724.025 MCTE), y un plazo de ejecución de 47 días calendario (41 días hábiles) contados a partir de la suscripción del acta de inicio.

El análisis de los riesgos del proyecto se realizará desde la perspectiva de la entidad contratista, es decir, se realizará el análisis integrado de los costos y cronograma con el objetivo de mitigar el impacto de los riesgos para el correcto desarrollo del proyecto.

En la figura 19 se puede observar el cronograma cargado de recursos, tiempos de inicio y final de las actividades y proyecto, duraciones, costos por actividades, diagrama de Gantt y la ruta crítica del proyecto.

Tabla 1. Matriz de Identificación de Riesgos.

Cód. Riesgo	Categoría de Riesgo (RBS)	Descripción del Riesgo (Evento)	Referencia	Causas	Consecuencias
1	Cronograma y Costos	Incertidumbre del cronograma y costo	Cronograma y Presupuesto	Variabilidad inherente a la duración y costos de las actividades del proyecto	Variación del tiempo y costos de ejecución de las actividades.
2	Condiciones climáticas	Difícil acceso al punto de obra.	Cronograma	Temporadas de lluvia, inestabilidad en las vías generando caída de material sobre las mismas o la pérdida de banca.	Costos y tiempos de ejecución de la obra por encima del presupuesto
3	Recursos	Falta de mano de obra calificada y no calificada.	RACI	La exigencia de la comunidad beneficiaria y aledaña a la zona de trabajo exigen contratación de personal de la zona para generar un	Costos y tiempos de ejecución de la obra por encima del presupuesto, además de posibles afectaciones a la calidad

				crecimiento económico, así mismo se puede presentar escases del personal requerido para el desarrollo del proyecto	general del proyecto.
4	Planificación	Mala disposición de los residuos de obra.	Plan Manejo del Proyecto	Contaminación por los residuos generados en la ejecución del proyecto.	Costos y tiempos de ejecución de la obra por encima del presupuesto, sanciones por entidades ambientales.
5	Calidad	Etapa ejecución operacional - Cuando los bienes entregados no cuentan con la calidad ni la cantidad estipulada.	Alcance	Procesos de coordinación poco efectivos.	Costos y tiempos de ejecución de la obra que varía del presupuesto, además de posibles cambios en el alcance inicial del proyecto.
6	Planificación	Etapa Ejecución operacional - Aprobación tardía de terceros involucrados con el	Plan Manejo del Proyecto	Falta de idoneidad o experiencia por parte del gestor de la necesidad de la entidad contratante.	Costos y tiempos de ejecución de la obra por encima del presupuesto.

		desarrollo y/o inicio del contrato tales como entidades ambientales, tránsito, entre otros.			
7	Condiciones climáticas	Cambios climáticos constantes.	Cronograma	Por diferentes condiciones antrópicas y calentamiento global puedan generar una variación en las temporadas de invierno y verano	Costos y tiempos de ejecución de la obra por encima del presupuesto, además de posibles afectaciones a la calidad general del proyecto.
8	Subcontratistas y/o proveedores	Escasez de material y/o proveedores para la ejecución de la obra.	Plan de gestión de Adquisiciones	Por la ubicación de las obras y que simultáneamente se estén ejecutando otro tipo de obras	Costos y tiempos de ejecución de la obra por encima del presupuesto, además de posibles cambios en el alcance inicial del proyecto.
9	Externo	Delincuencia común.	Plan de gestión de riesgos	Por la ubicación en retirada y en zona rural se puedan robar, extorsiones y secuestros al	Costos y tiempos de ejecución de la obra por encima del presupuesto

				personal y a los materiales y/o equipos.	
10	Externo	Afectación en el desarrollo del proyecto a causa de huelgas, asonadas, paro general de trabajadores o de transporte, situaciones de orden público o comunidad que no esté de acuerdo con la ejecución del proyecto.	Cronograma	Inconformismo por la comunidad no beneficiada, bloqueos en vías primaria y/o secundarias por las diferentes situaciones de orden nacional.	Costos y tiempos de ejecución de la obra por encima del presupuesto, además de posibles afectaciones a la calidad general del proyecto.

Fuente: Autor

4.2. ASIGNACIÓN DE RIESGOS EN MODELO CPM – PROYECTO

Para este proceso se realiza la asignación de riesgos a las actividades en el modelo del camino crítico (CPM) de estudio, de acuerdo al registro de riesgos por actividad – área desarrollada por el grupo de desarrollo del proyecto. En la Tabla 2 se muestra la creación de los riesgos planteados en la sección anterior y en la Figura 20 se puede observar la asignación de los riesgos a cada una de las actividades que comprenden el cronograma del proyecto.

Tabla 2. Riesgos – Safran Risk ®

Id	Descripción	Tipo
Riesgo 1	Incertidumbre del cronograma y costo	Estimate Uncertainty
Riesgo 2	Difícil acceso al punto de obra	Standard
Riesgos 3	Falta de mano de obra calificada y no calificada	Standard
Riesgo 4	Mala disposición de los residuos de obra	Standard
Riesgo 5	Etapa ejecución: Calidad y cantidad de obra estipulada	Standard
Riesgo 6	Etapa ejecución: Aprobación tardía de documentación	Standard
Riesgo 7	Cambios climáticos constantes	Standard
Riesgo 8	Escasez de material y/o proveedores	Standard
Riesgo 9	Delincuencia común	Standard
Riesgo 10	Huelgas, asonadas, paros de trabajadores - transporte	Standard

Fuente: Autor

Figura 20: Asignación de riesgos en Safran Risk ®

Id	Description	None		Riesgo 1 - Riesgo 10										
		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
▲ - 0	VIA EN CONCRETO RIGIDO (250 Metros Lineales)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
◆ 0	INICIO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
▲ - 1	PRELIMINARES	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
▢ 1.1	CAMPAMENTO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
▢ 1.2	MEDICIÓN, LOCALIZACIÓN Y REPLANTEO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
▢ 1.3	DESCAPOTE	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
▲ - 2	SEÑALIZACIÓN	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
▢ 2.1	VALLA DE INFORMACIÓN	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
▢ 2.2	SEÑALIZACIÓN PROVISIONAL	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
▲ - 3	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RIGIDO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
▢ 3.1	COMPACTACIÓN DEL TERRENO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
▢ 3.2	CONFORMACIÓN CALZADA	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
▢ 3.3	ESTRUCTURA GRANULAR-SUBBASE	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
▢ 3.4	LOSA DE CONCRETO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
▢ 3.5	BORDILLO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
▢ 3.6	ZANJA DRENANTE	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
▢ 3.7	CUNETA	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
◆ 0	FIN	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fuente: Autor – Safran Risk ®

4.3. ASIGNACIÓN DE FACTORES DE RIESGO – PROYECTO

Para este proceso se asigna a cada uno de los riesgos la probabilidad de ocurrencia y el factor de riesgo (multiplicativo) del modelo CPM cargado de riesgos, teniendo en cuenta el tipo de distribución probabilístico utilizado para el análisis, que en el caso del proyecto de estudio se trabaja una distribución Triangular, conforme a lo anterior el juicio de expertos y las bases de datos de las cuales se tenga disponibilidad es de gran importancia en caso de materializarse el riesgo.

En la Tabla 3 podemos observar la asignación de la probabilidad, distribución e impacto para cada uno de los riesgos evaluados en este proyecto, así mismo en la Figura 21 y 22 se muestran los riesgos de la estimación de la incertidumbre (Riesgo 1) y los cambios climáticos contantes (Riesgo 7) como ejemplos de la asignación en el programa Safran Risk ®.

Tabla 3. Matriz probabilística de riesgos

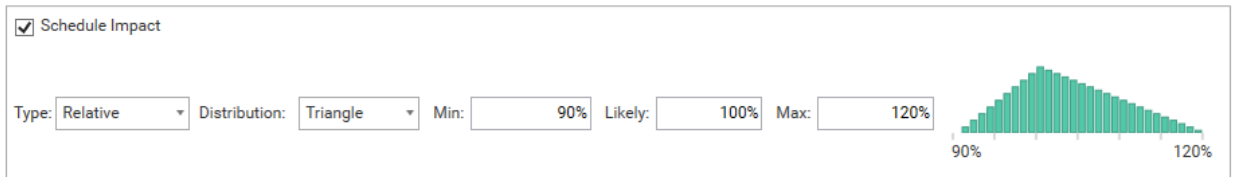
Cód Ries	Descripción del Riesgo (Evento)	Tipo riesgo	Prob	Distr.	Impacto Cronograma			Impacto Costo		
					Min	Mas prob	Máx	Min	Mas prob	Máx
1	Incertidumbre del cronograma y costo	Estimación incertidumbre	100%	Triangular	90%	100%	120 %	90%	100%	130 %
2	Difícil acceso al punto de obra.	Estándar	20%	Triangular	95%	105%	115 %	95%	105%	120 %
3	Falta de mano de obra calificada y no calificada.	Estándar	30%	Triangular	90%	105%	115 %			
4	Mala disposición de los residuos de obra.	Estándar	10%	Triangular				95%	105%	125 %
5	Etapa ejecución operacional - Cuando los bienes entregados no cuentan con la calidad ni la cantidad estipulada.	Estándar	20%	Triangular				90%	110%	130 %

6	Etapa Ejecución operacional - Aprobación tardía de terceros involucrados con el desarrollo y/o inicio del contrato tales como entidades ambientales, tránsito, entre otros.	Estándar	40%	Triangular	95%	105%	140 %			
7	Cambios climáticos constantes.	Estándar	20%	Triangular	90%	105%	115 %	90%	105%	120 %
8	Escasez de material y/o proveedores para la ejecución de la obra.	Estándar	40%	Triangular	95%	105%	120 %	90%	105%	130 %
9	Delincuencia común.	Estándar	10%	Triangular	90%	105%	115 %	95%	105%	120 %
10	Afectación en el desarrollo del proyecto a causa de huelgas, asonadas, paro general de trabajadores o de transporte, situaciones de orden público	Estándar	10%	Triangular	95%	105%	115 %	90%	105%	120 %

	o comunidad que no esté de acuerdo con la ejecución del proyecto.									
--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--

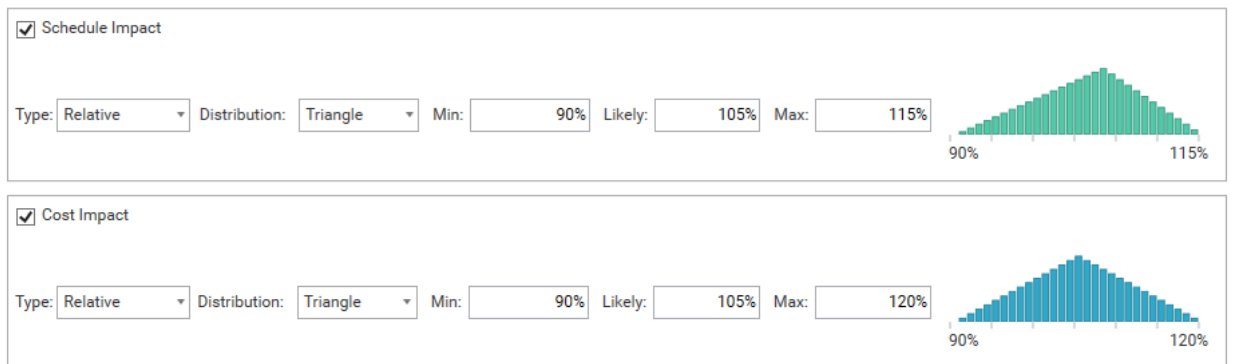
Fuente: Autor

Figura 21: Asignación Factores de riesgo - Riesgo 1 -Safran Risk ®



Fuente: Autor – Safran Risk ®

Figura 22: Asignación Factores de riesgo - Riesgo 7 -Safran Risk ®



Fuente: Autor – Safran Risk ®

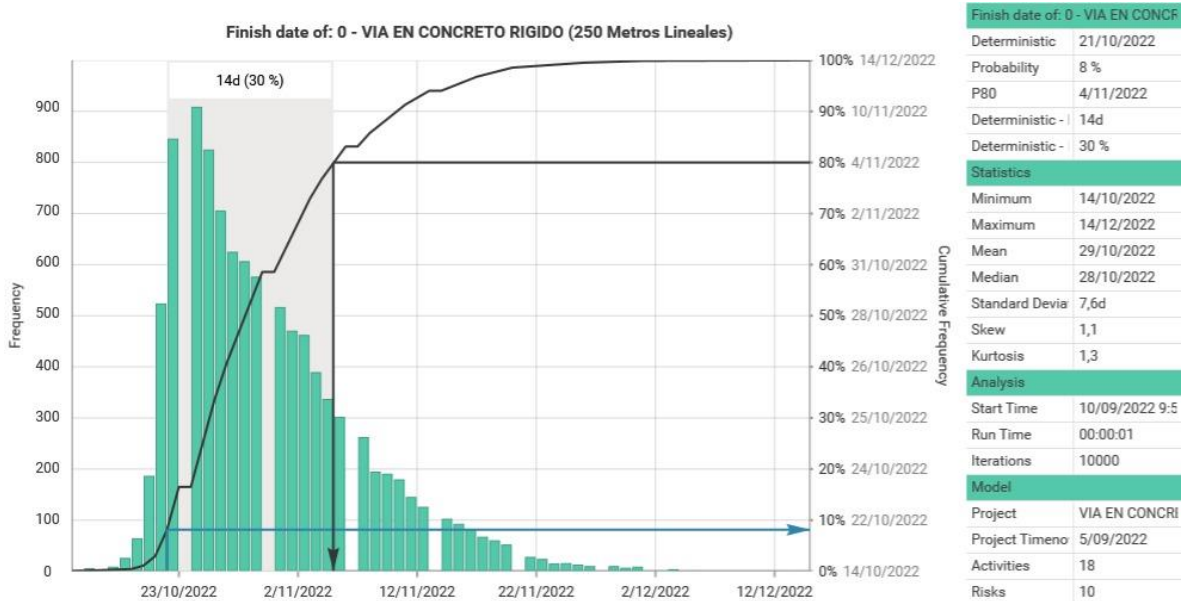
4.4. ANÁLISIS DE RIESGO INTEGRADO – PROYECTO

Corresponde al análisis cualitativo y cuantitativo en el programa Safran Risk ® con respecto al cronograma anterior cargado de recursos, riesgos y factores de riesgo (impacto). Para este caso se utiliza la técnica de simulación de Monte Carlo implícito en el programa, con un número de iteraciones (10.000) considerable con el fin de generar resultados más aproximados de las duraciones y costos del proyecto.

A continuación, se presenta los resultados obtenidos para la duración del proyecto como se puede observar en la Figura 23 en la cual la duración determinista (calculada sin tener en cuenta el impacto de los riesgos) es del 21 de octubre de 2022 con una probabilidad de terminar en la fecha de finalización correspondiente o antes fue del 8%, esto se puede presentar de acuerdo a las siguientes conclusiones:

- La asignación de duraciones se basa en valores optimistas y no contemplan impactos sobre las actividades.
- Por competencia y/o presión de los interesados del proyecto.
- Pocas bases de datos con respecto a la estimación de duraciones y/o costos de las actividades por parte del grupo de trabajo.

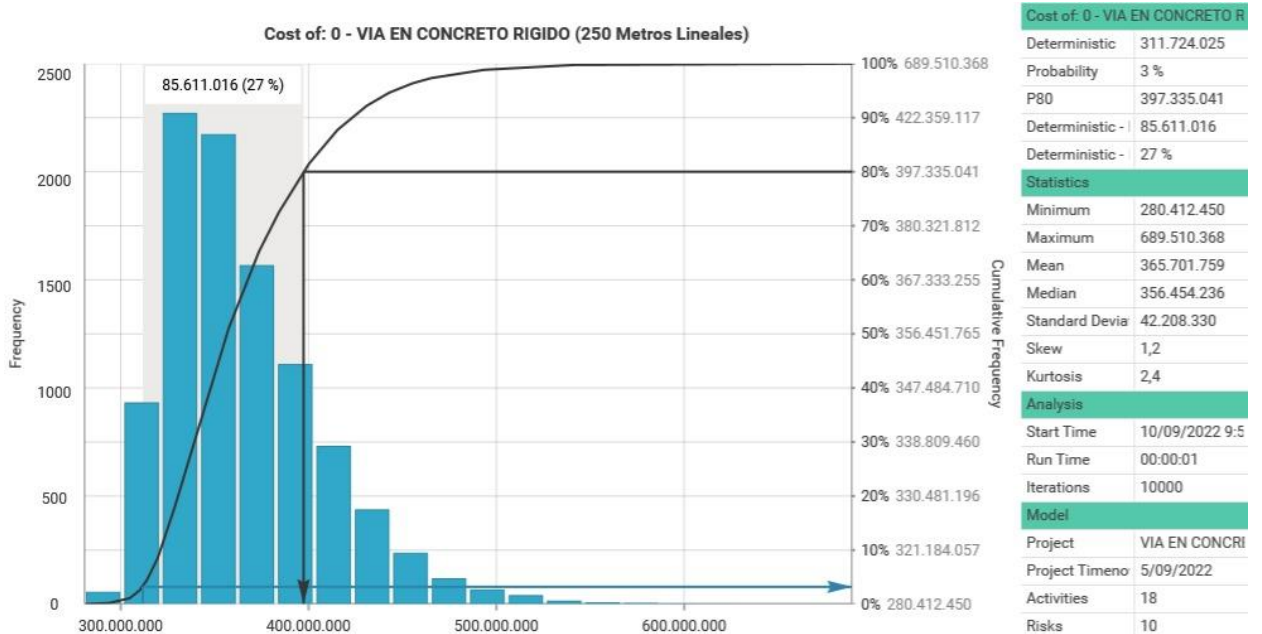
Figura 23: Histograma de distribución de probabilidad de la duración del cronograma y resultados de la curva S - Safran Risk ®



Fuente: Autor – Safran Risk ®

Para los costos del proyecto podemos observar la Figura 24, en la cual se presentará el costo determinista del proyecto es con una probabilidad de realizarse con el presupuesto asignado o con menor valor del 3% (\$ 311.724.025 MCTE), esto debido a múltiples inconsistencias en el momento de determinar el costo unitario de cada actividad del proyecto y la incertidumbre del mismo.

Figura 24: Histograma de distribución de probabilidad del costo del proyecto y resultados de la curva S - Safran Risk ®.

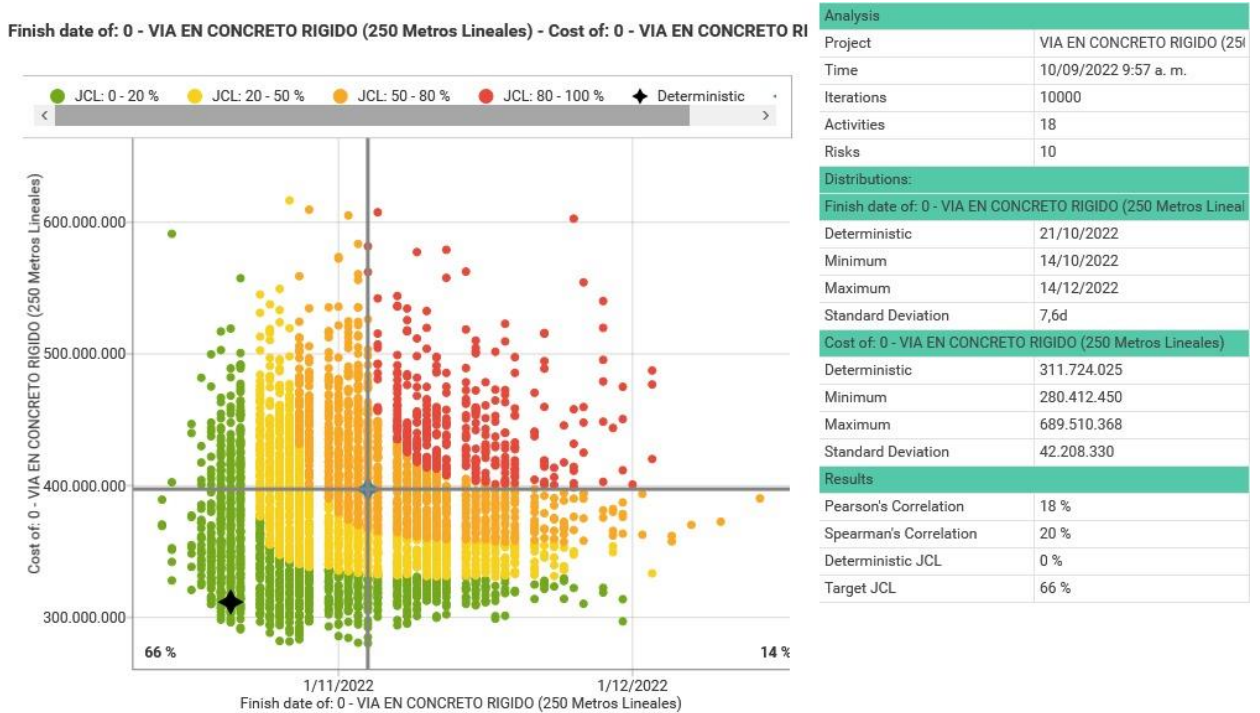


Fuente: Autor – Safran Risk ®

4.4.1 Resultados Con Nivel De Confiabilidad Del 80% - Proyecto

De acuerdo a los resultados obtenidos en las Figuras 23 y 24, se determinan los valores con probabilidad de ocurrencia del 80% para el costo (\$ 397.335.041 MCTE) y la fecha de finalización (04 de noviembre de 2022), en la Figura 25 estos valores se localizan en el diagrama de dispersión de costo y fecha de finalización el cual nos indica que existe una probabilidad del 66% de que los resultados se den en la fecha de finalización P-80 o antes, este comportamiento es debido a que en existen riesgos correlacionados que nos modifican el resultado final de la simulación y resultados que aunque individualmente se presentan con una probabilidad del 80% para la duración, pero no se presentan para un costo de P-80.

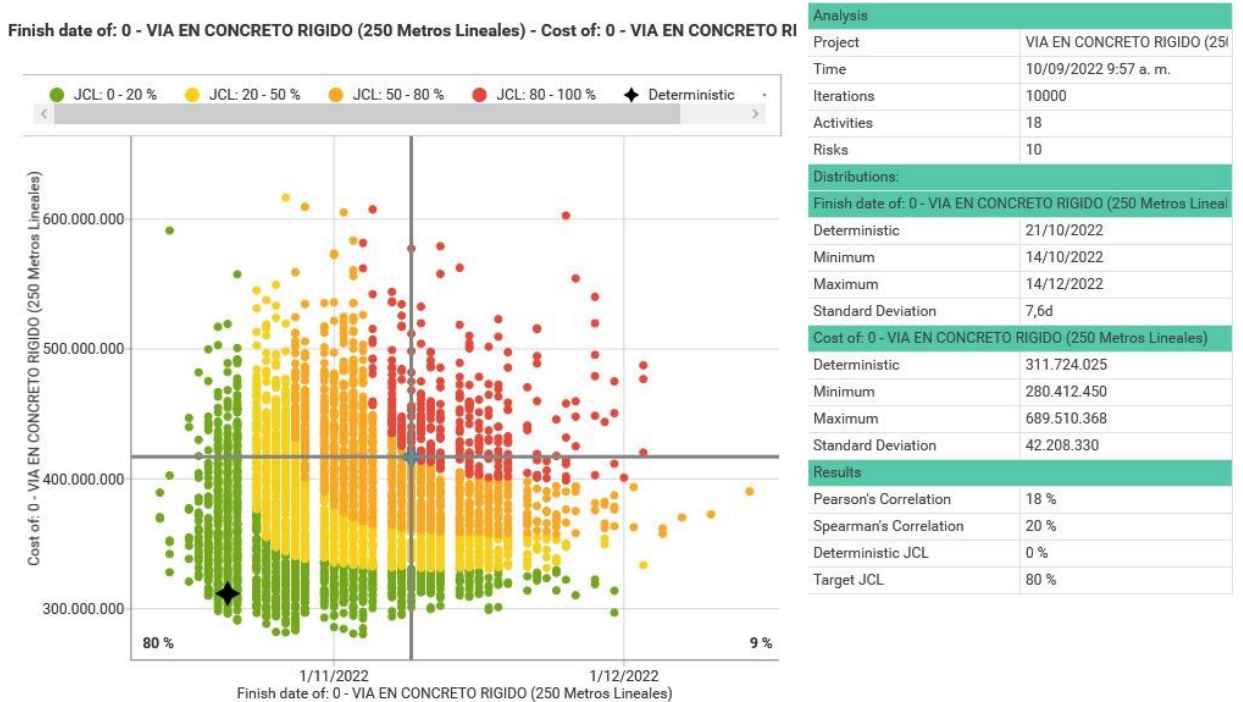
Figura 25: Diagrama de dispersión del costo y fecha de finalización del proyecto con riesgos asignados - Safran Risk ®



Fuente: Autor – Safran Risk ®

Se procede a buscar el par de costo y fecha de finalización P-80 para el proyecto, aunque la práctica de la AACE 57R-09 no presenta un método para encontrarlo, se busca en el diagrama de dispersión la fecha y el costo variando la duración y costo del proyecto, en este caso este par P-80 se presentó para la fecha de finalización 09 de noviembre de 2022 y el costo total del proyecto \$ 417.000.000 MCTE como se puede observar en la figura 26, por lo anterior se puede identificar con un nivel de confianza del 80% una fecha de finalización y costo del proyecto.

Figura 26: Par de costo y fecha de finalización más probable con P-80 - Safran Risk[®]

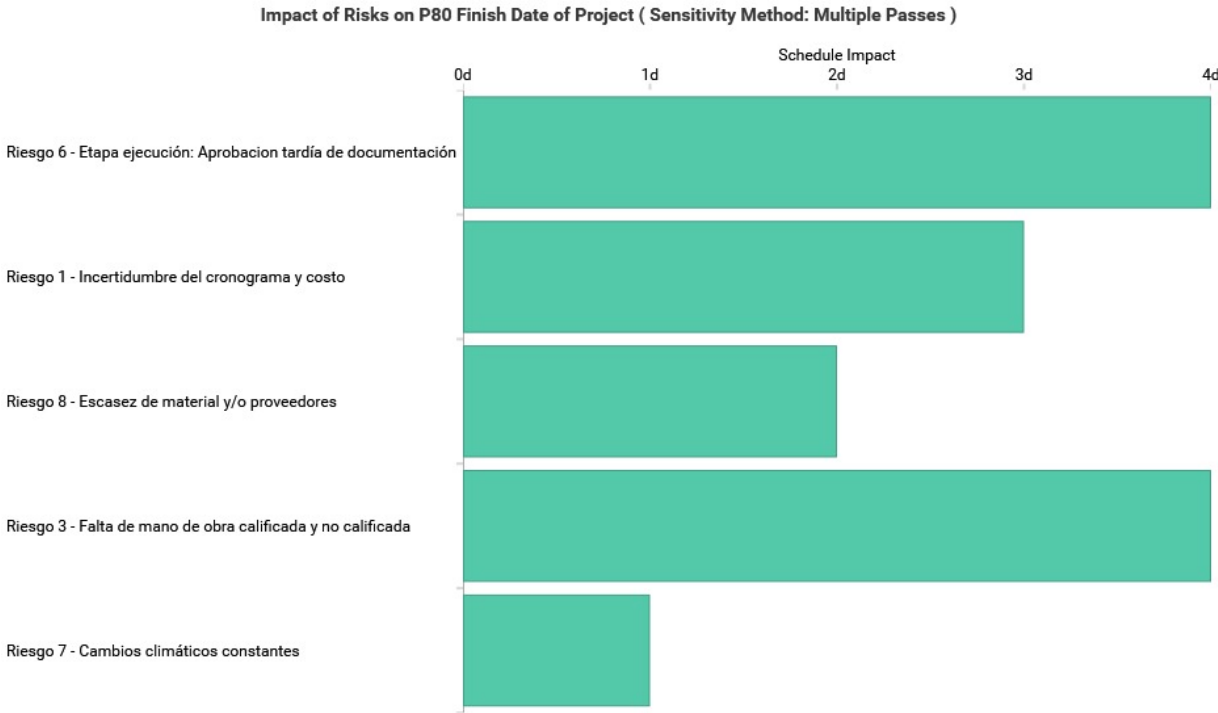


Fuente: Autor – Safran Risk[®]

4.5. ANÁLISIS Y GESTIÓN DE RESULTADOS – PROYECTO

Para generación de planes de acción o gestión de riesgos del proyecto se procede mediante la simulación de Monte Carlo la búsqueda de los riesgos priorizados por el porcentaje de impacto en el proyecto que se muestra en la Figura 27, entre los riesgos priorizados están los identificados con el código de riesgo 6, 3, 8 y 7, con respecto al riesgo con código 1 el cual corresponde a la incertidumbre del cronograma y el costo es un riesgo inherente que es aquel que puede existir de manera intrínseca en toda actividad y que puede generarse por factores internos o externos y no se busca reducir su impacto ya que no se saben las causas. Los riesgos con un menor porcentaje de impacto en el proyecto no se muestran debido a que su impacto no es relevante en nuestra variación de tiempos o costos.

Figura 27: Riesgos priorizados por impacto en el calendario para nivel de confianza P-80 - Safran Risk ®



Fuente: Autor – Safran Risk ®

5. CONCLUSIONES

Mediante la implementación de la práctica de la AACE 57R-09 se busca proveer una guía para la identificación de riesgos y el análisis integrado de los costos y cronograma de un modelo CPM mediante la simulación de Monte Carlo y los factores de riesgo, desarrollado en el programa de simulación Safran Risk ® para el desarrollo de proyectos, de acuerdo a esto se planteó la metodología para el análisis integrado de riesgos desarrollada en el capítulo 4, la cual se pudo subdividir el proceso en cinco pasos explicados al detalle con sus respectivas entradas y salidas.

Con base a la metodología desarrollada, se pudo realizar el proceso de simulación para el proyecto con un cronograma cargado de recursos y riesgos, esto nos permitió identificar los riesgos que se deben priorizar su mitigación, y las fechas de finalización y costos más optimista con un nivel de confianza P-80.

Los procesos con los que actualmente se gestionan los riesgos en la compañía son casi nulos. En estos se pierde información relevante para el desarrollo del proyecto y que puede afectar significativamente el capital de las partes interesadas del proyecto.

Contar en la compañía con una guía para el análisis de riesgos en los proyectos será una muy buena práctica que además de ofrecer una mejor visión de los riesgos a los cuales está sometido un proyecto permitirá tener tiempos y costos intuitivos, así como tener planes de contingencia más robustos para el manejo y gestión de riesgos.

6. REFERENCIAS

AACE International. (2019). Recommended Practice No. 57R-09: Integrated Cost and Schedule Risk Analysis Using Risk Drivers and Monte Carlo Simulation of A CPM Model. AACE International.

Avilez, L. (2019, 14 mayo). ¿QUE ES EL PROCESO DE LA GESTIÓN DEL TIEMPO EN PROYECTOS? Recuperado 10 de septiembre de 2022, de <https://www.linkedin.com/pulse/que-es-el-proceso-de-la-gesti%C3%B3n-del-tiempo-en-proyectos-lilia-avilez>

D. T. Hulett, Practical Schedule Risk Analysis (a partir del capítulo 8), Gower Publishing Limited, 2009.

GÓMEZ TORRES, E., Contreras, J. M., Batanero, C., Universidad Nacional de Colombia & Universidad de Granada. (2015a). SIGNIFICADOS DE LA PROBABILIDAD EN LIBROS DE TEXTO PARA EDUCACIÓN PRIMARIA EN ANDALUCÍA. CORE. <https://core.ac.uk/download/pdf/83544058.pdf>

OCAÑA, J. A. (2013). Gestión de proyectos con mapas mentales. Volumen I. España: Editorial Club Universitario.

Project Management Institute. (2017). A Guide To The Project Management Body Of Knowledge (PMBOK Guide) (6th Ed.). Project Management Institute.

Stsepanets, A. (2022, 5 Julio). Método De La Ruta Crítica En La Administración De Proyectos. Gantt Chart Ganttpro Blog. Recuperado 10 De septiembre De 2022, De <https://Blog.Ganttpro.Com/Es/Metodo-de-la-ruta-critica-en-la-administracion-de-proyectos/>

XIN-SHE, Yang. Engineering Optimization: An introduction with Metaheuristic Applications, first edition, New Jersey, Wiley, 2010, part II, pp. 173-273. ISBN 978-0-470-58246-6

7. ANEXOS

Anexo A. Práctica recomendada AACE RP 57R – 09 adaptada al español

Nota: El presente escrito corresponde a la traducción al español realizada de la práctica recomendada AACE RP 57R – 09 (Integrated Cost And Schedule Risks Analysis Using Risk Drivers And Monte Carlo Simulation Of A CPM Model).

INTRODUCCIÓN

Alcance

Esta práctica recomendada (RP) define y explica la integración del análisis de riesgos de coste y calendario utilizando una simulación Monte Carlo de un calendario cargado de recursos del método del camino crítico (CPM). Explica con cierto detalle el uso de factores de riesgo [1] para representar los riesgos identificados para el coste y el calendario de un proyecto en un enfoque integrado. En general, este ejercicio tiene tres objetivos generales:

- Estimar la probabilidad de que se termine en la fecha prevista o antes de ella y por debajo de la estimación de costes.
- Determinar la cantidad de contingencia de costes y plazos necesaria para proporcionar un grado de confianza elegido de alcanzar ambos objetivos.
- Identificar los riesgos que provocan los rebasamientos estimados.

La utilización de los riesgos raíz para generar los resultados de la simulación permite priorizar los riesgos identificados y cuantificados por su impacto en el calendario.

Este enfoque de los riesgos facilita la identificación de opciones eficaces de tratamiento de los riesgos y la estimación de los resultados posteriores al tratamiento.

Propósito

Este documento no pretende ser una norma. El objetivo de este documento es proporcionar una guía para el análisis integrado de los riesgos del coste y del calendario del proyecto utilizando los inductores de riesgo en el contexto de la realización de un análisis de riesgos del calendario basado en la simulación Monte Carlo de un calendario de proyecto CPM que la mayoría de los profesionales considerarían una buena práctica. Este RP ilustra algunas de las características más importantes de los impulsores de riesgo y compara el método con otros métodos de análisis de riesgos también descritos en las prácticas recomendadas por AACE International. Los métodos alternativos para evaluar la contingencia incluyen los que se basan en la estimación paramétrica, como los descritos en la práctica recomendada 42R-08 [2]. También se anima al lector a leer las prácticas recomendadas 44R-08, Análisis de riesgos y determinación de contingencias utilizando el valor esperado [3] y 64R-11, Modelado y análisis de riesgos del cronograma CPM: Consideraciones especiales [4].

Antecedentes

En el análisis de riesgo integrado de costes y calendario, la plataforma para el análisis suele ser un calendario de análisis resumido que refleja el plan del proyecto con un nivel de detalle resumido. La integración del coste y el calendario es posible porque el coste total, expresado sin contingencias, se carga en las actividades como recursos dependientes del tiempo (mano de obra y equipo alquilado) e independientes del tiempo (material y equipo a instalar).

El método de representación de los riesgos identificados (riesgos específicos del proyecto o sistémicos) caracteriza dichos riesgos mediante:

- Su probabilidad de ocurrir con algún impacto tangible.
- Una distribución de probabilidad de los factores de impacto, que se aplicará a la duración programada de las actividades y a la desviación de los costes durante una simulación de Monte Carlo, representando el impacto de cada riesgo en la duración de la actividad si se produce.
- Las actividades a las que afecta el riesgo si se produce.

Los riesgos se representan por su probabilidad de ocurrencia y su impacto en la duración y el coste de la actividad (tasa de desgaste de la mano de obra, coste total de los materiales). La diferencia entre los impulsores de riesgos y los riesgos discretos radica en el uso de factores multiplicativos para representar el impacto de un riesgo en la duración de las actividades afectadas.

El método es coherente con la Práctica Recomendada 40R-08, Estimación de Contingencias - Principios Generales, [5] que especifica varios principios básicos, entre ellos "comienza con la identificación de los factores de riesgo" y "vincula los factores de riesgo con las actividades a las que afectan".

El factor de riesgo descrito en este documento identifica la importancia de los riesgos para los objetivos de coste y calendario. El efecto de la incertidumbre (es decir, el ruido de fondo que refleja la variabilidad inherente, el error de estimación y el sesgo de estimación, si lo hay) se incluye para derivar el impacto total en el coste y el calendario de estas dos fuentes.

Un enfoque para examinar el impacto del riesgo en el calendario de un proyecto es el método del valor esperado, tal y como se describe en las Prácticas Recomendadas 44R-08 [3] y 65R-11 para el análisis de riesgo integrado coste-calendario [7]. Este método se basa en la estimación de la probabilidad de que se produzcan los riesgos y del impacto global (en días o meses) en la fecha de finalización si se produce el riesgo. El método del valor esperado no suele utilizar el calendario del proyecto como plataforma, lo que supone un inconveniente, ya que el cálculo de la influencia de los riesgos en la fecha final de finalización es muy difícil, sobre todo cuando los riesgos afectan a trayectorias paralelas en el calendario. En cambio, la simulación de Montecarlo utiliza como plataforma el cronograma CPM basado en la lógica.

Los impulsores de riesgo pueden aplicarse a todas las actividades del calendario sobre las que influyen. En consecuencia, algunos riesgos se asignarán a múltiples actividades y algunas actividades se verán influidas por múltiples riesgos. Este método modela el efecto holístico de los riesgos, ya que hacen que las duraciones de todas las actividades a las que afectan se amplíen y se contraigan. Los costes también aumentan o disminuyen porque la variación de la duración durante la simulación afecta indirectamente a los costes de los recursos de tipo laboral. Es importante destacar que durante la simulación la ruta crítica puede variar a medida que se producen algunos riesgos y otros no. El método de control de riesgos utiliza la simulación para estimar el calendario y el coste del proyecto utilizando los datos de los riesgos para calcular la fecha de finalización según los principios del CPM dinámico.

El enfoque de los impulsores del riesgo incorpora las interacciones e interdependencias del plan del proyecto. El analista no tiene que resolver cuestiones sobre si el riesgo se produce en una ruta crítica o estimar el impacto de los riesgos que se producen con frecuencia, o con poca frecuencia, ya que la simulación de Monte Carlo tiene en cuenta todas estas consideraciones. Además, el analista no

tiene que estimar e imponer correlaciones entre las duraciones de las actividades, ya que el método del conductor del riesgo las genera durante la simulación, como se muestra a continuación. Si los riesgos son realmente causas raíz de las variaciones y no sólo síntomas de una causa más básica, es probable que esos impulsores sean independientes entre sí y no estén correlacionados. Por último, el uso de los riesgos de causa raíz como impulsores de la simulación facilita la priorización de los riesgos para que la dirección tome decisiones oportunas y eficaces sobre su tratamiento.

El público objetivo de esta práctica recomendada incluye a los profesionales del riesgo y a los gestores de proyectos que necesitan conocer los métodos contemporáneos de utilización de los riesgos de causa raíz, representados por los inductores de riesgo, para realizar un análisis integrado de los riesgos de coste y calendario. Otras personas involucradas en la toma de decisiones sobre las acciones de tratamiento de riesgos también deben ser conscientes de los beneficios del uso de los impulsores de riesgo.

PRÁCTICA RECOMENDADA

Condiciones previas para un análisis de riesgos del calendario

Un calendario de CPM que cumple con las prácticas del sector

El análisis cuantitativo de riesgos que se basa en la simulación de Monte Carlo de un calendario CPM tiene ventajas y plantea algunos retos. El cronograma debe revisarse en función de prácticas de programación fáciles de obtener, como la redactada por la US Government Accountability Office.

Los calendarios de los proyectos son modelos dinámicos del plan del proyecto, ya que cualquier evento de riesgo que afecte a la duración de cualquier actividad puede provocar un retraso en la fecha de finalización.¹ La incertidumbre del cronograma,

representada por la variabilidad inherente, el error de estimación o el sesgo de estimación, puede ampliarse añadiendo impulsores de riesgo sobre la incertidumbre para ilustrar la acumulación desde el cronograma determinista hasta un cronograma totalmente cargado de riesgos. Trabajar con el calendario del proyecto permite modelar en detalle cada riesgo identificado y asignar su impacto a actividades específicas o a categorías generales de actividades. El impacto puede afectar a las duraciones y/o a los costes. El software de simulación que trabaja con el cronograma CPM calcula las implicaciones detalladas para la fecha de finalización y el coste de la incertidumbre y de los numerosos riesgos que pueden producirse simultáneamente.

A menudo, el calendario disponible para el análisis es un calendario detallado del contratista. Este calendario puede tener muchas más actividades de las necesarias para modelar el efecto estratégico del riesgo en la fecha de finalización del proyecto. Este calendario también puede estar incompleto u omitir el alcance fuera del contratista que es necesario para que el proyecto se termine y se considere el coste total. A menudo, los calendarios presentados para el análisis no cumplen con las prácticas de la industria de la programación de proyectos (como evitar actividades colgantes, utilizar restricciones y retrasos, mostrar una flotación total realista y tener caminos críticos continuos y creíbles). En estos casos, el análisis no puede continuar hasta que se hayan rectificado estas deficiencias. Para llevar a cabo la simulación del cronograma para el análisis cuantitativo de riesgos, se necesitan modelos dinámicos, en los que las fechas de los hitos y el coste total se determinan mediante la duración de las actividades y la lógica de las relaciones del cronograma.

Se puede desarrollar un nuevo cronograma de análisis resumido y ser validado por las partes interesadas en pleno para garantizar que se identifique todo el alcance del proyecto. El cronograma de análisis resumido debe incluir todo el trabajo, ya que el analista no puede saber de antemano qué caminos resultarán críticos cuando se

consideren los riesgos. Las rutas principales del cronograma resumido deben reflejar el plan más detallado con valores de flotación realistas.² Ese cronograma debe incluir suficientes detalles para representar las numerosas interdependencias que se producen en los proyectos complejos.

El análisis se lleva a cabo en función del calendario resumido. Hay que tener en cuenta que se necesita tiempo para reunir todos los datos, realizar el análisis, preparar los informes y demás. En ese periodo, puede haber habido avances o cambios, que deben evaluarse y puede ser necesario revisar o revalidar el análisis con estos últimos datos.

Datos de riesgo recogidos para mejorar la calidad de los datos

La recopilación de datos de buena calidad sobre los riesgos del proyecto es crucial para el éxito del análisis de riesgos. Normalmente se utilizan talleres sobre riesgos, entrevistas confidenciales sobre riesgos o una combinación de ambos métodos.

- Los talleres de riesgos reúnen a personas con conocimientos en una sala para identificar y cuantificar la probabilidad de los riesgos y su impacto en los costes y la duración de las actividades. Bajo la dirección de un facilitador experto, el debate puede conducir a un consenso sobre un conjunto de riesgos con datos utilizables que se benefician de la sinergia de los presentes. Sin embargo, a menudo la gente se da cuenta de que compartir honesta y abiertamente en un taller es difícil, sobre todo si hay riesgos que no pueden discutirse porque son impopulares, porque pueden entrar en conflicto con las declaraciones de la dirección o los requisitos del cliente, porque implican que el proyecto incumple los términos del contrato o por otras razones. Estos riesgos se denominan a veces "desconocidos", ya que se conocen, pero no se pueden mencionar, como se menciona en el artículo "Hay conocimientos conocidos". [6] Dentro de las organizaciones con un nivel

relativamente bajo de madurez en la gestión de riesgos, [7] discutir estos riesgos en los talleres de riesgos puede ser difícil para algunos que temen las represalias de la dirección. Otras cuestiones que afectan negativamente a la eficacia de los talleres son: el pensamiento de grupo (supresión de la disidencia), el "factor Moisés" (es decir, una persona influyente, como el director del proyecto, que abrumba a los demás) y la conformidad cultural (es decir, decisiones que coinciden con las normas de la organización). [8]

- Las entrevistas confidenciales ofrecen la mejor oportunidad para que las personas expresen sus opiniones de forma abierta, honesta y sin temor a represalias. Estas entrevistas suelen identificar y calibrar algunos de los riesgos que se recogen en el registro de riesgos, y a menudo identifican por primera vez aspectos desconocidos. Una vez identificados los riesgos en una entrevista, éstos pueden ser comentados por otros entrevistados de forma confidencial o sacados a colación de forma anónima para que el grupo los acepte, pero nadie sabe lo que otros han dicho en otras entrevistas.
- La revisión de los datos existentes sobre proyectos comparables y recientes también debería aportarse al ejercicio de recopilación de datos sobre riesgos. Esto se conoce en algunas organizaciones como registro o base de datos de lecciones aprendidas. La comparación de los datos y resultados del proyecto actual con la experiencia pasada representada por los puntos de referencia de los proyectos completados puede aportar lo que se denomina la visión externa al debate. [9] Hacer referencia a las bases de datos históricas a menudo puede aportar más realismo al debate sobre los riesgos y proporcionar un medio para corroborar los riesgos identificados con sus rangos de probabilidad e incertidumbre. Como forma de aprender de la base de datos de proyectos pasados, un método de análisis basado en la regresión

estadística de los excesos en relación con los riesgos sistémicos contribuye a los resultados de la simulación y los comprueba. [2]

Propiedades de los factores de riesgo

Factores de riesgo y riesgos concretos

Existen dos enfoques para representar los riesgos individuales. A veces se denominan riesgos discretos e impulsores de riesgo y comparten algunos atributos, pero difieren en otros. Ambos métodos representan riesgos específicos del proyecto, están vinculados a actividades concretas y la probabilidad de que afecten a la duración de estas actividades. La diferencia entre estos dos enfoques radica en cómo representan y manejan el impacto del riesgo si se produce.

- Los riesgos discretos representan el impacto del riesgo como una distribución de probabilidad de un número estimado de días que se suman o restan a la duración programada. Si un riesgo se asigna a actividades cortas y largas, la distribución del impacto debe ajustarse por actividad para que sea adecuada a la duración de dichas actividades. En la mayoría de los programas de simulación, debido a la lógica empleada en la resolución del cronograma con impacto de riesgo, un riesgo discreto no puede poseer las características de oportunidad (menos días) y amenaza (más días) en el impacto, sino que debe ser o bien amenaza o bien oportunidad.
- Los impactos de los inductores de riesgo se expresan como una distribución de probabilidad de factores de ajuste multiplicativos de los que el software de simulación elige valores al azar para cada iteración. Por ejemplo, si se elige un factor multiplicativo de 107% para una iteración, se multiplican las duraciones deterministas de las actividades a las que afecta el impulsor de riesgo para esa iteración por 1,07 en esa iteración. Dado que los valores de

impacto se expresan como factores multiplicativos, el factor puede aplicarse tanto a las actividades largas como a las cortas y, por tanto, afectar a sus duraciones proporcionalmente.

Además, el conductor de riesgo puede poseer características tanto de amenaza como de oportunidad dependiendo de si el factor multiplicador es mayor o menor que el 100%. Las figuras 1 y 2, a continuación, ilustran estas propiedades cuando se aplica el rango de multiplicadores del 90%, 105% y 130% a las duraciones de las actividades durante la simulación.

Algunos riesgos se representan de forma más realista como riesgos discretos, ya que el impacto se especifica en días, no en factores multiplicativos o se aplica a un hito que tiene una duración de cero días cuando se multiplica por cualquier factor. Los análisis de riesgos pueden incluir tanto los factores de riesgo como los riesgos discretos.

La elección del tipo de distribución afectará a los resultados generales. Es más importante obtener opiniones sinceras sobre los rangos de 3 puntos que preocuparse por la forma de la distribución a utilizar.

Aplicación de los factores de riesgo a las actividades

Los riesgos pueden asignarse a múltiples actividades similares utilizando filtros o categorías, y grupos de actividades similares pueden verse afectados por el mismo riesgo o riesgos. Aunque el riesgo se describa a nivel general, debe asignarse (o asignarse) a las actividades en el nivel más detallado del calendario. El riesgo puede afectar adecuadamente a muchas actividades. La identificación de un grupo de actividades que pertenecen a una categoría, como ingeniería, tuberías o cimientos estructurales, ayuda a facilitar la asignación de riesgos a grupos de actividades

durante el modelado. Cuando el riesgo se produce durante una iteración del modelo de simulación, afecta a todas las actividades a las que se asigna, aplicando a cada una el mismo factor de duración de ajuste elegido. Si el riesgo se produce durante la siguiente iteración, se aplica de forma similar a todas las actividades afectadas un nuevo factor de duración, seleccionado aleatoriamente por el software a partir de la distribución de impacto de tres puntos. Si el riesgo no se produce en alguna iteración, las duraciones y los costes de las actividades no se ven afectados, al menos por ese riesgo.[3]

Si las actividades tienen recursos dependientes del tiempo (de tipo laboral), el coste de la actividad aumentará proporcionalmente al aumento de la duración. Además, si el riesgo tiene un componente de impacto en el coste, entonces el gasto (o tasa de desgaste) de la mano de obra o el coste total de los recursos materiales puede variar también. Si el factor de riesgo sólo tiene un componente de impacto en el coste, su coste puede variar durante la simulación incluso cuando no se varíe la duración.

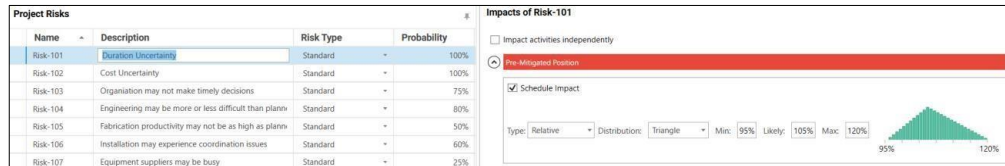
La aplicación de un proceso en el que un riesgo puede afectar a varias o incluso a muchas actividades reconoce que la importancia de cada riesgo viene determinada en parte por su efecto en todas las actividades a las que se asigna. Esta es una forma beneficiosa y realista de modelar el impacto holístico de los riesgos que influyen en múltiples actividades. El modelo tiene en cuenta, durante la simulación, si esas actividades se encuentran o no en rutas críticas para el riesgo. [4]

Efecto de la incertidumbre de la duración con un 100% de probabilidad

En la Figura 1 se muestra una ilustración de la configuración de un factor de riesgo en un cronograma simple. El riesgo 101 resaltado, la incertidumbre de la duración, tiene una probabilidad del 100% de abarcar todos los valores desde el mínimo hasta el máximo. El factor multiplicativo de la duración se expresa en este caso como una

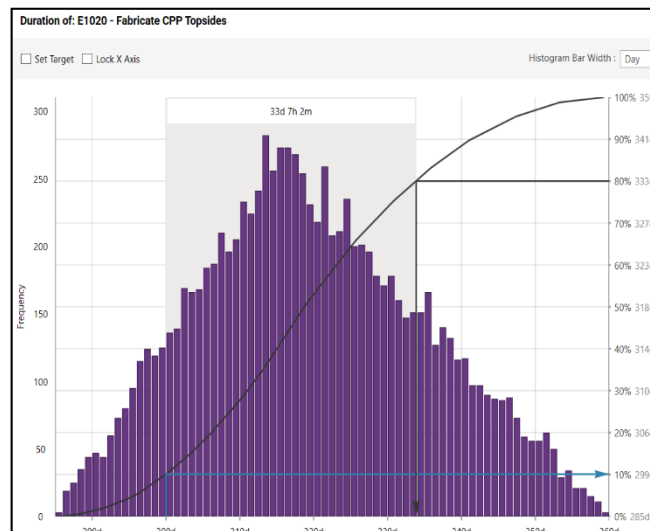
distribución triangular, aunque hay otras distribuciones disponibles, con 90%, 105% y 120% para los valores MIN, MOST LIKELY y MAX. [5]

Figura 1: Especificación típica de los factores de riesgo mediante un calendario simple



Debido a que el riesgo es 100% probable, aparece como un triángulo en la simulación (10.000 iteraciones), como se ilustra en el histograma para la duración resultante de una actividad, “Fabricate CPP Topsides” que se muestra en la Figura 2, sin ningún otro riesgo asignado a esa actividad.

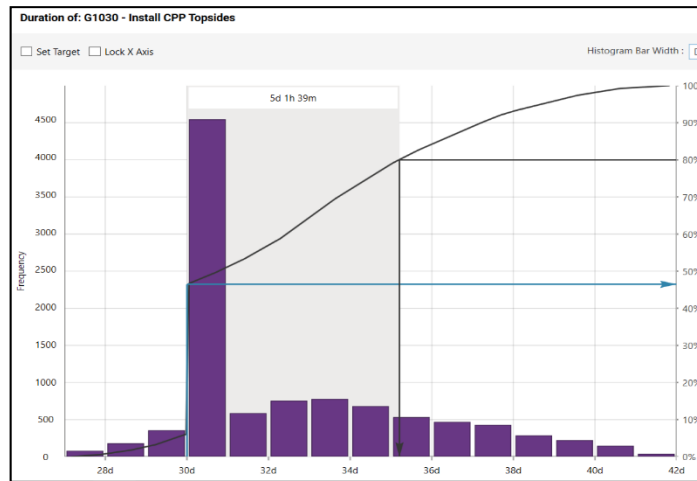
Figura 2: Distribución de la duración cuando se ve afectado por un riesgo 100% probable



Efecto de un conductor de riesgo con menos del 100% de probabilidad

En la figura 3, el riesgo 106, La instalación puede experimentar problemas de coordinación, se especifica que afecta a las actividades de instalación y que se produce el 60% de las veces.

Figura 3: Especificación de un conductor de riesgo con una probabilidad del 60% en las actividades de instalación

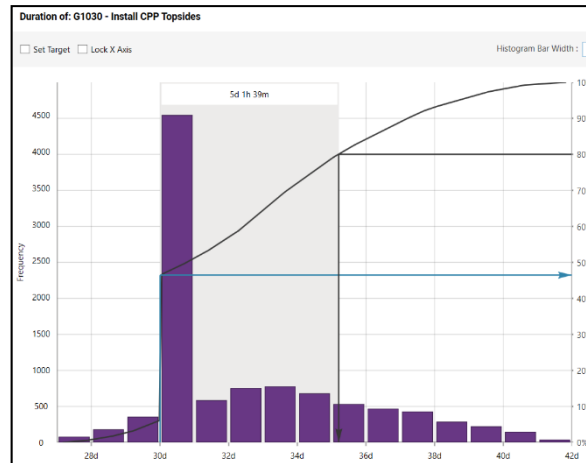


La figura 4 muestra un histograma de los resultados de la duración de la actividad Instalar CPP Topsides, donde el riesgo tiene un 60% de probabilidades de producirse. El riesgo 106 sólo se produce durante el 60% de las iteraciones, elegidas al azar por el software de simulación. En el otro 40% de las iteraciones, cuando el riesgo no se produce, la duración de la actividad Instalar CPP Topsides se mostraría como la programada originalmente si no hubiera otros riesgos. La distribución de probabilidad modelada que se muestra en la figura 4 puede parecer extraña, pero tras una pequeña reflexión se puede apreciar que:

- El 40% de los resultados se corresponden con la duración determinista original de 30 días laborables, mientras que

- El 60% restante de los resultados se ve afectado por el Riesgo 106, representado por una gama de duraciones que se extienden formando una distribución triangular.

Figura 4: Distribución simulada de una actividad influenciada por un riesgo probable del 60%.



Asignación de factores de riesgo a múltiples actividades

A menudo el riesgo se describe a un nivel alto, por lo que puede afectar a múltiples actividades, como todos los trabajos de fabricación, todos los trabajos eléctricos o todos los trabajos de andamiaje. En este caso que se muestra en la Figura 5, el riesgo 107, Los proveedores pueden estar ocupados, se asigna a las dos actividades de adquisición. Obsérvese que los riesgos 101 y 102, que representan la variación de la duración y la incertidumbre de los costes, se asignan a todo el calendario. Obsérvese también que los Riesgos 110 y 111 también están ampliamente asignados - se trata del riesgo sistémico y de la condición de estrés que se discute más adelante.

Figura 5: Ilustración de la asignación de un riesgo sistémico a múltiples actividades

	Risk-101	Risk-102	Risk-103	Risk-104	Risk-105	Risk-106	Risk-107	Risk-108	Risk-109	Risk-110	Risk-111
Description											
Offshore Gas Production Platform	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Milestones and Hammocks	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Decision Making	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Engineering	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Procurement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Procurement of LLE	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Procurement of Other Equipment	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Fabrication	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Drilling	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Installation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
HUC	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Los impulsores del riesgo modelan intrínsecamente cómo se correlacionan las duraciones de las actividades

Puede ser difícil estimar los coeficientes de correlación entre las duraciones de las actividades en situaciones complejas en las que hay muchos riesgos. Con el método de los factores de riesgo, la correlación entre las duraciones de las actividades se crea automáticamente durante la simulación, evitando tener que estimar o adivinar los coeficientes de correlación.

Las duraciones de las actividades se correlacionan cuando algún factor incierto (es decir, un factor de riesgo) afecta a ambas. Si se modela cómo se genera la correlación, utilizando un riesgo que sea común a ambas actividades, no se producirá una matriz de correlación incoherente. [La figura 6 ilustra cómo un riesgo aplicado a dos actividades diferentes hace que estén correlacionadas al 100%, mientras que la figura 7 muestra el subsiguiente gráfico de dispersión de las duraciones de las dos actividades.

Figura 6: Un riesgo aplicado a dos actividades hará que sus duraciones estén correlacionadas

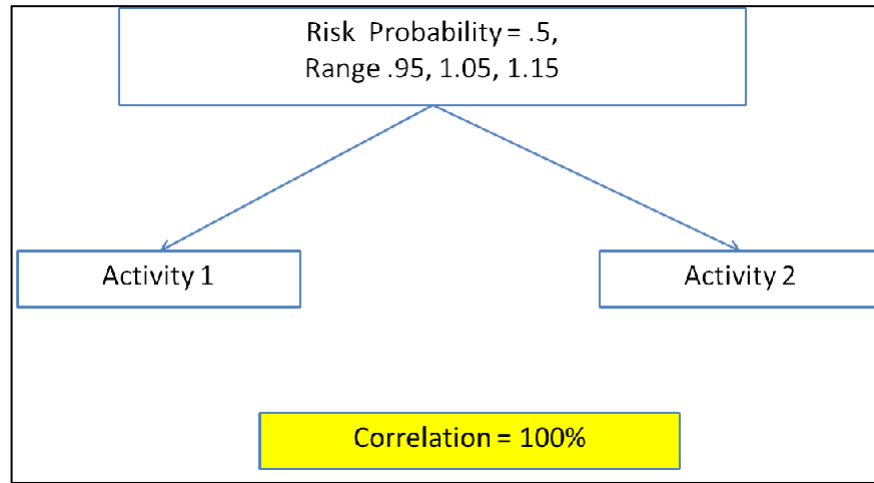
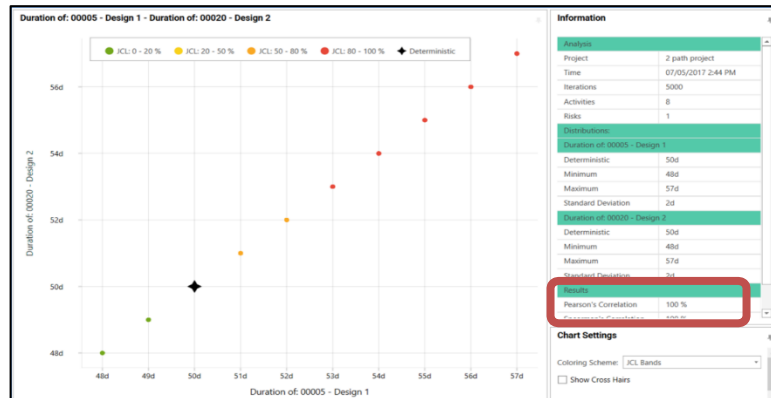


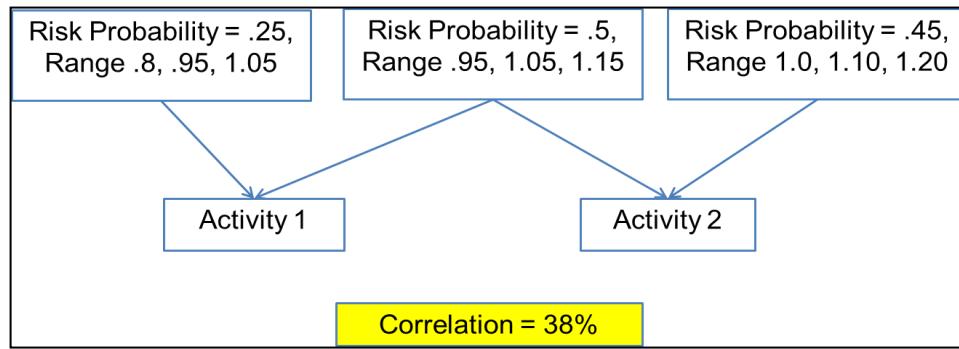
Figura 7: Con un riesgo común, las duraciones de las dos actividades están 100% correlacionadas



Cuando al menos un riesgo adicional afecta a una de las dos actividades correlacionadas, pero no a la otra, la correlación entre las duraciones de estas dos actividades se reduce. El modelo de la figura 8 muestra un riesgo común que afecta a dos actividades y otros dos riesgos que afectan a una actividad cada uno. El resultado es un coeficiente de correlación del 38% entre las dos actividades, como se muestra en la figura 9. Utilizar el modelo y las ejecuciones de simulación para

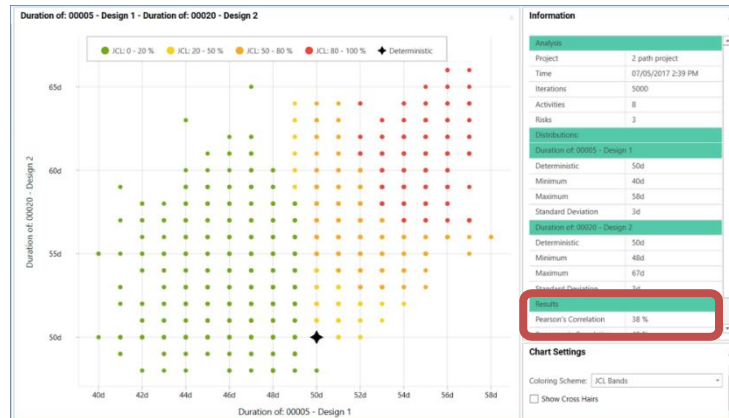
gestionar las correlaciones de forma natural, libera al analista de tener que adivinar los coeficientes entre las duraciones de muchas actividades.

Figura 8: Efecto de tres riesgos asignados entre dos actividades



Existe la posibilidad de que los factores de riesgo estén correlacionados porque comparten y responden a un riesgo común más fundamental. En este caso, la falta de correlación puede conducir a una subestimación del riesgo de calendario. Lo ideal es que los riesgos se describan en el nivel de la causa raíz para que sean independientes. El objetivo principal es identificar y justificar el grado de correlación utilizado a través de la simulación en lugar de determinar los coeficientes de correlación adivinando. Llegar a la causa raíz de los riesgos tiene un carácter iterativo, y deben hacerse ajustes a medida que se conozcan mejor los riesgos.

Figura 9: La adición de dos nuevos riesgos, cada uno de ellos aplicado a una sola actividad, pero no a la otra, da lugar a una correlación Coeficiente del 38%



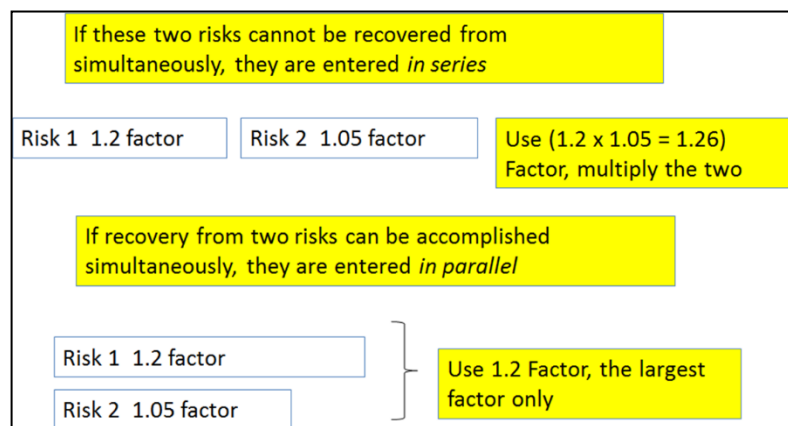
Asignación de riesgos en paralelo o en serie

Los riesgos pueden asignarse para influir en la duración de una actividad en serie o en paralelo. Cuando las actividades tienen asignados varios riesgos que se producen en la misma iteración, la duración de la actividad dependerá de uno de estos dos modos de asignación. El hecho de que los riesgos deban modelarse en paralelo o en serie depende de la naturaleza de los riesgos, no de las actividades a las que están asignados:

- Algunos riesgos pueden ser más importantes para recuperarse completamente que otros. La recuperación de estos riesgos importantes puede requerir recursos que son clave para terminar la actividad o puede ser fundamental para el objetivo de la actividad. En estos casos, estos riesgos se introducen en serie con otros riesgos.
- Algunos riesgos que se producen pueden desencadenar o hacer más probables otros riesgos. Un ejemplo sería la "desalineación de la rotación el equipo" en la instalación podría desencadenar un "fallo del sistema de control del compresor" durante la puesta en marcha.

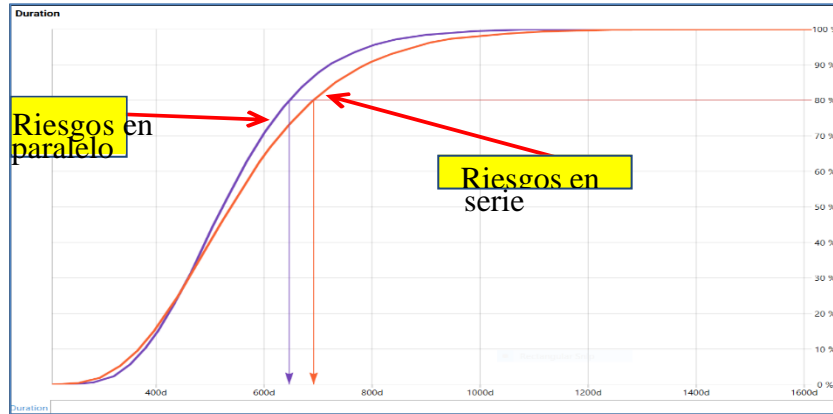
- Los riesgos que son menos importantes (en el sentido de que se llevan menos recursos escasos o superiores) y que, por lo tanto, pueden recuperarse, si se producen, simultáneamente con otros riesgos si se producen, se introducen en paralelo con otros riesgos.

Figura 10: Comparación de los multiplicadores de duración aplicados en serie o en paralelo



La figura 10 muestra cómo se aplican los multiplicadores de duración frente a los riesgos que operan en serie o en paralelo. Los riesgos múltiples que afectan a las actividades en serie pueden dar lugar a predicciones extremas de rebasamiento del calendario. Para ilustrar este punto, la figura 11 destaca la fecha de finalización si todos los riesgos se especifican en serie frente a todos los riesgos en paralelo.

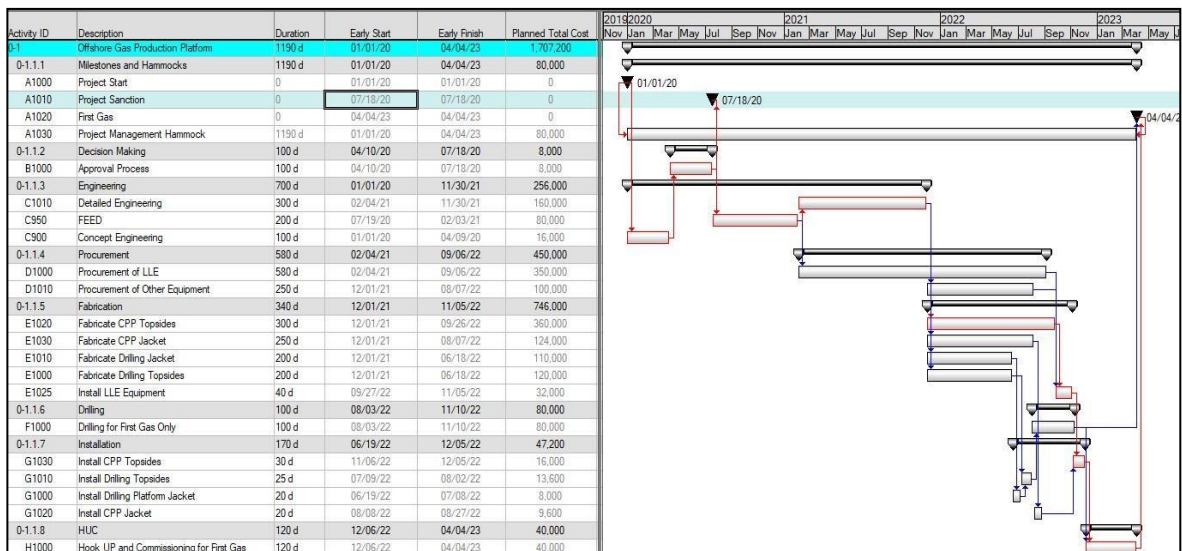
Figura 11: Efecto de los riesgos asignados en paralelo o en serie sobre la distribución acumulativa o la curva S de una actividad.



Estudio de caso - Modelo de proyecto de plataforma de producción de gas en alta mar

Los siguientes apartados ilustran el uso de los inductores de riesgo en un calendario sencillo de un proyecto de construcción de una plataforma de producción de gas en alta mar, que se muestra en la figura 12.

Figura 12: Ejemplo de calendario resumido de un proyecto de construcción de una plataforma de gas en alta mar



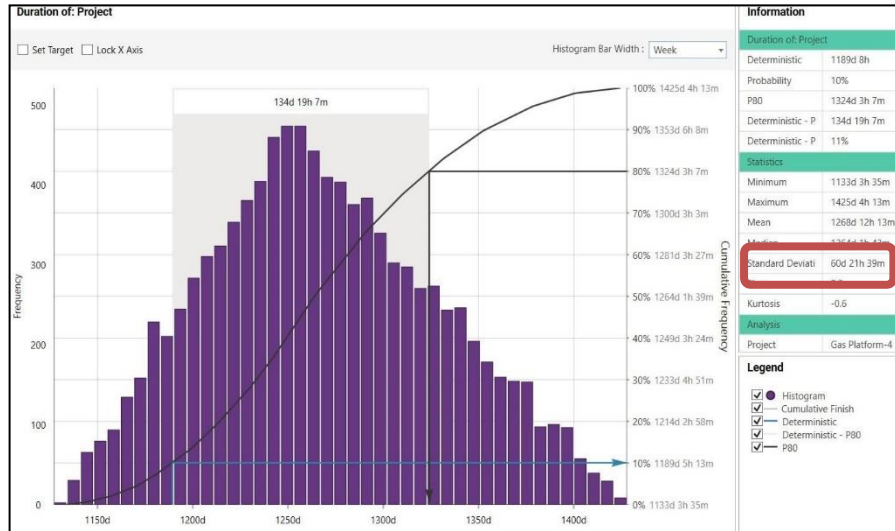
Modelización de la incertidumbre

En esta práctica recomendada, el término "incertidumbre" se define como relativo a la variabilidad de fondo originada por la variabilidad inherente, la estimación del error y la estimación del sesgo, si existe. [14] Esta definición es similar a la de variación de causa común. [11]

La modelización de la incertidumbre en las duraciones de las actividades puede realizarse aplicando rangos comunes o de referencia a grupos de actividades de incertidumbre similar o a todo el proyecto, duraciones y costes, como se ilustra en la figura 3. Dado que la incertidumbre tiene un 100% de probabilidades de ocurrir, la incertidumbre se representa únicamente por su rango de impacto y las actividades a las que afectan, pero no con su probabilidad de ocurrir.

El uso de factores de riesgo para representar la incertidumbre hace que las duraciones (o los costes) estén correlacionados, ya que si el riesgo se produce para una iteración se produce para todas las actividades y si algún multiplicador, digamos 1,07, se produce para esa iteración ese factor se aplica a todas las duraciones de las actividades. De esta forma, el rango especificado, en este caso para las duraciones del 95%, 105% y 120% se lleva a cabo a través de la simulación. Obsérvese que las duraciones mínima y máxima de la incertidumbre del cronograma para todo el proyecto, mostradas en la figura 13, cuando se calculan en relación con la duración determinista de 1.189 días, coinciden estrechamente con las duraciones de entrada especificadas, lo que refleja las aportaciones de los entrevistados.

Figura 13: La incertidumbre aplicada mediante los inductores de riesgo (correlacionados) Los resultados coinciden con los rangos de entrada de los entrevistados

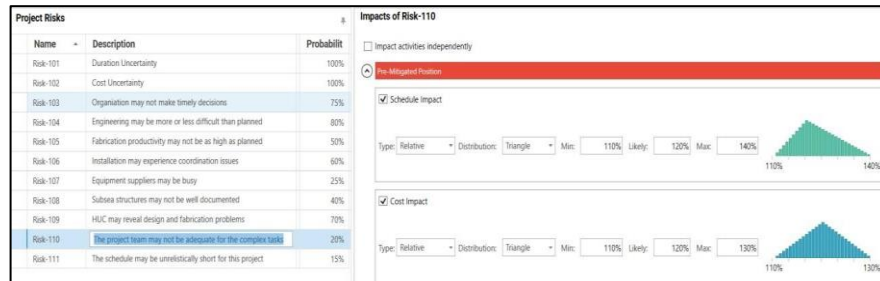


Modelar los riesgos sistémicos como impulsores del riesgo

En esta práctica recomendada, los riesgos específicos del proyecto y los sistémicos se definen de forma similar a la variación de causa especial. [11]

La modelización del impacto de los impulsores de riesgo en el calendario de un proyecto implica la aplicación de algunos riesgos a múltiples actividades, mientras que algunas actividades tienen asignados múltiples riesgos. En la Figura 14 se muestra un ejemplo de un riesgo sistémico aplicado como impulsor de riesgo. Se destaca el riesgo 110 "El equipo del proyecto puede no ser adecuado para las tareas complejas". Este riesgo sistémico se asocia a todo el equipo de entrega del proyecto y, como tal, se asigna a todas las actividades. Se considera que sólo tiene un 20% de probabilidades de ocurrir con algún efecto, y si ocurre tendrá un impacto en el cronograma MÍNIMO, MÁS PROBABLE y MÁXIMO del 110%, 120% y 140% del cronograma.

Figura 14: Factores de incertidumbre, específicos del proyecto y de riesgo sistémico con rangos de probabilidad e impacto



La asignación de riesgos a múltiples actividades se muestra en la figura 5.

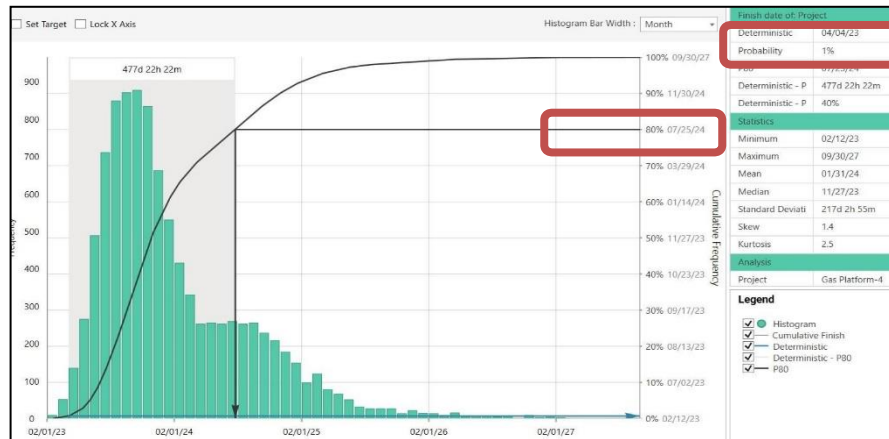
Resultados del riesgo de programación utilizando los impulsores de riesgo en una simulación de Monte Carlo

En la figura 16 se muestran los resultados del análisis de riesgo del calendario estándar. Estos resultados se representan mediante histogramas y sus funciones de distribución acumulativa asociadas. La fecha del percentil 80th de la distribución acumulativa se resalta por comodidad, aunque el propietario del proyecto puede elegir un nivel de confianza más agresivo o más conservador, respectivamente. A menudo se utilizan los valores P-5 y P-95 para describir el rango completo o realista de la distribución.

El equipo de interesados debe determinar el valor P (probabilidad de terminar en la fecha de finalización correspondiente o antes) que es aplicable a su organización en función de su tolerancia al riesgo. Por ejemplo, el percentil 80th, o la fecha P-80 resaltada, implica que hay un 80% de probabilidad de que la fecha de finalización sea el 25 de julio de 2024 o antes. Muchos usuarios consideran que el 80% es un nivel de certidumbre conservador que proporciona una contingencia de tiempo para acomodar la incertidumbre del calendario y los eventos de riesgo que se conocen en el momento del análisis, además de proporcionar algo de espacio para manejar aquellos riesgos que eran desconocidos en el momento del análisis pero que

pueden llegar a conocerse en el futuro o para dar cuenta de las subestimaciones de la probabilidad o el impacto de los riesgos identificados.

Figura 15: Histograma de la distribución de la probabilidad de la duración del horario y resultados de la curva S



Los resultados de la Figura 15 reflejan el impacto de los eventos de incertidumbre y riesgo definidos anteriormente en la Figura 14 y después de ejecutar 10.000 iteraciones de Monte Carlo. Obsérvese la distribución bimodal en torno al nivel de confianza P-80. Este segundo modo es el producto del riesgo de debilidad del equipo sistémico y el factor de estrés de la presión del calendario. Este segundo nodo representa un rebasamiento del 40%-50% de la duración programada, similar al reportado por IPA y Hollmann. [23, 24]

La fecha objetivo determinista es el 4 de abril de 2023, cuya probabilidad de que ocurra en este caso práctico es de sólo un 1%. Este bajo nivel de confianza en el calendario original es bastante común debido a la interacción de factores:

- Puede ocurrir que las duraciones de los calendarios se fijen en sus valores más optimistas o cerca de ellos, quizá por optimismo, por presión de la dirección o del cliente o por la competencia en la licitación, lo que lleva a un

calendario más corto de lo que se cree que es factible. Si se descubre este tipo de sesgo o tergiversación estratégica durante la recopilación de datos sobre el riesgo, este sesgo debe abordarse en el análisis del riesgo, normalmente mediante rangos de incertidumbre sesgados hacia la derecha.

- La mayoría de los riesgos se especificaron como amenazas en su mayoría o en su totalidad, por lo que los rangos de impacto estarían sesgados hacia el rebasamiento del calendario. Además, existe el riesgo sistémico de que el equipo del proyecto no esté a la altura de la gestión de un proyecto complejo, lo que lleva a una distribución parcialmente bimodal de las fechas de finalización.
- Hay algunos puntos de fusión en el calendario. Este hecho del plan del proyecto crea un fenómeno, denominado sesgo de fusión [12], en el que el inicio de una actividad o hito sucesor es más arriesgado que el final de cualquiera de las rutas de fusión anteriores. Entre los ejemplos en los que puede darse esta situación en el cronograma del caso de estudio se encuentran: Instalación de equipos de larga duración, Instalación de la parte superior de la planta de procesamiento central (CPP) y Conexión y puesta en marcha. En cada una de estas actividades, los dos predecesores deben terminar a tiempo o antes para que la actividad comience a tiempo.

Priorización de los factores de riesgo para la gestión

En la Figura 15, la fecha P-80 (que incorpora todos los eventos de incertidumbre y riesgo pre-mitigado) es el 25 de julio de 2024, aproximadamente 15½ meses más tarde que la fecha determinista. Un retraso de esta magnitud puede ser inaceptable para el director del proyecto, el cliente final y otras partes interesadas. El siguiente paso necesario es la gestión del riesgo, a menudo mediante la mitigación, que

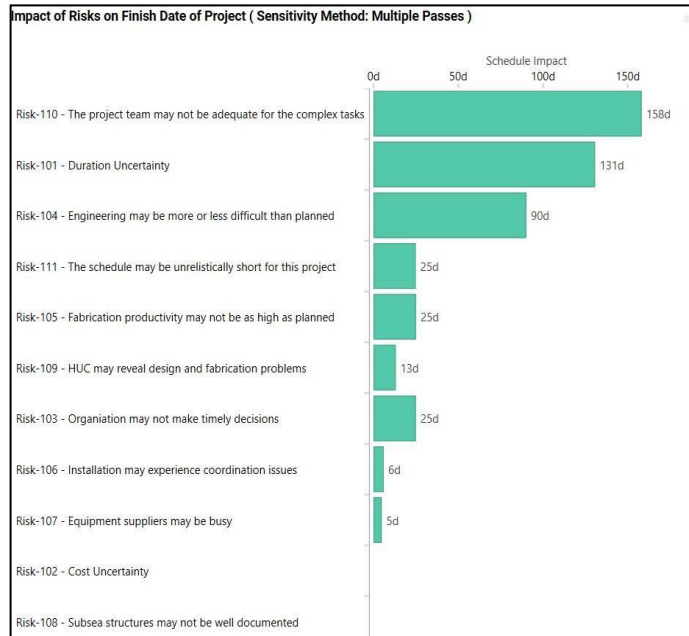
puede facilitarse utilizando la metodología de simulación iterativa para priorizar los factores de riesgo.

Los factores de riesgo deben ser priorizados para facilitar el esfuerzo de mitigación. El uso de los impulsores de riesgo identificados y/o de los riesgos discretos para dirigir la simulación permite priorizar los riesgos de la causa raíz, lo que conduce a respuestas más oportunas y eficientes a los riesgos.

La priorización de los riesgos utilizando los impulsores de riesgo se deriva de un programa iterativo de simulaciones, en el que cada riesgo se desactiva, uno a la vez, para determinar la fecha P-80 (o cualquier nivel de certeza deseado) que se produce sin ese riesgo, como si estuviera totalmente mitigado. [16] Este proceso de desactivación y simulación se repite para cada riesgo. Al final del ejercicio de simulación múltiple, el riesgo que produjo la fecha P-80 más temprana cuando se eliminó se considera el riesgo más importante a mitigar porque tiene el mayor impacto marginal medido en días en la fecha de finalización P-80 si se mitiga completamente.

Una vez identificado el riesgo más importante, la siguiente serie de simulaciones elimina el riesgo más prioritario previamente identificado y simula el sistema con los demás riesgos desactivados cada uno de ellos por turnos para determinar el segundo riesgo más importante que da lugar a la fecha P-80 más temprana durante múltiples simulaciones de "eliminación y sustitución de factores" después de mitigar el riesgo más importante. El método se repite hasta que todos los impulsores de riesgo identificados y los riesgos discretos han sido elegidos y desactivados con múltiples simulaciones. El diagrama de tornado resultante, como el de la figura 16, identifica el número de días de impacto si los riesgos se mitigaran completamente en su orden de prioridad. Obsérvese que la incertidumbre de fondo se incluye en la figura 16 aunque no sea reducible porque no se conocen sus causas.

Figura 16: Incertidumbre y riesgos priorizados por el impacto del calendario en el nivel de confianza P-80



Este método de priorización de riesgos mejora los enfoques de sensibilidad estándar. Los diagramas de tornado estándar clasifican las actividades basándose en la correlación entre la duración de las actividades y la fecha de finalización durante la simulación. Dado que los riesgos identificados se han utilizado para dirigir la simulación, el método de priorización descrito se centra en los riesgos, no en las actividades. Los resultados expresados en términos de días ahorrados si el riesgo estuviera completamente mitigado (que es un objetivo poco probable de alcanzar) y medidos al nivel deseado (por ejemplo, P-80) son más fáciles de comprender por el equipo del proyecto, de comparar con el coste de las acciones de tratamiento y de apoyar una toma de decisiones eficaz. [13]

Para facilitar el tratamiento de los riesgos, los detalles asociados a estos riesgos priorizados pueden presentarse en una tabla. En este caso, hay un total de 477 días de contingencia en el calendario, desde la fecha prevista del 4 de abril de 2023

hasta el 25 de julio de 2025. De ellos, sólo 347 días pueden ser objeto de tratamiento de riesgos, ya que la incertidumbre no se considera generalmente reducible y representa 130 días.

Tratamiento de los riesgos mediante la priorización de los mismos

A partir de los riesgos priorizados, las partes interesadas en el proyecto deben reunirse para desarrollar las acciones de tratamiento de riesgos propuestas. Una vez identificadas estas acciones, se puede convocar un taller formal de tratamiento de riesgos (mitigación) que incluya a todas las partes interesadas. El objetivo es acordar qué planes de respuesta a los riesgos se pondrán en práctica y quién los asumirá.

Para concluir con éxito el taller de tratamiento de riesgos, los planes de respuesta al riesgo que se adopten deben ser:

1. Diferente y no duplicar lo que ha ocurrido en el proyecto hasta la fecha.
2. Acordado y comprometido por todas las partes implicadas.
3. Debe asignar un propietario de tratamiento de riesgos a los riesgos de alta prioridad.
4. Con un presupuesto y una dotación de personal.
5. Supervisión de las correcciones a mitad de camino.

Los tratamientos aprobados y acordados pueden utilizarse para generar evaluaciones para los parámetros de probabilidad e impacto que representan el riesgo post-mitigado o residual para cada riesgo relacionado, ya que a menudo es imposible eliminar completamente los riesgos para todas las partes interesadas.

Esta exposición al riesgo residual puede entonces modelarse para generar un resultado post-tratamiento realista.

Integrar el análisis de riesgos de costes y plazos

El coste y el calendario están relacionados sería contradictorio esperar que se produzcan grandes excesos en el calendario, pero que se produzcan importantes infrutilizaciones en los costes. La razón es que si una actividad tarda más de lo previsto en el plan y el calendario del proyecto, cualquier recurso de tipo laboral, incluidos la mano de obra y el equipo alquilado por días, asignado a esa actividad costará más. Esto no es una sorpresa, ya que el proyecto no puede esperar que la mano de obra o los equipos pesados de movimiento de tierras, las grúas de torre o los equipos de perforación trabajen sin compensación. Puede haber excepciones a esta relación. Si el director del proyecto ordenara una ralentización por limitaciones de tesorería, un retraso retrasaría el calendario, pero sólo afectaría a los costes indirectos que no pudieran detenerse. Esta práctica recomendada tiene por objeto situar los riesgos y la incertidumbre en el plan actual representado en el calendario actual. [6]

Si hay riesgos que afectan al calendario del proyecto, es de esperar que también afecten al coste del mismo, en la medida en que se utilicen recursos de tipo laboral. Esta afirmación no hace un juicio sobre qué participante en el proyecto pagará realmente la mano de obra por los excesos de tiempo. Muchos propietarios firman contratos a precio fijo con los contratistas, con la esperanza de transferirles el riesgo de los costes.

Algunos participantes del propietario en el análisis de riesgos afirmarán que el contratista asume todo el riesgo del calendario debido a un contrato de precio fijo. Sin embargo, suele haber cambios en el alcance, condiciones desconocidas en el momento de la firma del contrato y circunstancias externas que se consideran mejor

como riesgos asumidos por el propietario. Los contratos a precio fijo no suelen transferir el riesgo al contratista, pero a menudo hacen que los contratistas incluyan su evaluación del riesgo de costes en la oferta a precio fijo [25, 26]. [25, 26] Fundamentalmente, una parte importante de la contingencia de costes se deriva indirectamente de las actividades de alargamiento de los riesgos de calendario, incluidas las actividades de hamaca que mantienen los costes indirectos, y que hacen aumentar los costes de los recursos de tipo laboral.

Recursos (laborales) dependientes del tiempo

La plataforma para el análisis integrado de los riesgos de costes y del calendario es un calendario CPM cargado de recursos. La carga de recursos puede hacerse con tan sólo dos categorías de recursos, distinguiendo entre mano de obra y materiales. Todos los recursos utilizados y que contribuyen al coste del proyecto deben expresarse sin incluir la contingencia para evitar el doble recuento de los sobrecostes, ya que la simulación de Montecarlo reestimaré la contingencia de costes. El coste total del proyecto sin contingencia debe estar representado por los recursos colocados en las actividades.

El proceso de análisis de riesgos se ocupa de los recursos de tipo laboral, incluidos los equipos alquilados (por ejemplo, equipos de movimiento de tierras, grúas de torre, equipos de perforación, etc.), ya que estos recursos costarán más de lo previsto si las actividades asociadas tardan más de lo previsto.

En los modelos de simulación de programas con carga de recursos, la mano de obra y otros recursos que dependen del tiempo costarán más en proporción al aumento de la duración de la actividad. Aunque se trata de una suposición conveniente, también es intuitiva; si una cuadrilla está programada para trabajar 10 días y, en cambio, para realizar el trabajo, trabaja 20 días, es lógico que la mano de obra de esa actividad cueste el doble de lo estimado. El alargamiento del trabajo no

se debe a que la dirección haya recortado los recursos, sino a que ha mantenido el plan de tener una cuadrilla trabajando, pero quizá con menor productividad. Esto representa la integración en el análisis de riesgo integrado de costes y calendario.

Además del impacto del riesgo de calendario en el coste, hay riesgos como la variabilidad de la cantidad de despegue o el precio por cantidad que afectan directamente al coste. Estos riesgos de coste directo adoptan distintas formas en función de la naturaleza del recurso aplicado, y se ejecutan mediante una distribución de probabilidad de factores multiplicativos aplicados al gasto diario o al índice de utilización. Si los costes de la mano de obra son más elevados debido a la rigidez del mercado laboral, podría producirse un aumento del coste, aunque el calendario sea estable. Es igualmente intuitivo que la dirección no se quedará de brazos cruzados cuando se produzcan retrasos. A menudo, añadirán recursos como parte de la acción correctiva. Esto puede modelarse con una capacidad avanzada de bifurcación condicional, que no se incluye en muchos paquetes de software.

Las actividades de nivel de esfuerzo o hamaca pueden cargarse con recursos dependientes del tiempo para representar el coste indirecto, como la gestión y los controles del proyecto, los sistemas de gestión asignados al proyecto, la garantía de calidad y las actividades de puesta en marcha. El tiempo de trabajo de estos recursos depende del tamaño de esta oficina de gestión de proyectos y de la duración del proyecto o de las fases a las que dan soporte. Están cargados de recursos de tipo laboral que dependen del tiempo.

Obsérvese que existe un producto cruzado de riesgos para los costes que afecta a los recursos laborales, ya que los costes laborales pueden verse afectados por: (1) los riesgos para los costes (tasa de desgaste), (2) los riesgos para el calendario que afectan a los costes laborales (mayor duración) y (3) el producto cruzado de una mayor tasa de desgaste y una mayor duración.

Costes de recursos (materiales) independientes del tiempo

En el caso de los recursos materiales, incluidas las materias primas y los equipos fabricados que deben instalarse, los riesgos de costes directos afectan a la estimación del coste total. Dado que son independientes del tiempo, el coste del material no se verá afectado indirectamente por el riesgo del calendario. Si los proveedores entregan más tarde de lo previsto, no habrá necesariamente un impacto en el coste, ya que la mano de obra es de los proveedores, pero puede haber un impacto en el calendario de la entrega tardía.

Representación del riesgo para el coste y el calendario: el nivel de confianza conjunto (JCL)

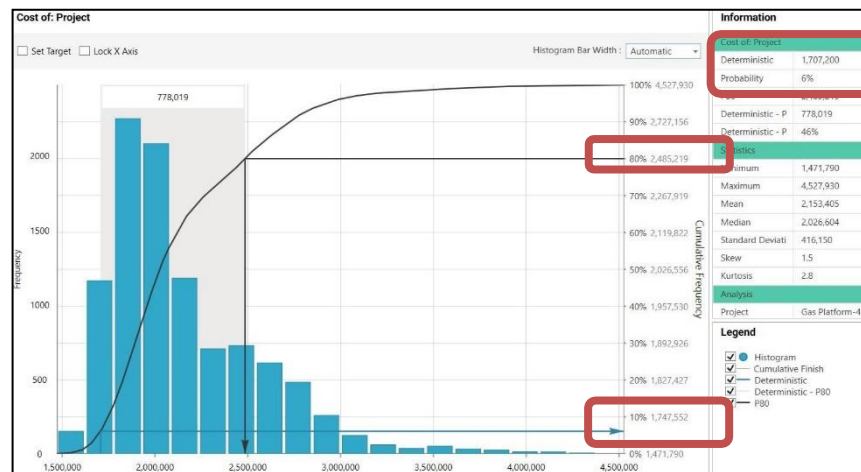
Con los costes totales del proyecto sin contingencia cargados en las actividades del cronograma CPM como recursos de mano de obra y material, la simulación calcula tanto la fecha de finalización como el coste total para cada iteración, reflejando la incertidumbre y los riesgos para esa iteración. Los resultados de los costes y el calendario de cualquier iteración reflejan el mismo conjunto de supuestos.

La simulación produce histogramas y distribuciones de probabilidad acumulada tanto para el coste como para la fecha de finalización, de modo que el usuario puede revisar el P-80 (o cualquier nivel de confianza que se necesite) en el coste o la fecha de finalización por separado. El riesgo de calendario muestra una fecha P-80 del 25 de julio de 2024 (véase la figura 15). El histograma de riesgo de costes de la misma simulación informa sobre el efecto de los riesgos aplicados directamente al coste e indirectamente derivados del efecto del riesgo de calendario en el tiempo.

Costes de recursos: este resultado es de 2.720 millones de dólares con una contingencia por encima del coste base de 939 millones de dólares, es decir, un 53% de rebasamiento, en gran parte debido al riesgo de debilidad del equipo sistémico, como se muestra en la figura 17.

El problema de estos resultados P-80 de los histogramas individuales para el coste y la fecha de finalización es que no son suficientes para garantizar que ambos objetivos se cumplan simultáneamente en el proyecto. Hay muchos resultados de costes asociados al 25 de julio de 2024 y algunos de ellos no tienen un 80% de probabilidades de cumplirse. Hay muchas fechas de finalización asociadas a los 2.485 millones de dólares y algunas de ellas tampoco tienen un 80% de probabilidad.

Figura 17: Resultados del riesgo de coste pre-mitigado



Prometer el coste P-80 y la fecha P-80 no representará un P-80 para ambos objetivos. Este resultado se observa cuando se muestra el diagrama de dispersión producido por la simulación, como en la figura 18. Cuando se grafican los dos valores P-80 (cruces) el resultado es 76% de probabilidad tanto para el tiempo como para el coste juntos. Así lo muestra el "76%" resaltado en el cuadrante inferior izquierdo, que indica que unas 7.600 de las 10.000 iteraciones están al suroeste de los valores P-80. Está claro que este proyecto tiene que prometer una fecha más tardía y un coste más elevado para alcanzar ambos objetivos simultáneamente.

La figura 18 muestra un esquema de colores siguiendo las bandas "JCL". JCL son las siglas de Joint Confidence Level (Nivel de Confianza Conjunto), que es un nombre para los resultados del análisis de riesgo integrado de costes y plazos acuñado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de Estados Unidos. Hay algunos análisis que demuestran que, desde que la NASA adoptó el JCL para sus peticiones al Congreso de los Estados Unidos, su capacidad para alcanzar los objetivos establecidos ha mejorado [27]. [27] Este resultado no significa que la NASA sea repentinamente mejor gestora de proyectos, sino que prevé mejor dónde acabarán sus proyectos. En el caso de los grandes proyectos financiados con fondos públicos, esta mejora en la precisión de las solicitudes presupuestarias es útil.

Figura 18: Diagrama de dispersión del coste y la fecha de finalización de los resultados del riesgo pre-mitigado.



El diagrama de dispersión de la figura 18 debe interpretarse como una cresta tridimensional de probabilidades de que se produzcan la duración y la fecha de finalización. El proyecto debe tratar de encontrar el par más probable de resultados de coste-fecha de finalización que logre una probabilidad del 80% (denominada "JCL-80") de que ambos acaben en el objetivo o mejor. Encontrar el punto más alto

que logre una probabilidad del 80% o mejor equivale a seguir un camino en un mapa topográfico con la misma probabilidad conjunta de coste y calendario y encontrar el punto más alto. Esto equivale a identificar el punto de mayor concentración a lo largo de la zona sombreada "JCL: 80-100%" del diagrama de dispersión. Uno de estos puntos se muestra en la figura 19.

Figura 19: Identificación del par de coste y fecha de finalización más probable que presenta un JCL-80



Aunque no existe un método consensuado para encontrar el punto JCL-80 más probable, [26] el punto elegido en la figura 19 indica unos 196 millones de dólares más de presupuesto y 9 semanas más de calendario. Estos valores serían mayores si el coste y el calendario no estuvieran tan correlacionados. En esta figura están correlacionados en un 86%. Si el coste y la fecha de finalización estuvieran perfectamente correlacionados, los valores P-80 y JCL-80 coincidirían, pero si la correlación es menor, por ejemplo, después de modelar los valores posteriores a la mitigación, el factor de corrección JCL sería mayor que el mostrado para este caso de estudio.

RESUMEN

En resumen, el uso de factores de riesgo para los riesgos identificables específicos del proyecto para el cronograma produce algunos beneficios significativos para el análisis de riesgo integrado de costes y cronograma:

- El uso de los impulsores de riesgo para representar los riesgos individuales de causa raíz identificados para dirigir la simulación Monte Carlo es coherente con la Práctica Recomendada 40R-08, Estimación de Contingencias - Principios Generales. [5]
- Los factores de riesgo permiten el uso del cronograma del proyecto que mantiene la integridad del modelado consistente con el plan del proyecto y facilita la captura de los efectos acumulativos del riesgo a través de la lógica del proyecto y las correlaciones entre las duraciones de las actividades. La correlación entre el tiempo y el coste es uno de los resultados de la simulación que puede verse en el gráfico de dispersión e influye en la necesidad de analizar el nivel de confianza conjunto de alcanzar ambos objetivos.
- Dado que los impulsores del riesgo proporcionan la variabilidad en las duraciones de las actividades que dirigen la simulación, su impacto individual en la fecha de finalización del pretratamiento con riesgo puede identificarse en el margen utilizando la simulación progresiva con métodos de desactivación de riesgos que conducen a la priorización de los mismos. La priorización de los riesgos es importante para una mitigación eficaz de los mismos.

- El método de priorización informa de los días de impacto si se mitiga el riesgo, lo cual es una información procesable para la dirección porque contribuye al análisis de costes y beneficios.
- Los factores de riesgo pueden asignarse en paralelo con otros riesgos o en serie. En el caso de los riesgos aplicados en serie, sus impactos se agravan durante las simulaciones, provocando a veces duraciones de actividad muy largas.
- Los impulsores de riesgo pueden representar tanto características de oportunidad como de amenaza, dependiendo de si el factor de impacto del ajuste es menor o mayor que 1,0. Además, el rango de impacto de un impulsor de riesgo puede abarcar desde la oportunidad hasta la amenaza.
- La asignación de riesgos de causa raíz a múltiples actividades se facilita de forma intuitiva. Dado que los rangos de impacto de los impulsores de riesgo son factores compuestos, pueden aplicarse fácilmente tanto a las actividades más largas como a las más cortas. La asignación de impulsores de riesgo a múltiples actividades permite al analista representar el efecto holístico de un riesgo que afecta a muchas actividades.
- El enfoque del conductor de riesgo modela intrínsecamente la correlación entre las duraciones de las actividades cuando se ven afectadas por un riesgo compartido. Durante la simulación de Monte Carlo, se generan los coeficientes de correlación entre las duraciones de las actividades y se pueden visualizar.
- Los riesgos de coste y calendario pueden integrarse en el sentido de que los recursos de tipo laboral dependen del tiempo. Si esas actividades tardan más

en completarse, la mano de obra, el equipo alquilado y otros recursos costarán más de lo previsto. Algunos riesgos afectarán al índice de gasto diario de los recursos dependientes del tiempo o al coste total de los recursos independientes del tiempo, como el material y el equipo a instalar, independientemente del riesgo para la duración de las actividades. Además, existe la posibilidad de que en los proyectos basados en el cronograma se añadan recursos si se ve que la fecha de finalización del cronograma está en grave peligro, por lo que el aumento de costes puede ser desproporcionado con respecto al cronograma.

- Con el análisis de riesgo integrado coste-calendario existe un método denominado Nivel de Confianza Conjunto para determinar cuánto coste y duración adicionales serán necesarios para alcanzar los objetivos de tiempo y coste conjuntamente. Cuanto menos correlacionados estén el tiempo y el coste, principalmente por la menor cantidad de mano de obra y la mayor cantidad de recursos materiales que se planifiquen, los valores JCL-80 serán mayores que los valores P-80 para el coste y el tiempo considerados por separado, incluso con un modelo integrado de coste-programa.

REFERENCIAS

- [1] D. T. Hulett, Practical Schedule Risk Analysis (a partir del capítulo 8), Gower Publishing Limited, 2009.
- [2] AACE International, Recommended Practice No. 42R-08, Risk Analysis and Contingency Determination Using Parametric Estimating, Morgantown, WV: AACE International, Latest revision.
- [3] AACE International, Recommended Practice No. 44R-08, Risk Analysis and Contingency Determination Using Expected Value, Morgantown, WV: AACE International, última revisión.

- [4] AACE International, Práctica recomendada nº 64R-11, CPM Schedule Risk Modeling and Analysis: Special Considerations, Morgantown, WV: AACE International, última revisión.
- [5] AACE International, Recommended Practice No. 40R-08, Contingency Estimating - General Principles, Morgantown, WV: AACE International, última revisión.
- [6] D. H. Rumsfeld, Transcripción de noticias de Defense.gov: "DoD News Briefing - Secretary Rumsfeld and Gen. Myers", US Department of Defense, February 12, 2002.
- [7] D. T. Hulett, "(RISK-2890) Journey-Map to a More Mature Schedule Risk Analysis (SRA) Process", en AACE International Transactions, Morgantown, 2018.
- [8] D. Hillson y R. Murray-Webster, Understanding and Managing Risk Attitude, Gower Publishing Limited, 2005.
- [9] B. Flyvbjerg, "From Nobel Prize to Project Management; Getting Risks Right", Project Management Journal, Agosto de 2006.
- [10] S. Book, "A Theory of Modeling Correlations for Use in Cost-Risk Analysis", en Third Annual Project Management Conference, Galveston, 2006.
- [11] AACE International, Recommended Practice No. 10S-90, Cost Engineering Terminology, Morgantown, WV: AACE International, última revisión.
- [12] K. MacCrimmon y C. Ryavec, "An Analytical Study of the PERT Assumptions", Research Memorandum RM-3408-PR", Rand Corporation, Santa Mónica, 1962.
- [13] E. Druker, G. Gilmer y D. Hulett, "(RISK-1662) Using Stochastic Optimization to Improve Risk Mitigation", en AACE International Transactions, Morgantown, 2014.

- [14] H. L. Stephenson, Ed., Total Cost Management Framework: An Integrated Approach to Portfolio, Program and Project Management, 2ª ed., Morgantown, WV: AACE International, última revisión.
- [15] AACE International, Recommended Practice No. 65R-11, Integrated Cost and Schedule Risk Analysis and Contingency Determination Using Expected Value, Morgantown: AACE International, última revisión.
- [16] AACE International, Recommended Practice No. 57R-09, Integrated Cost and Schedule Risk Analysis Using Monte Carlo Simulation of a CPM Model, Morgantown, WV: AACE International, última revisión.
- [17] AACE International, Recommended Practice No. 41R-08, Risk Analysis and Contingency Determination Using Range Estimating, Morgantown, WV: AACE International, última revisión.
- [18] D. T. Hulett, Integrated Cost-Schedule Risk Analysis (a partir del capítulo 8), Gower Publishing Limited, 2011.
- [19] D. T. Hulett y E. Druker, "Integrating with Project Schedule Risk Improves Analysis of Cost Risk", Cost Engineering, no. Mayo/Junio, 2015.
- [20] D. T. Hulett y M. T. Nobsch, "Integrated Cost-Schedule Risk Analysis", Cost Engineering, no. Noviembre/Diciembre, 2012.
- [21] E. Uyttewaal, "Forecast Scheduling with Microsoft Project 2012", ProjectPro Corporation.
- [22] Oficina de Contabilidad del Gobierno de los Estados Unidos (GAO), "Schedule Assessment Guide: Best Practices for Project Schedules, GAO-16-89G", US Government Accounting Office (GAO), Washington, 2015.
- [23] J. K. Hollmann, "Risk Analysis at the Edge of Chaos", Cost Engineering, enero/febrero de 2015.
- [24] A. Ogilvie, R.A Brown Jr, F. P. Biery y P Barshop, "Quantifying Estimate Accuracy and Precision for the Process Industries: A REview of Industry Data", Cost Engineering, noviembre/diciembre de 2012.

- [25] E. W. Merrow, Industrial Megaprojects, 2011, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ
- [26] J. K. Hollmann, Project Risk Quantification, 2016, Probabilistic Publishing
- [27] "The Effect of Policy Changes on NASA Science Mission Cost & Schedule Growth", Bob Bitten, Bob Kellogg, Eric Mahr, Sarah Lang, Debra Emmons The Aerospace Corporation, Charles Hunt NASA Headquarters, OCFO, Presentado en el NASA Cost & Schedule Symposium 14 de agosto de 2018.