

**EMBA 2015**

**GESTIONANDO LA INCERTIDUMBRE**

**Ventajas de la aplicación de Monte Carlo  
en el desarrollo de cronogramas de proyectos**

Alumno: **Antonio Lisoni**

Tutor: Mariano Perez

Buenos Aires, Abril 2017

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Pluspetrol que, como tantas veces en estos 12 años, me dio la oportunidad de aprender cosas nuevas y crecer profesionalmente. Es mi tarea ahora mostrar que algo he crecido.

También agradecer a mis colegas del equipo de Facilities que durante un año y medio me dieron el soporte necesario para poder cursar (y ausentarme) durante el programa del EMBA. En particular a Guillermo, Horacio, José y René que también se prestaron para las entrevistas durante el desarrollo de esta tesis.

Al excelente grupo 6 del EMBA2015, que en septiembre del 2015 eran compañeros y en diciembre del 2016 amigos. Parte fundamental de la experiencia de aprendizaje en UTDT tuvo que ver con ellos.

Querría también agradecer a toda la comunidad educativa de la Di Tella y recordar en particular al profesor Nestor Paradiso, quien nos enseñó Control Global y algunas cosas sobre el significado de la vocación docente. He buscado incluir en esta tesis algunos puntos sobre medición, control y mejora.

Por último, y por sobre todo, a mi mujer Sol. Porque en el mundo de lo probabilístico hay por suerte algunas cosas que son determinísticas... como nuestro amor y nuestros hijos.

## RESUMEN

La constatación de que la enorme mayoría de los proyectos de infraestructura de la industria del Oil and Gas a nivel mundial sufren de atrasos respecto a su cronograma original no es una novedad. Sin embargo publicaciones más recientes<sup>1</sup> indican que la industria del Oil and Gas, a diferencia de otras industrias, sistemáticamente define para sus nuevos proyectos cronogramas más agresivos en términos de duración que proyectos similares ejecutados en el pasado, bajo el concepto que acelerar la entrada en producción mejora el valor presente neto de esos proyectos (NPV).

El análisis estadístico muestra, en contraposición, que los proyectos más agresivos en cronograma suelen ser también los que más pérdida de NPV tienen si se compara el valor prometido cuando se sanciona el proyecto contra el valor realizado al final del mismo. La pérdida de NPV se explica no solo por los sobrecostos de la aceleración y la pérdida de producción por el atraso en la puesta en marcha, sino también por las falencias en la definición de ingeniería de reservorios e instalaciones en las etapas iniciales del proyecto que derivan de un contexto de tiempos de ejecución muy agresivos. Las frases utilizadas en algunas publicaciones para describir este fenómeno son “La velocidad mata” y también “Ir despacio para ir rápido”.

Las compañías petroleras que cotizan en bolsa experimentan subas de su acción cuando comunican nuevos descubrimientos. En ese contexto suelen hacerse anuncios respecto a la fecha de entrada en producción del nuevo descubrimiento. En esta tesis nos preguntamos si la industria del Oil and Gas es víctima de la forma en que mide y estima duraciones para sus proyectos. Para esto nos proponemos analizar en qué medida la metodología implementada para el desarrollo de cronogramas puede constituirse en una de las principales causas de los atrasos de los proyectos. En particular buscamos analizar como algunas metodologías de desarrollo de cronogramas son ineficientes para captar sesgos de estimación y riesgos de proyecto.

---

<sup>1</sup> Existen varias publicaciones sobre el tema, aquí hacemos referencia específica al artículo “The Economic Folly of Chasing Schedules in Oil Developments and the Unintended Consequences of Such Strategies” publicado por la Society of Petroleum Engineers en el 2012.

Para ello realizamos en el apartado teórico una detallada revisión de los procesos requeridos y las practicas recomendadas para la gestión de tiempos en proyectos. Posteriormente desarrollamos un análisis comparativo de cronogramas y duraciones de proyecto utilizando tres metodologías ampliamente difundidas y aplicadas en la disciplina de gestión de proyectos. Las tres metodologías comparadas tienen asimismo la particularidad de ser la primera totalmente determinista (CPM), la segunda semi-probabilística (PERT) y la tercera totalmente probabilística (Monte Carlo).

Finalmente nos abocamos a aplicar dichos procesos y metodologías en un caso analítico de un proyecto típico del “upstream” en la industria del Oil and Gas. A partir de los resultados obtenidos identificamos en qué medida la aplicación de Monte Carlo en el modelado del cronograma provee a las organizaciones de una valiosa herramienta para la determinación de la duración esperada de los proyectos, el análisis de los riesgos presentes y estrategias para mitigarlos, la definición de objetivos, la evaluación de performance y la toma de decisión.

### **Palabras Clave**

PMBOK, Monte Carlo, CPM, PERT, Cronograma, Distribución, Sesgo, Riesgo, Actividad, Compresión, Ramificación, Valor Esperado, Escenario, Estimación, Probabilístico, Determinista.

## ABSTRACT

The fact that the overwhelming majority of Oil and Gas construction projects around the globe suffer from schedule slippage is not breaking news. Recent publications<sup>2</sup> indicate that in particular the Oil and Gas industry has a specific tendency to define aggressive schedules in terms of duration when compared with previous similar projects or other industry sectors. Aggressive schedules are primarily driven by a “quicker first oil, improved Net Present Value (NPV)” philosophy

On the contrary, a statistical analysis of previous projects indicate that those with aggressive schedules tend to be the ones that exhibit the greatest NPV loss, measured as the difference between promised NPV when the project was approved and real NPV when it finished. In particular NPV loss is not only due to acceleration increased costs or late start up lost production, but also as a result of poor reservoir and facilities engineering performed during the initial stages due to excessive reduced duration of those activities. This phenomenon leads to the adage “speed kills!” and also “go slow to go fast”

Most publicly traded Oil companies experience bullish periods after a new oil discovery is announced. In this scenario the good news is typically followed by a first oil production promised day. In the present work we aim to answer if most of the NPV damage that Oil companies see in their delayed projects can be explained in part by the methods used to measure and assign schedule duration. We aim to analyze the degree in which the methodology followed during schedule development is accountable for the delays experienced. In particular we aim to understand how some methodologies for schedule development are inefficient to capture estimation biases and project risks.

In order to accomplish our goal we perform a detailed review of the processes and best practices recommended in the discipline of project time management. We then develop a comparative analysis of schedules and estimated project durations using three distinctive and well known methodologies used in project management. The three methodologies are

---

<sup>2</sup> There are many publications on this subject, here we refer to one specific paper “The Economic Folly of Chasing Schedules in Oil Developments and the Unintended Consequences of Such Strategies” published by the Society of Petroleum Engineers in 2012.

one fully deterministic (CPM), one semi probabilistic (PERT) and one fully probabilistic (Monte Carlo).

Finally we apply these processes and methodologies reviewed on the theoretical part of this thesis on a typical upstream oil and gas project. Through the detail analysis of results we identify to which extent performing schedules using Monte Carlo can also provide the organizations with a valuable tool for project duration estimation, project risk analysis and mitigation, goal setting, performance measurement and decision making.

### **Key Words**

PMBOK, Monte Carlo, CPM, PERT, Schedule, Distribution, Bias, Risk, Activity, Compression, Branching, Expected Value, Scenario, Estimation, Probabilistic, Deterministic.

## INDICE

<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>9</b>
<b>CAPITULO I - GESTION DE TIEMPOS EN PROYECTOS Y DETERMINACIÓN DE DURACIÓN DE ACTIVIDADES.....</b>	<b>12</b>
1. PROCESOS DE GESTIÓN DE TIEMPOS DE PROYECTO .....	12
1.1 <i>Planificar la Gestión del Cronograma (Proceso 1)</i> .....	13
1.2 <i>Definir de Actividades (Proceso 2)</i> .....	13
1.3 <i>Secuencia de Actividades (Proceso 3)</i> .....	14
1.4 <i>Estimar Recursos por Actividad (Proceso 4)</i> .....	16
2. ESTIMAR DURACIÓN DE ACTIVIDADES (PROCESO 5) .....	16
2.1 <i>Metodologías para la estimación de duración de Actividades</i> .....	18
2.2 <i>Juicio de Expertos</i> .....	19
2.3 <i>Estimación por Análogos</i> .....	21
2.4 <i>Estimación paramétrica</i> .....	22
2.5 <i>Estimación de Tres Puntos</i> .....	22
2.6 <i>Decisión de Grupo</i> .....	24
2.7 <i>Análisis de Reserva</i> .....	25
3. RIESGOS EN LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE DURACIÓN DE ACTIVIDADES .....	26
3.1 <i>Sesgos presentes durante la determinación de duración de actividades</i> .....	27
<b>CAPITULO II - METODOLOGÍAS DETERMINISTAS DE DESARROLLO DE CRONOGRAMA .....</b>	<b>30</b>
1. CRITICAL PATH METHOD (CPM).....	30
2. PROJECT EVALUATION AND REVIEW TECHNIQUE (PERT) .....	34
<b>CAPITULO III - METODOLOGÍA DE MONTE CARLO APLICADA AL DESARROLLO DE CRONOGRAMA .....</b>	<b>42</b>
1. MÉTODO MONTE CARLO.....	42
1.1 <i>Análisis del Sesgo de Convergencia (Merge Bias)</i> .....	47
1.1.1 <i>Índice de Criticidad (CI)</i> .....	51
1.1.2 <i>Índice de Significancia (SI)</i> .....	52
1.1.3 <i>Índice de Crucialidad (CRI)</i> .....	53
1.1.4 <i>Índice de Sensibilidad del Cronograma (SSI)</i> .....	54
1.2 <i>Ramificación Probabilística (Probabilistic Branching)</i> .....	57
1.3 <i>Drivers de Riesgo (Risk Drivers)</i> .....	62
1.3.1 <i>Riesgos con probabilidad de ocurrencia del 100%</i> .....	63
1.3.2 <i>Riesgos con probabilidad de ocurrencia menor al 100%</i> .....	65
1.3.3 <i>Combinación de riesgos sobre una misma actividad</i> .....	66
1.4 <i>Ramificación Condicional (Conditional Branching)</i> .....	69
1.5 <i>Correlación entre actividades</i> .....	73
1.5.1 <i>Signo y Fuerza de la correlación entre actividades</i> .....	73
1.5.2 <i>Modelado de correlación y efecto en el cronograma</i> .....	74
<b>CAPITULO IV – ANALISIS DE CASO: CAMISEA WELL HEAD COMPRESSION PROJECT 2021 (WHCP21) .....</b>	<b>76</b>

1.	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO WHCP21 .....	76
1.1	<i>Breve resumen de Camisea</i> .....	76
1.2	<i>Proyectos de Compresión de Pozo (WHCP)</i> .....	77
1.3	<i>¿Por qué elegimos WHCP21 para modelar Monte Carlo?</i> .....	78
1.4	<i>Alcance del proyecto WHCP21</i> .....	81
2.	DESARROLLO DE PROCESOS DE PTM PARA WHCP21 .....	83
2.1	<i>Planificar la Gestión del Cronograma (Proceso 1)</i> .....	83
2.1.1	<i>Modelo de Cronograma</i> .....	83
2.1.2	<i>Nivel de estimación de duración de actividades</i> .....	84
2.1.3	<i>Unidades de Medida</i> .....	85
2.1.4	<i>Fecha de inicio</i> .....	85
2.2	<i>Definir Actividades (Proceso 2)</i> .....	85
2.2.1	<i>Ingeniería</i> .....	87
2.2.2	<i>Compras</i> .....	87
2.2.3	<i>Fabricación</i> .....	87
2.2.4	<i>Logística</i> .....	88
2.2.5	<i>Construcción</i> .....	89
2.2.6	<i>Transferencia a la Operación</i> .....	89
2.2.7	<i>Agrupamiento de Actividades</i> .....	90
2.3	<i>Secuencia de Actividades (Proceso 3)</i> .....	92
2.3.1	<i>Secuencia de actividades generales</i> .....	93
2.3.2	<i>Secuencia de actividades del contrato de compresores</i> .....	94
2.3.3	<i>Secuencia de actividades del contrato de Construcción (EPC)</i> .....	94
2.3.4	<i>Secuencia de actividades del contrato de EPC</i> .....	95
2.4	<i>Estimar Duración de Actividades (Proceso 5)</i> .....	96
2.5	<i>Desarrollo de Cronograma (Proceso 6)</i> .....	100
2.5.1	<i>Microsoft Project</i> .....	100
2.5.2	<i>Oracle Crystal Ball</i> .....	101
2.5.3	<i>Polaris (Booz – Allen – Hamilton)</i> .....	104
2.5.4	<i>Risky Project (Intaver Institute)</i> .....	106
2.6	<i>Optimización del Cronograma</i> .....	107
2.6.1	<i>Ventana de Navegación – Transporte de Compresores</i> .....	108
2.6.2	<i>Temporada Seca – Obra Civil</i> .....	111
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y APLICACIONES .....	115
3.1	<i>Comparativa de metodologías CPM, PERT y Monte Carlo</i> .....	115
3.1.1	<i>Critical Path Method (CPM)</i> .....	115
3.1.2	<i>Project Evaluation and Review Technique (PERT)</i> .....	116
3.1.3	<i>Monte Carlo</i> .....	117
3.2	<i>Aspectos económicos y de control de gestión</i> .....	118
3.2.1	<i>Duración esperada y valor esperado para el análisis de acciones</i> .....	119
3.2.2	<i>Control de gestión y excelencia</i> .....	123
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>126</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>132</b>
	<b>GLOSARIO</b> .....	<b>134</b>



## INTRODUCCION

Desde mediados del 2014 la industria del Oil and Gas se ha visto enfrentada a una abrupta caída del precio del barril de petróleo, su principal producto. En este contexto de menor rentabilidad una gran mayoría de los proyectos de inversión fueron postergados y aquellos que han sido aprobados para ejecución son más sensibles a sobrecostos y atrasos por lo que requieren de excelencia en la gestión para efectivamente aumentar el valor de las compañías.

Sin embargo la estadística publicada sobre proyectos a nivel mundial indica que solo una pequeña fracción de los mismos logra completarse en tiempo y dentro del presupuesto. En esta época de amplio acceso a la información y donde abundan las herramientas de estimación y software especializado, no pareciera que los proyectos han ganado en certidumbre particularmente en cuanto a plazo de ejecución.

En esta tesis nos concentramos específicamente en la gestión de tiempos de proyectos, revisando la metodología y procesos que propone el Project Management Institute (PMI) para elaborar y gestionar cronogramas de proyectos. A partir de los procesos básicos definidos en la guía de proyectos del PMI nuestro **objetivo** es, en primer lugar, establecer los requerimientos mínimos que deben cumplirse para asegurar la calidad del cronograma de proyecto desarrollado. Es decir, se trata de evaluar bajo qué circunstancias la definición de actividades, su secuencia lógica, el grado de actividades en paralelo y la estimación de duraciones, podrían generar un cronograma que no solo resulte inadecuado para estimar la duración total del proyecto sino que también provea información sesgada y errónea, lo que impediría la eficiente toma de decisión al Project Manager y la organización toda.

Para identificar mejor los sesgos y falencias en la estimación de duración del proyecto en esta tesis nos proponemos como **objetivo**, en segundo lugar, realizar un análisis comparativo de tres metodologías muy difundidas para el desarrollo de cronogramas de proyecto. Las tres metodologías utilizadas buscan visualizar en qué grado el uso de herramientas de probabilidad en el desarrollo de cronogramas de proyecto mejoran la calidad de estimación y potencian las chances de éxito del proyecto. Las tres metodologías

aplicadas son Critical Path Method (CPM), Project Evaluation and Review Technique (PERT) y Simulación de Monte Carlo dado que permiten cubrir el espectro desde la visión determinista de la estimación de duración del proyecto hasta la visión totalmente probabilística de estimación de duración del proyecto.

Sobre la temática de desarrollo de cronogramas utilizando simulación de Monte Carlo, también identificado en el ámbito de la gestión de proyectos como análisis de riesgo de cronogramas, nos apoyamos en el trabajo realizado por David Hulett en su libro “Practical Schedule Risk Analysis” (2009) el cual consideramos la fuente más completa disponible sobre la materia. Otra fuente importante de consulta fue el trabajo realizado por Mario Vanhoucke con su libro “Project Management with Dynamic Scheduling” (2013) por su acercamiento a la temática centrado en la gestión de proyectos. Asimismo retomamos trabajos de tesis desarrollados por Nepal (2014), Rodriguez (2012) y Pérez (2007), que trabajan las metodologías de gestión de tiempos y el uso de simulación de Monte Carlo.

En general detectamos que los trabajos publicados sobre la materia utilizan ejemplos sumamente simples para ejemplificar el uso de Monte Carlo y no trabajan plenamente el proceso de optimización del cronograma en base a los resultados de la simulación de Monte Carlo ni las aplicaciones que puede tener como herramienta de control de gestión o toma de decisiones. Estos dos temas nos parecieron centrales de tratar en nuestra tesis y en esa dirección hemos querido enfocar nuestro trabajo.

En esta investigación nos han guiado las siguientes **preguntas** sobre aspectos referidos a la aplicabilidad de Monte Carlo y posibles usos en la gestión: ¿En qué medida es práctico usar simulación de Monte Carlo para el desarrollo de cronogramas en proyectos reales? ¿Qué herramientas existen y cuan complejo puede ser el modelado de un cronograma real de proyecto con Monte Carlo? ¿Cómo puede el equipo de proyecto extraer valor y redefinir la estrategia del proyecto a partir del análisis de cronograma con Monte Carlo? ¿Cuáles son los usos de Monte Carlo como herramienta de medición, definición de indicadores y metas en la gestión? y ¿Cómo podemos aplicar Monte Carlo para la toma de decisión y estimación de valor esperado?

La **hipótesis** de esta tesis es que la simulación de cronogramas con Monte Carlo es una herramienta que agrega gran valor a la gestión de proyectos, que permite adecuadamente modelar y mitigar riesgos, y que permite definir la mejor estrategia en términos de valor esperado para el proyecto. En lo que respecta a su aplicabilidad, sostenemos que el método de simulación de cronogramas con Monte Carlo es una técnica madura que cuenta con gran cantidad de herramientas de software disponibles para su aplicación, y que las organizaciones no requieren de especialistas en la materia de probabilidad y estadística para aplicar Monte Carlo a sus proyectos. En este sentido nos proponemos validar que Monte Carlo tiene una excelente relación Costo – Beneficio para la gestión de proyectos en organizaciones.

Esta tesis tiene una primera parte teórica (Capítulos I, II y III) que busca introducir al lector en los procesos de gestión de tiempos y en las metodologías de desarrollo de cronogramas aplicadas. En esa primera parte utilizamos un ejemplo simple de una secuencia de actividades para mostrar la aplicación de las metodologías.

Posteriormente en el Capítulo IV, de carácter analítico, nos enfocamos en la parte central del análisis para validar nuestra hipótesis desarrollando un ejemplo de proyecto más complejo de la industria del Oil and Gas. En este proyecto existen un mayor número de actividades y secuencias de contratos en paralelo así como determinadas condiciones temporales (ventanas de tiempo) donde ciertas actividades deben ser desarrolladas. Este ejemplo permite visualizar claramente el valor agregado del uso de Monte Carlo en el análisis de cronogramas de proyectos.

Por último presentamos las conclusiones de nuestra investigación, en donde resumimos los aspectos diferenciadores de Monte Carlo como herramienta para el desarrollo de cronogramas de proyectos respecto a los otros modelos analizados. En este apartado buscamos particularmente enfatizar en qué grado la aplicación de esta metodología también puede significar una ventaja para las organizaciones en lo que refiere a la toma de decisiones, el control de gestión y la medición de performance., temas centrales del programa del MBA.

## **CAPITULO I - GESTION DE TIEMPOS EN PROYECTOS Y DETERMINACIÓN DE DURACIÓN DE ACTIVIDADES**

### **1. Procesos de Gestión de Tiempos de Proyecto**

La gestión de tiempos de proyectos (en inglés Project Time Management, PTM) es una disciplina central de la gestión de proyectos. La Guía PMBOK 5ta edición del Project Management Institute describe en su capítulo 6 los procesos requeridos para manejar los tiempos de un proyecto determinado.

A continuación listamos los procesos identificados en el PMBOK dentro de la disciplina PTM:

1. Planificar la Gestión del Cronograma
2. Definir Actividades
3. Secuencia de Actividades
4. Estimar Recursos por Actividad
5. Estimar Duración de Actividades
6. Desarrollo de Cronograma
7. Control del Cronograma

La guía PMBOK ha sido incluida dentro del cuerpo de estándares de la American National Standards Institute (ANSI) y está previsto que para el primer trimestre del 2017 se publique la sexta edición. Dado que constituye una práctica recomendada de la gestión de proyectos, con reconocimiento y aceptación a nivel mundial, nosotros utilizaremos el marco de estos siete procesos como guía para el desarrollo de nuestra tesis.

Como se indicó en la introducción, un objetivo central de esta tesis consiste en analizar la aplicación de simulación de Monte Carlo al desarrollo de cronogramas proyecto, en particular en la industria del Oil and Gas, y comparar los resultados obtenidos a los resultados derivados de la aplicación de metodologías deterministas como CPM y PERT. Consideramos indispensable para asegurar el cumplimiento de dicho objetivo dedicar una

parte importante del trabajo al análisis y desarrollo de los procesos indicados arriba, particularmente consideramos que son esenciales los procesos de Estimar Duración de Actividades (proceso 5) y Desarrollo de Cronograma (proceso 6).

En este capítulo haremos una revisión teórica breve de los primeros cuatro procesos y un detalle específico del proceso Estimar Duración de Actividades (proceso 5). Respecto al proceso 5 realizamos una descripción de las técnicas disponibles para estimar tiempos de actividades y de las dificultades que afronta el equipo de proyecto para su determinación dada una serie de incertidumbres y sesgos que existen. En el capítulo II y III de esta tesis nos abocaremos a la descripción de las metodologías determinísticas y probabilísticas para el Desarrollo de Cronogramas (Proceso 6).

Todos los procesos de PTM serán luego aplicados en esta tesis en el capítulo IV como parte del desarrollo y evaluación comparativa del cronograma de un proyecto típico de la industria del Oil and Gas, específicamente nos referimos a la instalación de una planta compresora de gas natural a localizarse en una zona remota con grandes desafíos logísticos como lo es la selva amazónica peruana.

### **1.1 Planificar la Gestión del Cronograma (Proceso 1)**

Este primer proceso tiene por objetivo determinar el modelo de gobierno del cronograma durante todo el proyecto. En particular establece la metodología a aplicar para el desarrollo, monitoreo y control del cronograma.

En este proceso se definen, entre otras cosas, elementos claves para el desarrollo del cronograma como la metodología a aplicar, rango de certidumbre requerido en duración de actividades, unidades de medida y parámetros de control para los cuales debe generarse alguna acción correctiva.

### **1.2 Definir de Actividades (Proceso 2)**

Este proceso tiene como entrada el alcance específico de proyecto y una apertura de los entregables del proyecto en paquetes de trabajo conocido como Work Breakdown Structure (WBS).

A partir de estos elementos el proceso tiene por objetivo identificar y documentar las actividades que deben realizarse para producir cada paquete de trabajo.

Los entregables de este proceso deben ser una lista de todas las actividades identificadas para el desarrollo del proyecto y una lista de eventos específicos o hitos. La lista de actividades debe incluir para cada una de ellas un identificador, atributos específicos y una descripción del alcance de trabajo.

### 1.3 Secuencia de Actividades (Proceso 3)

Este proceso tiene por objetivo identificar y documentar las relaciones que vinculan las actividades del proyecto.

Para realizar este proceso existen metodologías gráficas que permiten representar las actividades de acuerdo a la secuencia y el tipo de relación lógica de dependencia que existen entre ellas en el proyecto. Los métodos gráficos más comunes son:

- **Diagrama de Precedencia:** Consiste en una representación gráfica donde las actividades se presentan como nodos que están unidos por las relaciones lógicas y de acuerdo a su secuencia de desarrollo. Este método gráfico permite incluir una serie de información clave sobre cada actividad como la duración y holgura. Generalmente este diagrama es el más utilizado por los programas de software de desarrollo de cronogramas que hay disponibles. Un ejemplo de este tipo de diagrama se incluirá dentro del capítulo IV de esta tesis.
- **Diagrama de Flechas:** En este tipo de representación se consideran las actividades como flechas y los hitos como nodos. En general esta metodología presenta mayores limitaciones que los Diagramas de Precedencia para graficar dependencias y demoras.

Existen cuatro tipos de relaciones lógicas entre actividades, las mismas son:

- **Final a Inicio (Finish to Start, FS):** Relación lógica que determina que la actividad sucesora solo puede iniciarse cuando se termina la predecesora. Este es el tipo más común de relación lógica utilizada en proyectos. Un ejemplo es la relación entre el

transporte de un equipamiento al sitio donde se ejecuta la obra y el inicio del montaje mecánico de dicho elemento.

- **Final a Final (Finish to Finish, FF):** Relación lógica que determina que la actividad sucesora solo puede finalizarse cuando se finalice la predecesora. Un ejemplo de esta relación es la necesidad de finalizar los estudios de riesgo de procesos (HAZOP) para poder dar por finalizada la ingeniería del proyecto.
- **Inicio a Inicio (Start to Start, SS):** Relación lógica que determina que la actividad sucesora solo puede iniciarse cuando se ha iniciado la actividad predecesora. Un ejemplo es la relación entre el inicio de la ingeniería de detalle y el inicio de la gestión de compras.
- **Inicio a Final (Start to Finish, SF):** Relación lógica que determina que la actividad sucesora solo puede terminarse cuando se ha iniciado la actividad predecesora.

Por otra parte este proceso debe definir el tipo de dependencia entre las actividades, que puede ser de los siguientes cuatro tipos:

- **Dependencia Obligatoria:** Dependencia fuerte que generalmente se vincula con alguna limitación legal, contractual o física.
- **Dependencia Discrecional:** Dependencia preferencial, que generalmente está vinculada a buenas prácticas de desarrollo de actividades.
- **Dependencia Externa:** Dependencia que generalmente está fuera del control del equipo de proyecto.
- **Dependencia Interna:** Relación que se encuentra dentro del control del equipo de proyecto.

Por último el proceso 3 “Secuencia de actividades” debe determinar si hubiera desfasaje de tiempos entre las actividades con relación lógica. Como ejemplo en una relación Fin a Inicio se puede incluir que la actividad sucesora no empezará sino hasta una semana después que haya finalizado la actividad predecesora. Igualmente en una relación Inicio a Inicio se puede indicar que la actividad sucesora deberá iniciar al menos dos semanas después que la actividad predecesora haya iniciado.

Un ejemplo de este desfasaje de tiempos es el inicio de tareas de las diferentes especialidades de ingeniería. Ingeniería de procesos debe iniciar típicamente los trabajos tres semanas antes para producir las primeras definiciones técnicas del proyecto que permitan iniciar cualquier otra especialidad de ingeniería.

#### **1.4 Estimar Recursos por Actividad (Proceso 4)**

Este proceso permite estimar los recursos que consumirán cada actividad para su desarrollo y cuándo dichos recursos serán necesitados por el proyecto.

El elemento central en este proceso es que provee una lista detallada y optimizada de recursos materiales y humanos requeridos para el desarrollo de cada actividad. Esta información permite mejorar la estimación de la duración de las actividades.

No es el objetivo de este proceso proveer un costeo detallado del proyecto, sino ayudar al desarrollo del cronograma y la determinación de duración de actividades.

#### **2. Estimar Duración de Actividades (Proceso 5)**

Este proceso permite determinar el periodo requerido para el desarrollo de cada actividad y es un elemento central para el desarrollo del cronograma y la gestión de tiempos en proyectos.

Este proceso es también el de mayor grado de incertidumbre dentro de la gestión de tiempos de proyectos dado que las actividades en sí son esencialmente estocásticas por naturaleza y es por lo tanto imposible determinar una duración unívoca (Vanhoucke, 2013). La estimación de duración de actividades conlleva dos tipos de incertidumbres inherentes.

Un primer tipo de incertidumbre es representada como error de estimación derivado del grado de definición que tiene la actividad en el momento de realizarse el cronograma de proyecto. En estimación de tiempos, así como en estimación de costos, el error de estimación es grande en las primeras fases de proyecto donde el desarrollo de la ingeniería en bajo y se reduce a medida que progresa la definición técnica del proyecto.

El cronograma es un documento que debe desarrollarse desde el mismo inicio del proyecto. La fase de ingeniería conceptual es típicamente la primera a realizarse en el marco de un



nuevo proyecto. Al inicio de la misma no existe suficiente desarrollo técnico para sustentar una estimación de duraciones de cada actividad y por lo tanto dicha estimación conlleva un rango de incertidumbre mayor. A medida que el proyecto avanza hacia las fases de Diseño y Ejecución, el cronograma se nutre de mayor detalle y dicho rango de incertidumbre se reduce. Cada fase de desarrollo de proyecto debe incluir dentro de la estimación el rango de confiabilidad (ejemplo -10% a +30% en fases conceptuales).

El segundo tipo de incertidumbre es derivado del riesgo inherente a que ciertos eventos asociados a cada actividad se concreten y los mismos impacten en su duración. Estos riesgos tienen una probabilidad de ocurrencia menor a 100%. En general los riesgos asociados a atrasos son mayores que las oportunidades asociadas a mejoras en los plazos, es por este motivo que la estimación de duración de actividades es mejor descripta por una función de distribución con sesgo positivo (positive skew) es decir con moda a la izquierda de la mediana (Hulett, Practical Schedule Risk Analysis, 2009)

A estas dos incertidumbres en la estimación de la duración de actividades se le puede incluir la variabilidad inherente que conlleva el desarrollo de una actividad determinada, similar a la variabilidad de causa común. Un ejemplo es el riesgo de corrimiento asociado a la productividad de la mano de obra, este riesgo se encuentra presente en cualquier proyecto con un 100% de probabilidad pero no es simple su estimación. Finalmente la incertidumbre en la estimación debido a la subjetividad (sesgos) del estimador, por ejemplo en el optimismo de la terminación temprana o presión ejercida por la organización.

La asignación de duraciones a las actividades que posteriormente se vuelcan en el cronograma puede determinar el éxito o el fracaso del proyecto. Una corriente de pensamiento indica que la tendencia natural lleva a proponer duraciones de actividades con las cuales el equipo de proyecto se siente cómodo, esto implica que los tiempos pueden sobre-estimarse (inflating time estimates) con el objetivo de proveerlas de un tiempo de seguridad y así transformarlas en libres de riesgo. Sin embargo esta práctica rápidamente se constituye en una profecía auto-cumplida y la idea inicial de la existencia de tiempo de seguridad rápidamente desaparece (Vanhoucke, 2013).

Vanhoucke describe el círculo que lleva a esta profecía auto-cumplida de la siguiente forma:

- a. Síndrome del estudiante: Conociendo que una actividad tiene tiempo de seguridad incluido, existe la tendencia natural de esperar hasta el último minuto para realizarla.
- b. Ley de Parkinson: Cuando se conoce que se ha agregado tiempo de seguridad no hay incentivo para acelerar el trabajo por lo que la actividad termina por ocupar el tiempo que se le ha asignado.
- c. Ley de Murphy: Si una actividad puede atrasarse (salir mal) generalmente se va a atrasar. Esto lleva a considerar que siempre se debería haber agregado más tiempo de seguridad que el originalmente considerado.

Por este motivo la complejidad a la que se enfrentan los Project Managers consiste en que para motivar a sus equipos deben hacer estimaciones de tiempo agresivas dado que reconocer en el cronograma los riesgos que pueden alargar la duración de las actividades se transforma rápidamente en tiempo gastado (SAISS, Schedule Allocated Is Schedule Spent)<sup>3</sup>.

Dado que el objetivo para el manejo de cronogramas es el cumplimiento del tiempo del proyecto y no el cumplimiento del tiempo de cada actividad, la aproximación propuesta para la determinación de duraciones de actividades debe considerar tiempos agresivos para las actividades y luego como parte de la gestión del proyecto el manejo de tiempo de seguridad global para el proyecto y no tiempo de seguridad por actividad (Vanhoucke, 2013).

## **2.1 Metodologías para la estimación de duración de Actividades**

En este apartado indicamos en forma general las metodologías recomendadas y los riesgos para la determinación de tiempos de actividades. Mayor detalle se incluirá en el capítulo III sobre Monte Carlo dado que aplican específicamente a esa metodología.

---

<sup>3</sup> SAISS es la analogía en tiempos de la más conocida MAIMS (Money Allocated Is Money Spent). También similar a la ley de Parkinson.

El Project Management Institute ha desarrollado una guía para estimación en proyectos, a la cual hacemos referencia aquí. En forma genérica se consideran las siguientes seis metodologías para la estimación de duración de actividades.

## 2.2 Juicio de Expertos

Esta metodología consiste en la estimación de la duración de las actividades en base a la experiencia y el juicio de expertos. Al respecto, la metodología más recomendada incluye el desarrollo de entrevistas con pasados gerentes de proyectos o referentes que hayan desarrollado determinada actividad en el pasado (SME, subject matter experts).

En la entrevista se deben analizar en particular los escenarios pesimistas y optimistas respecto al desarrollo de cada actividad y la probabilidad que le asigna el entrevistado a dicho escenario. Se debe preferir el formato entrevista al formato de taller (workshop) dado que el primero genera un ámbito de confidencialidad con el entrevistado que permite analizar en mayor detalle los riesgos conocidos y los no conocidos (Hulett, Practical Schedule Risk Analysis, 2009).

Por otro lado los workshops generalmente colocan presión social y conllevan una dinámica de grupo que genera cinco tipos de sesgos en riesgos corporativos (Hillson & Murray-Webster, 2005):

- GroupThink; Un grupo cohesionado prefiere unanimidad y evita el disenso.
- El Factor Moses: Un grupo adopta la perspectiva de riesgo de una persona con influencia en detrimento de las preferencias personales de los individuos.
- Conformidad cultural: Un grupo tiende a tomar decisiones basados en la percepción de la cultura e identidad organizacional.
- Giro al Riesgo: Tendencia del grupo a tomar una actitud más riesgosa que sus individuos.
- Giro a la Cautela: el opuesto de giro al riesgo

Por los motivos listados arriba la metodología recomendada para determinar duración de actividades en base a la consulta a expertos debe hacerse siempre en el modelo de entrevista, garantizando al entrevistado confidencialidad y proponiendo preguntas abiertas

(open ended questions) para que el proceso de la entrevista permita analizar los posibles riesgos presentes. Las entrevistas no deben ser cortas y es recomendable que duren entre dos y tres horas, y se debe instar a los entrevistados a traer información de proyectos pasados que consideren relevante<sup>4</sup>.

En la entrevista se deben repasar los diferentes tipos de riesgos y analizar como impactarían en la duración de las actividades. Para esta actividad el entrevistador debe reconocer que existen estos cuatro tipos de riesgos:

- Los riesgos que sabemos que conocemos (**known knowns**) que en general responden a experiencias en proyectos previos recientes y se los puede capturar durante la entrevista.
- Los riesgos que sabemos que no conocemos en detalle o sobre los que no hemos tenido experiencia previa (**known unknowns**), para los cuales el formato entrevista evita los problemas típicos de workshops. Estos riesgos deben ser identificados claramente durante la entrevista para luego analizar la mejor forma de estimar su impacto.
- Los riesgos que no sabemos que no conocemos (**unknown unknowns**, frase atribuida al ex Secretario de Defensa estadounidense Donald Rumsfeld en 2002) para los cuales Hulett discute que pueden no necesariamente ser riesgos imposibles de conocer sino que todavía no han sido pensados y el formato de entrevistas puede hacerlos aparecer. Para esto el entrevistador debe estar muy atento a capturar ideas que surjan de la entrevista aunque no tengan un formato acabado.
- Los riesgos que no sabemos que conocemos (**unknown knowns**, atribuido al filósofo esloveno Slavoj Zizek en 2004) donde se agrupan los riesgos que conocemos pero intencionalmente evitamos reconocer. En este grupo se encuentran riesgos que generalmente contradicen la posición de la alta gerencia dado que son pesimistas, sensitivos y podrían incluso provocar el cierre del proyecto (Hulett, Integrated Cost-Schedule Risk Analysis, 2011). Para este tipo de riesgos las entrevistas confidenciales son la mejor herramienta para capturarlos.

---

<sup>4</sup> Para mayor detalle sobre cómo organizar las entrevistas recomendamos el capítulo 5 del libro “Practical Schedule Risk Analysis” de David Hulett.

### 2.3 Estimación por Análogos

Esta metodología consiste en la estimación de la duración de las actividades en base a información histórica de proyectos o actividades similares que hayan sido desarrolladas y aplicando algún factor de escala de algún driver significativo entre la actividad histórica y la actividad a estimar.

Esta es la más simple, y generalmente la menos precisa, de las metodologías de estimación. Se la denomina una metodología Top Down ya que parte de información reducida y general para hacer estimaciones de actividades específicas. Suele solo utilizarse cuando el equipo de proyecto considera que existe suficiente similitud entre el proyecto actual y algún proyecto del pasado.

Los tipos de estimación por análogos aplicables a estimación de plazos definidos en el estándar del PMI son los siguientes<sup>5</sup>:

- **Estimación por Ratio:** Esta técnica se la conoce también como factor de capacidad. Según el tipo de actividad se puede considerar que existe una linealidad entre un parámetro relevante del desarrollo de la actividad y la duración de la misma. La determinación de la pendiente de dicha relación depende del tipo de industria y proyecto.

Aunque este tipo de estimación es simple, la misma puede ser de gran potencia y utilidad dada una base de datos de información histórica que justifique la relación utilizada (Rad, 2002).

- **Estimación por Serie de Potencia:** Esta herramienta considera que el ratio de algún atributo específico de la actividad está vinculada con el ratio de duración de la misma bajo una función de potencia. Gráficamente implica que los logaritmos de dichos ratios determinan una línea recta. Al igual que la estimación por ratio, la potencia que vincula los ratios depende del tipo de industria y proyecto.

---

<sup>5</sup> El PMBOK categoriza a la estimación de duración de actividades por el método de tres puntos al mismo nivel que a la estimación por análogos. Sin embargo el Practice Standard for Project Estimating del PMI, que describe mayormente herramientas de estimación de costos, ubica a la estimación por tres puntos y a la estimación por rango dentro de los tipos de estimación de la técnica de análogos. Nosotros no incluimos estimación por rango dado que todas las estimaciones tienen inherentemente incertidumbre y seguimos la línea del PMBOK de clasificar a la metodología de estimación de tres puntos.

Existen dos reglas típicamente usadas, que luego en función de la información historia disponible pueden tener variantes respecto al exponente usado. La regla de tres-cuartos que utiliza un exponente de 0,75 para vincular la relación de capacidades con la relación de costos. La regla de la raíz cuadrada que vincula la relación de costos con la relación de duraciones.

## 2.4 Estimación paramétrica

Esta metodología considera el uso de una base de datos histórica de proyectos detallada con la cual se desarrolla una correlación que vincula la duración con un set de variables estadísticamente significativas<sup>6</sup>.

En la industria de la construcción el modelo predictivo desarrollado generalmente es función de parámetros que describen cantidades físicas de una serie de componentes que hacen a los entregables del proyecto. Ejemplos típicos, aplicables al caso de esta tesis, es la potencia de compresión (medida en MW), peso de los equipos principales (medido en Ton), cantidad de soldadura a realizar estimada (medido en pulgadas).

En la industria del software en general las variables de input describen atributos de performance del entregable tales como velocidad, confiabilidad, error y complejidad del proyecto en adición a atributos de cantidad como tamaño de base de datos o número de líneas (Rad, 2002).

Los métodos más reconocidos son: COCOMO (Constructive Cost Model), FPM (Function point model), UCP (Use Case Points), SLOC (Source Line of Code)<sup>7</sup>.

## 2.5 Estimación de Tres Puntos

Esta técnica permite la estimación de duración de actividades en función de tres escenarios posibles de duración de una actividad definidos como un escenario optimista, uno más

---

<sup>6</sup> En la bibliografía se puede encontrar la palabra Estimación Modular para usos en la industria de la construcción y la palabra Estimación Paramétrica en referencia a la industria del software, ambas palabras hacen referencia al mismo método que aquí llamamos Estimación Paramétrica.

<sup>7</sup> Para ampliar información sobre métodos paramétricos recomendamos consultar el Parametric Estimating Handbook de la International Society of Parametric Analysis en su capítulo 6.

probable y uno pesimista. Esta técnica es también la base de la metodología PERT (Project Evaluation and Review Technique).

Como se indicó anteriormente, la duración de actividades puede representarse como una distribución de probabilidades. La función de distribución tradicional de la metodología PERT es del tipo beta, aunque la técnica de estimación de tres puntos también se ha expandido a otro tipo de distribuciones cuando el equipo de proyecto conoce más detalladamente que tipo de comportamiento tiene la probabilidad de duración de esa actividad.

Para estimar el tiempo de la actividad deben previamente definirse los siguientes tres escenarios:

- **Escenario Optimista ( $T_O$ ):** Esta duración corresponde a una situación donde ninguno de los riesgos que podían impactar sobre la duración de la actividad se han materializado. La definición más adecuada de este escenario determina que es la duración que acumula el 1% de probabilidades.
- **Escenario Pesimista ( $T_P$ ):** Esta duración corresponde al escenario donde la mayoría de los riesgos identificados que afectan la duración de la actividad se han materializado. La definición más adecuada es indicar que corresponde a la duración que acumula el 99% de las probabilidades, es decir que solo el 1% de los escenarios restantes pueden determinar duraciones mayores (Hulett, Practical Schedule Risk Analysis, 2009).
- **Escenario Más Probable ( $T_M$ ):** Esta duración corresponde al escenario más frecuente, y por lo tanto más probable o moda de la distribución, en el que la organización considera esa actividad puede desarrollarse en la actualidad.

En base a estos tres escenarios y considerando que la función de distribución que describe la duración de la actividad es del tipo beta, se puede calcular la duración esperada ( $T_E$ ) con la siguiente ecuación:

$$T_E = \frac{T_O + 4.T_M + T_P}{6}$$

Asimismo se puede describir una distribución de probabilidades del tipo triangular y se obtiene una duración esperada por medio de la siguiente ecuación:

$$T_E = \frac{T_O + T_M + T_P}{3}$$

Como puede evidenciarse, el valor de duración esperada por medio de la aplicación de la técnica de estimación de tres puntos depende fuertemente del tipo de distribución elegida para modelar los tres escenarios. La elección del tipo de distribución beta determina que el tiempo esperado se concentra alrededor del tiempo más probable lo que implica cierta confiabilidad del equipo de proyecto respecto a la estimación más probable. Por el contrario, la elección de una distribución del tipo triangular aleja el valor esperado del valor más probable hacia el valor más pesimista e implica menor confianza en el valor indicado como más probable.

## **2.6 Decisión de Grupo**

Esta técnica busca mejorar las estimaciones realizadas individualmente por los expertos sin caer en los sesgos que, como ya hemos comentado, pueden darse como consecuencia de la estimación por medio de workshops abiertos. Una de las técnicas más conocidas es Delphi que fue desarrollada por RAND corporation en los años 1950. En esta técnica un coordinador lidera una actividad donde un grupo de expertos son invitados a realizar estimaciones en base a la información provista sobre la actividad.

Cada experto realiza su estimación por escrito y anónimamente, no está permitido el intercambio de opiniones entre quienes realizan la estimación o pueden incluso no estar reunidos. Junto con la estimación puede solicitarse a cada experto que identifique los riesgos que fundamentan su estimación.

Luego de realizado el primer round de estimación el coordinador produce un resumen de dichas estimaciones en forma de histograma e indica los riesgos más importantes indicados. Este resumen es luego distribuido a los expertos a quienes se los invita a modificar su estimación si lo creen necesario y proveer una nueva estimación junto con una justificación.



Este proceso iterativo se realiza una serie de veces, típicamente tres, donde la estimación grupal va convergiendo hacia un valor promedio que se toma como estimación.

Alguna variante de Delphi permite que haya algún grado de interacción entre los participantes, donde quienes han tenido estimaciones notablemente menores o mayores se los invita a explicar el motivo de su estimación previo a pasar al próximo round de estimación (Wysocky, 2013).

Una combinación entre la estimación de tres puntos y Delphi es conocida como WideBand Delphi.

## **2.7 Análisis de Reserva**

Esta técnica consiste en analizar los porcentajes de tiempos de seguridad o tiempos de contingencia que se les puede haber incluido a las actividades en su estimación de duración. Como ya se dijo arriba, el agregado de tiempos de seguridad a cada actividad rápidamente se transforma en SAISS, por lo que esta técnica de estimación busca remover esos tiempos de seguridad de las actividades y manejarlo como un tiempo buffer global del proyecto.

Esta técnica es parte del método conocido como Critical Chain / Buffer Management (CC/BM) en la cual se crea una actividad al final de proyecto denominada Buffer (o reserva) que es manejada por el Project Manager. La particularidad de la duración del buffer radica en que es considerablemente menor a la suma de los tiempos de seguridad que se les había asignado a cada actividad dado la naturaleza probabilística de la duración de las actividades. Como ejemplo, en el caso más simple de actividades independientes, si se habían agregado como margen de seguridad un desvío estándar por actividad la suma de los márgenes de seguridad individuales equivalía a la suma de todos los desvíos estándar de todas las actividades en el camino crítico. Sin embargo analizando el problema desde la óptica de una cadena de actividades se obtiene un buffer igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los desvíos estándar de las actividades.

Existen dos reglas prácticas para determinar el buffer del proyecto. Una primera regla, más simple, implica asignar al buffer del proyecto el 50% del tiempo de seguridad removido a cada actividad. El segundo método implica incluir como buffer del proyecto la raíz

cuadrada de la suma de los cuadrados de los márgenes de seguridad removidos de cada actividad (Vanhoucke, 2013)<sup>8</sup>.

### 3. Riesgos en la recolección de información de duración de actividades

La determinación de duraciones de actividades implica que a partir de datos y del uso de las metodologías descritas arriba un grupo de personas de la organización deberán realizar estimaciones y predicciones sobre escenarios y riesgos que pueden materializarse. Esta actividad, si bien se realiza como parte de la determinación de duración de actividades, está fuertemente vinculada a la gestión de riesgos de proyecto dado que los riesgos detectados en los diferentes escenarios deben ser monitoreados y gestionados durante todo el desarrollo del mismo.

La recolección de información y datos históricos, así como la identificación de riesgos para las actividades, es probablemente uno de los procesos más críticos previos a poder definir sus duraciones. Este tema específico es tratado en el PMBOK dentro de la gestión de riesgos de proyecto.

Para desarrollar un adecuado análisis de riesgo del cronograma el proyecto debe obtener la siguiente información asociada a riesgos<sup>9</sup>:

- **Rangos de Impacto:** Esto en general se resume a determinar las duraciones de los escenarios optimista, pesimista y más probable. El punto central aquí es que el rango determinado entre el escenario optimista y pesimista resume el impacto de varios riesgos diferentes que se materializan a la vez, pero no se realiza un análisis específico del impacto de cada riesgo de forma de poder gestionarlos individualmente. Como se indicó anteriormente existen diferentes tipos de incertidumbres asociadas a la estimación y todas deben considerarse e incluirse cuando se determina el rango de impacto.
- **Drivers de Riesgo:** Esta aproximación al análisis de riesgo tiene como premisa que la incertidumbre respecto a la ocurrencia está asociada a los riesgos y no a las actividades.

---

<sup>8</sup> Para mayor detalle sobre CC/BM recomendamos el libro “*Project Management with Dynamic Scheduling*” de Vanhoucke. En capítulo 10 trata tema del Project Buffer.

<sup>9</sup> Mayor detalle sobre estos elementos dentro del Capítulo III.

Los riesgos identificados pueden afectar una o varias actividades del proyecto, de forma que son asignados a las actividades que pueden impactar. El driver de riesgo es por lo tanto un multiplicador que se aplica a la duración de las actividades vinculadas a dichos riesgos cuando estos se materializan.

- **Ramas Probabilísticas:** Como parte de las entrevistas y análisis de datos para determinar los riesgos pueden aparecer casos específicos donde la materialización de un riesgo implica el desarrollo de una serie de actividades que de no materializarse el riesgo no se hubieran realizado. Estos riesgos suelen ser pocos pero muy importantes en la gestión de riesgo, el Project Manager probablemente no los incluye dentro del cronograma base que distribuye en la organización dado que puede transmitir al equipo de proyecto y a la organización un mensaje de posible fracaso.

De esta forma dentro de un cronograma detallado puede existir una ramificación probabilística, cada rama con una probabilidad de ocurrencia y actividades diferentes. En la medida en que su probabilidad de ocurrencia no es despreciable, al ser analizados dentro de Monte Carlo estos riesgos pueden generar distribuciones bimodales de duración de proyecto.

- **Coefficientes de correlación:** Si se considera que la incertidumbre está en los riesgos y no en las actividades y que los riesgos pueden aplicarse a varias actividades de un mismo proyecto se debe aceptar que las actividades no son independientes necesariamente, sino que están de algún modo correlacionadas entre sí.

El efecto de la correlación entre actividades suele acentuar tanto los ahorros de tiempo como los atrasos (oportunidades y riesgos) en proyectos respecto a la hipótesis de independencia.

### 3.1 Sesgos presentes durante la determinación de duración de actividades

Como se indicó anteriormente, la fuente más importante de información para la determinación de duración de actividades se obtiene de entrevistas a expertos (SME). Durante todo este proceso los entrevistados deben realizar estimaciones de riesgos y rangos en general basándose en heurísticos como las reglas del dedo gordo (rules of thumb). El equipo de proyecto debe saber por lo tanto que existen una serie de sesgos que pueden

darse a consecuencia de la estimación basados en heurísticos para, de ser necesario, corregir dichas estimaciones.

A continuación describimos un resumen de las dos categorías de sesgos y los tipos que más se encuentran durante las entrevistas con expertos<sup>10</sup>:

- **Sesgos Motivacionales:** Están asociados a la situación personal y el contexto en el que se encuentra el entrevistado. Refieren al impacto en la estimación de los riesgos que suele darse dentro del contexto de organizaciones que no tienen dentro de su cultura el hábito de promover el análisis abierto y franco de los riesgos existentes en proyectos. En este contexto un experto consultado sobre duración de actividades puede sentir presión de la organización o del equipo de proyecto para dejar de lado riesgos o subestimarlos. Todo análisis que realice el experto consultado puede contradecir las premisas hasta ese momento consideradas en el cronograma del proyecto. Algunos sesgo más comunes dentro de este grupo son el sesgo de confirmación (Confirmation Bias) y el sesgo de pensamiento optimista (Wishfull Thinking).
- **Sesgos Cognitivos:** Están asociados a como los individuos procesan la información y distorsiones en la estimación que violan reglas de probabilidad. Los sesgos cognitivos que pueden aparecer durante las entrevistas son varios y están asociados a que las personas naturalmente producen estimaciones deterministas en vez de rangos de estimaciones como requiere el análisis de duraciones. Los sesgos más importantes son:
  - **Sesgo de Insensibilidad al Tamaño de la Muestra (Insensitivity to Sample Size Bias):** Es la tendencia según la cual, frente a la pregunta sobre el rango entre el escenario optimista y pesimista, los entrevistados suelen responder valores asociados a un grupo grande de actividades o rangos de proyectos pasados. Como ya se explicó en la estimación por análisis de reserva, dadas las características probabilísticas de la duración de actividades, para obtener un rango determinado en un gran grupo de

---

<sup>10</sup> Una descripción aplicada al tema de cronogramas se encuentra en el libro “*Practical Schedule Risk Analysis*” de David Hulett. Mayor detalle sobre sesgos en el libro “*Thinking Fast and Slow*” de Daniel Kahneman.

actividades o proyectos, se requieren rangos todavía mayores en las actividades individuales.

- **Sesgo de Anclaje (Anchoring Bias):** Este sesgo suele darse dado que la estimación del experto siempre parte de un valor que sirve como ancla. Ese valor puede ser la duración indicada en el cronograma base, entregada como input para la entrevista, o en casos de riesgos específicos y de ramificación probabilística, la idea de que existe cero probabilidad de falla de un test.
- **Sesgo de Disponibilidad (Availability Bias):** Este sesgo aparece en las entrevistas dado que para la estimación los entrevistados suelen buscar en su memoria situaciones pasadas. Suelen entonces tener preponderancia las situaciones traumáticas, lo que lleva a una sobre-estimación del riesgo en proyectos similares.
- **Sesgo de Exceso de Confianza (Overconfidence Bias):** Es la tendencia a considerar que el proyecto actual representa un ejemplo de éxito aunque la historia muestra que la gran mayoría de los proyectos se han excedido en el pasado.

Respecto al manejo de la información capturada dentro de las entrevistas existen metodologías para eliminar muchos de esos sesgos durante el proceso<sup>11</sup>.

En particular para ajustar rangos estrechos entre escenarios optimistas y pesimistas, en caso de que el entrevistador considere que los valores provistos no responden a los verdaderos escenarios optimistas y pesimistas sino a escenarios optimistas con probabilidades mayores a 1% y pesimistas menores a 99%, existe en muchos software de riesgo la opción de la distribución trigén, la cual genera una distribución triangular entre valores diferentes a los extremos.

---

<sup>11</sup> Gilberto Montibeller (2015) indica en su artículo “Cognitive and Motivational Biases in Risk and Decision Analysis” opciones para eliminar los sesgos durante las entrevistas.

## CAPITULO II - METODOLOGÍAS DETERMINISTAS DE DESARROLLO DE CRONOGRAMA

En este apartado incluiremos la descripción de dos metodologías utilizadas para el Desarrollo de Cronogramas de proyecto (Proceso 6 del PTM). Ambas metodologías son de amplia aceptación y uso en la actualidad, siendo la base de desarrollo de cronogramas en la mayoría de las empresas que desarrollan proyectos.

La primera metodología que analizaremos se denomina Método de Camino Crítico (CPM, por sus siglas en inglés) y es de tipo totalmente determinista. La segunda metodología se denomina PERT y es de tipo semi-probabilística.

Estas dos metodologías serán el punto de comparación con un método totalmente probabilístico como es Monte Carlo.

### **1. Critical Path Method (CPM)**

La metodología de camino crítico es todavía hoy la más utilizada en la gestión de cronogramas de proyecto. Fue desarrollada en 1957 por M. Walker de DuPont y J. Kelley de Remington Rand en base a trabajos que se habían desarrollado en esas compañías durante el proyecto Manhattan la década anterior.

El CPM es una metodología determinista de desarrollo de cronogramas en cuanto toma para cada actividad un valor específico de duración y no un rango o una distribución de duraciones. Mediante el análisis de la secuencia de actividades definida en los procesos previos de PTM se pueden graficar los diferentes caminos de actividades vinculadas que llevan al desarrollo del proyecto e incluir para cada actividad su duración. Se define entonces como camino crítico a la secuencia de actividades cuyas duraciones sumadas determina la mayor duración del proyecto.

La metodología de camino crítico permite estimar para todas las actividades del proyecto los tiempos más tempranos posibles de inicio (ES) y finalización de cada actividad (EF),

los tiempos más tardíos de inicio (LS) y finalización de cada actividad (LF) y la holgura (S) o tiempo que puede atrasarse el inicio de una actividad sin impactar la duración global del proyecto (Nepal, 2014). Incluimos aquí la estructura grafica típica para describir estos parámetros para cada actividad:

Inicio Temprano (ES)	Duración (D)	Fin Temprano (EF)
ACTIVIDAD 1		
Inicio Tardío (LS)	Holgura (S)	Fin Tardío (LF)

El camino crítico es también la duración mínima que el proyecto puede tener ya que parte de la premisa que no existe holgura entre actividades comprendidas dentro del camino crítico y por lo tanto la prolongación en duración de cualquiera de las actividades de ese camino implicará una prolongación de la duración de todo el proyecto.

Para la determinación de los parámetros de cada actividad (ES, EF, LS, LF, S) a partir de la duración y la secuencia definida deben realizarse una serie de cálculos simples que se conocen como paso hacia adelante (forward pass) y paso hacia atrás (backward pass).

- **Paso hacia adelante:** Este análisis se utiliza para determinar los tiempos tempranos de inicio y fin de cada actividad. Se parte de la fecha de inicio del proyecto como inicio temprano de la primera actividad y se suma la duración de la misma para obtener la fecha de fin temprana de dicha actividad.

La fecha de inicio temprana de las siguientes actividades es igual a la mayor fecha de finalización temprana de todas sus actividades precedentes (o fecha de inicio temprana sumada su duración):

$$ES_j = \max(EF_{ij}) = \max(ES_{ij} + d_i); \forall i$$

Donde  $j$  es la actividad cuyas predecesoras son todas las  $ij$  actividades.

- **Paso hacia atrás:** Este análisis se utiliza para determinar los tiempos tardíos de inicio y fin de cada actividad. Se parte de la fecha de fin de proyecto que se obtiene del paso hacia adelante y se define como fecha final tardía. A esta fecha se le restan las duraciones para obtener la fecha de inicio tardía de cada actividad. En forma

genérica la fecha de finalización tardía de una actividad será igual a la menor fecha de inicio tardío de sus actividades sucesoras (o fecha de finalización tardía menos su duración).

$$LF_i = \min(LS_{ij}) = \min(LF_{ij} - d_i); \forall j$$

Donde  $i$  es la actividad cuyas sucesoras son todas las  $ij$  actividades.

- **Determinación de Holgura:** Luego de realizado el paso hacia adelante y hacia atrás donde se determina para cada actividad del proyecto sus fechas tempranas y tardías de inicio y fin, se puede determinar cuál es el grado de retraso o de flotación que puede llegar a tener una actividad sin impactar en la fecha final del proyecto.

El cálculo de holgura para una actividad se define como:

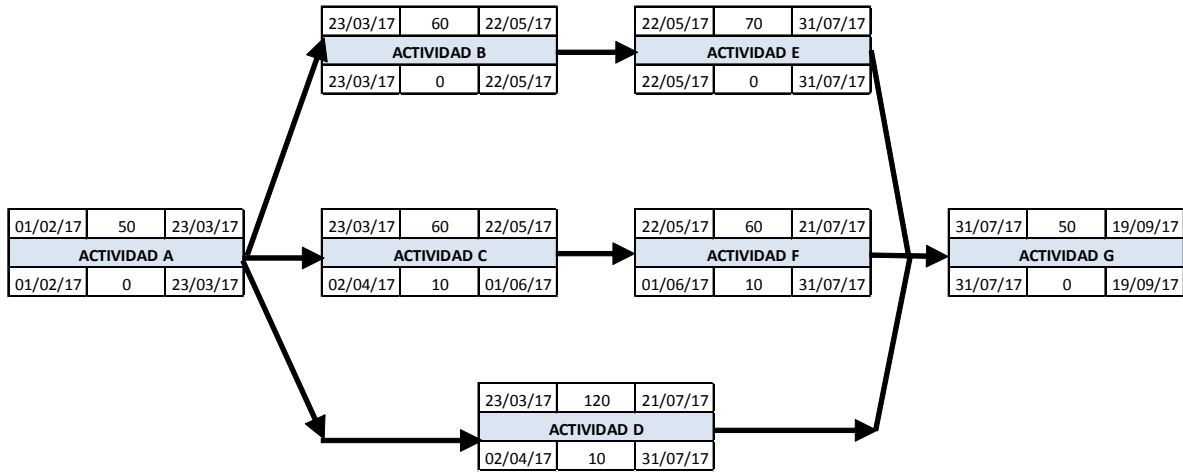
$$S = LF_i - EF_{ij} = LS_i - ES_i$$

- **Determinación de Camino Crítico:** Una vez finalizado el cálculo de las holguras de todas las actividades se determina cuales de ellas son las que tienen holgura igual a cero. Dichas actividades son aquellas que no pueden atrasarse sin impactar en la fecha de finalización del proyecto, por lo que se las define como actividades críticas. La secuencia de actividades con holgura cero constituye el camino crítico.

En el gráfico incluido a continuación proponemos un ejemplo simple de un proyecto con tres ramas en paralelo. Todas las actividades fueron vinculadas con una relación lógica Finish-Start. La actividad G por lo tanto solo puede iniciarse cuando se hayan terminado las actividades E, F y D.

La rama que arroja la mayor duración para el proyecto está constituida por la secuencia de actividades A-B-E-G con 230 días y es el camino crítico con todas las actividades en esa rama con holguras igual a cero. Las otras ramas A-C-F-G y A-D-G tienen una duración de 220 días, ambas con alguna actividad con algún valor de holgura positivo.





La determinación de camino crítico en proyectos complejos con cientos de actividades y diferentes relaciones lógicas no es algo tan intuitivo de determinar, por lo que la aplicación de esta metodología permite visualizar cuáles son las actividades que no pueden atrasarse sin impactar en la duración total del proyecto y ayudan a enfocar al Project Manager y al equipo de proyecto en cuáles son aquellas actividades que deben monitorearse en forma cercana y cuyos recursos asignados deben asegurarse sin demoras.

CPM es una metodología de cálculo simple, que no hace necesario el conocimiento de herramientas de probabilidad y estadística, y que fácilmente puede volcarse en formatos gráficos amigables útiles para presentación de planes de proyecto y análisis de avance.

La mayor desventaja de CPM es que, en tanto metodología determinista, no incluye dentro del análisis el factor probabilístico asociado a la duración de las actividades. En ese sentido el equipo de proyectos puede enfocarse en controlar de forma cercana las actividades que se identificaron dentro del camino crítico sin considerar que existen actividades no críticas pero con muy alta probabilidad de atraso, lo que puede determinar un cambio en el camino crítico del proyecto. Este tema es considerado por las metodologías probabilísticas que veremos luego por medio de la determinación de índices de criticidad de actividades, por ejemplo.

Otro de los puntos que CPM no considera adecuadamente es el riesgo incremental asociado a la presencia de muchas cadenas de actividades en paralelo en un proyecto, es decir, la reducción de la probabilidad de terminación en una fecha determinada cuando existen varias actividades que en simultáneo deben terminar para poder dar inicio a la actividad

donde ellas confluyen. Esto también se verá en detalle dentro del modelo Monte Carlo como sesgo de convergencia (merge bias).

En nuestro ejemplo puede verse fácilmente cómo las tres ramas de actividades tienen duraciones respectivas de 230 días (A-B-G-E) y 220 días (A-C-F-G) y (A-D-G). Aunque el camino crítico está dado por la secuencia A-B-G-E es fácil ver que si las actividades C, F y D tienen una considerable probabilidad de atrasarse es factible que dicho atraso haga cambiar el camino crítico del proyecto a otra rama de actividades.

## **2. Project Evaluation and Review Technique (PERT)**

Esta metodología para el desarrollo de cronogramas, en lo que respecta al cálculo de tiempos y holguras, es muy similar a la metodología CPM. Esto ha determinado que se generalice la sigla CPM/PERT aunque los métodos tienen diferencias muy importantes (Vanhoucke, 2013).

PERT fue desarrollado en 1958 por la compañía consultora Booz Allen Hamilton para el proyecto Polaris de la Fuerza Armada de Estados Unidos. La compañía ya desde 1940 tuvo una participación muy activa como consultora de la Fuerza Armada en asistirle a desarrollar transformaciones de gestión y así prepararla para afrontar la Segunda Guerra Mundial.

CPM y PERT fueron desarrolladas prácticamente al mismo tiempo, sin embargo mientras que CPM es totalmente determinista, ya que no considera el riesgo como variable de cálculo, la metodología PERT incursiona parcialmente en la inclusión de la incertidumbre para el cálculo de la duración de las actividades (Nepal, 2014).

El método PERT se basó en un método estadístico conocido como Método de los Momentos (MOM) que permite de forma relativamente simple obtener parámetros de distribuciones a partir de la resolución de ecuaciones de momento generadas a partir de una muestra. Específicamente PERT supone que la duración de las actividades se pueden representar por medio de una distribución beta y los parámetros determinantes de dicha

distribución de duración esperada y desvío estándar pueden determinarse por la aplicación de la metodología de estimación de tres puntos descripta anteriormente.

Las ecuaciones que permiten el cálculo de duración esperada y desvío estándar de la distribución de duración de la actividad son:

Duración esperada:

$$T_E = \frac{T_O + 4 \cdot T_M + T_P}{6}$$

Desvío estándar de la actividad:

$$\sigma_E = \frac{T_P - T_O}{6}$$

A partir de estos parámetros se puede desarrollar una distribución de duración para todo el proyecto y determinar los siguientes parámetros:

- **Duración del Proyecto:** Habiendo determinado la duración esperada para todas las actividades se puede construir el diagrama de secuencia de actividades al igual que se hizo en la metodología CPM y calcular la duración de las diferentes ramas de actividades. La secuencia de actividades de mayor duración constituye la duración esperada del proyecto y el camino crítico del mismo.
- **Desvío Estándar de la duración del proyecto:** Si se considera que hay un número elevado de actividades dentro del camino crítico y que las mismas son independientes entre sí (no correlacionadas) por la Teoría Central del Límite (CLT) se puede considerar que la distribución de duración del proyecto será del tipo Normal incluso aunque las actividades individuales no lo sean. El desvío estándar de la duración del proyecto se puede calcular como:

$$\sigma_{Proyecto} = \sqrt{\sum \sigma_i^2}$$

PERT es una metodología simple que permite, por prácticamente el mismo esfuerzo, obtener mucho más que lo que provee el método CPM en cuanto el equipo de proyecto

cuenta con una distribución de probabilidad de duración del proyecto, lo que habilita la realización de análisis de probabilidades de cumplimiento de ciertas fechas.

Sin embargo, el método PERT tiene una serie de problemas metodológicos asociados al uso de la distribución beta y las ecuaciones para la determinación de la media y el desvío estándar<sup>12</sup>.

El método PERT proclama que describe la duración de actividades como una distribución de probabilidad beta a partir de los tres puntos definidos como escenario optimista (O), más probable (M) y pesimista (P). Sin embargo, dados tres puntos hay infinitas distribuciones beta, muy diferentes entre sí. Para definir completamente el tipo de distribución beta para las actividades se requiere también determinar los parámetros de forma ( $\alpha$  y  $\beta$ ). Los programas de software disponibles han definido los parámetros de forma para el tipo de distribución usada en este método, que típicamente se denomina Beta PERT.

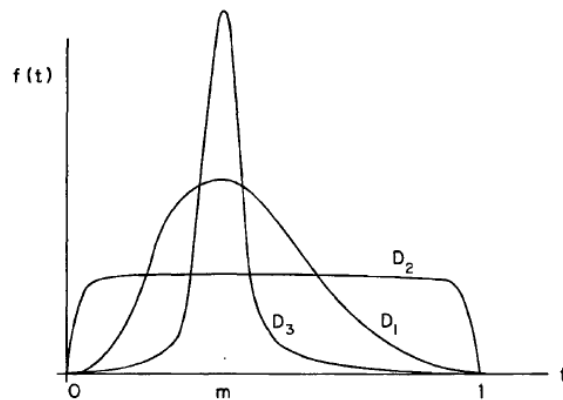


Fig. 2 -- Examples of Possible Activity Distributions

Asimismo, las ecuaciones usadas para calcular la media y el desvío estándar son bastante inexactas comparadas con el cálculo de la media y el desvío estándar de una distribución beta PERT. Según se puede demostrar, el error de la estimación de la media depende fuertemente de la ubicación de la moda (el valor definido como más probable) respecto al rango de la distribución. Para el caso de distribuciones Beta PERT donde la moda se encuentra cercana a la mitad del rango, el error absoluto de estimación de la media es del orden de 3% y si la moda se encuentra considerablemente hacia la izquierda el error

<sup>12</sup> Un buen detalle sobre los problemas de PERT está en el libro “*Practical Schedule Risk Analysis*” de Hulett.

absoluto en la estimación de la media puede ser de hasta 7%. Para estos casos el error de estimación del desvío estándar es del orden del 3%<sup>13</sup>.

Dados los problemas indicados arriba para desarrollar PERT, asociados al cálculo de parámetros y modelado de la distribución beta, se ha generalizado el desarrollo de PERT con distribuciones triangulares. La ventaja de la distribución triangular es que queda completamente definida con los tres puntos  $T_O$ ,  $T_M$  y  $T_P$  sin introducir error en el cálculo de parámetros y permitiendo entre otras cosas la comparación con otras metodologías probabilísticas como Monte Carlo.

Para una distribución triangular el cálculo de media ( $T_E$ ) y desvío estándar ( $\sigma_E$ ) se realiza con las siguientes ecuaciones:

$$T_E = \frac{T_O + T_M + T_P}{3}$$

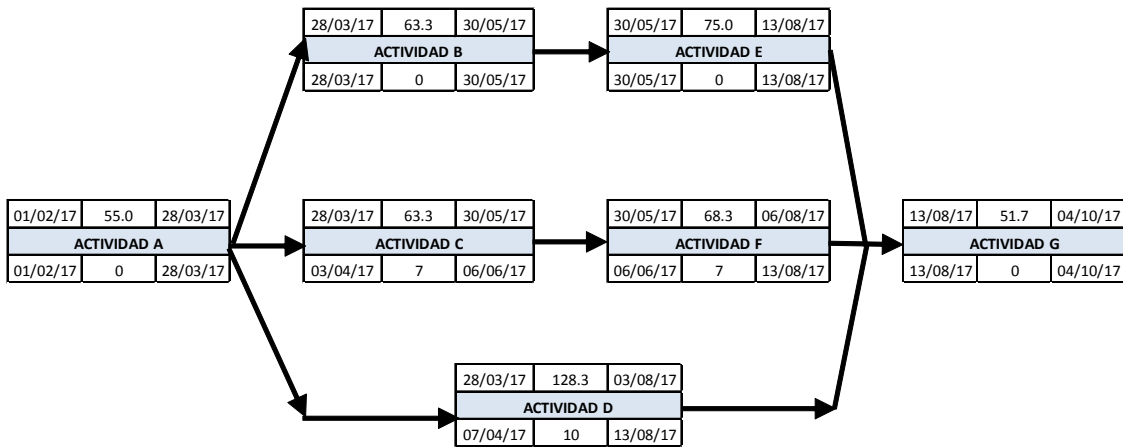
$$\sigma_E = \sqrt{\frac{T_O^2 + T_M^2 + T_P^2 - T_O \cdot T_M - T_O \cdot T_P - T_M \cdot T_P}{18}}$$

Hemos desarrollado el mismo ejemplo simplificado utilizado más arriba para la descripción de la metodología CPM en este caso aplicando el método PERT, es decir, describiendo la duración de actividades como una distribución Beta PERT y como distribución triangular. En el mismo consideramos que la duración definida anteriormente (en CPM) correspondía a la más probable  $T_M$  y hemos estimado arbitrariamente (solo para indicar la mecánica de la metodología) dos escenarios  $T_O$  y  $T_P$ .

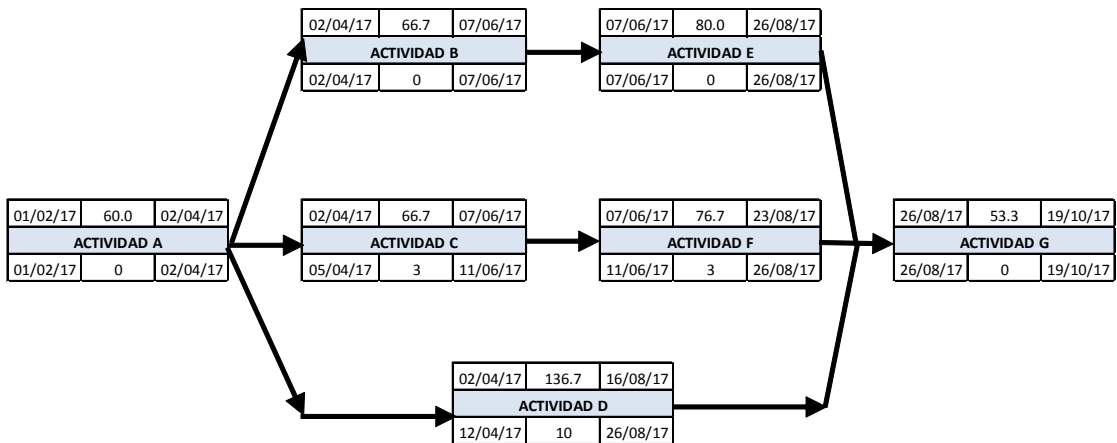
---

<sup>13</sup> Al respecto recomendamos leer un memorándum de la corporación RAND publicado en 1962 bajo el nombre de “An analytical study of the PERT assumptions” preparado para la Fuerza Aérea de Estados Unidos. En la misma, y a solo cuatro años de haber nacido PERT, se clarifican los errores de estimación absoluto y neto para distribuciones beta consideradas razonables y pesimistas (en función de parámetros de forma) y para varias modas. Nosotros aquí indicamos el error absoluto para distribuciones “razonables” y moda 1/3 y 1/12 (para rango de distribuciones de 0 a 1). Hemos tomado el grafico de posibles distribuciones beta para iguales parámetros O, M y P de ese documento.

- Ejemplo para distribución Beta PERT



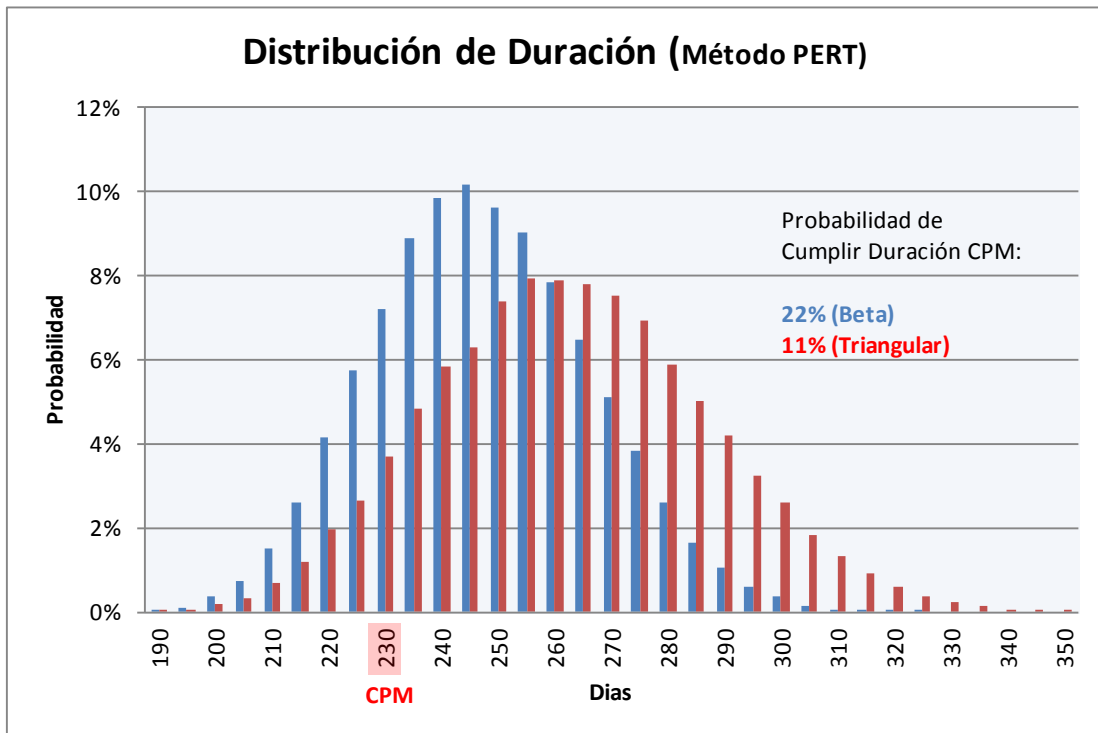
- Ejemplo para distribución Triangular



- Comparación de resultados entre distribuciones:

ACTIVIDAD	METODO CPM			METODO PERT			
	Escenarios			Beta Pert		Triangular	
	O	M	P	Media	Desvio St	Media	Desvio St
A	40	50	90	55	8.3	60	10.8
B	40	60	100	63	10.0	67	12.5
C	30	60	110	63	13.3	67	16.5
D	90	120	200	128	18.3	137	23.2
E	50	70	120	75	11.7	80	14.7
F	40	60	130	68	15.0	77	19.3
G	30	50	80	52	8.3	53	10.3
A-C-F-G	140	220	410	238	23.3	257	29.4
A-B-E-G	160	230	390	245	19.4	260	24.4
A-D-G	160	220	370	235	21.8	250	27.6
PROYECTO	160	230	410	245	19.4	260	24.4

Por medio del método PERT podemos entonces obtener una distribución de duración para el proyecto a partir de las medias y desvíos estándar calculados para cada actividad. En este sentido es que PERT aporta mucho más valor que CPM por el solo hecho de considerar escenarios para cada actividad y luego modelarlos dentro de una distribución de duración por actividad:



Como se dijo anteriormente, y se evidencia en el resultado, la distribución de duración del proyecto resulta ser más pesimista para el caso de modelar las actividades con distribuciones triangulares dado que le da más peso al escenario pesimista.

La primera conclusión importante de la aplicación de PERT es que la duración estimada por el método CPM tiene una muy baja probabilidad de cumplimiento (11% en caso de distribuciones triangulares y 22% en caso de distribuciones beta). Si el Project Manager fuese a informar una duración estimada con mayor probabilidad de cumplimiento debería informar, por ejemplo, la duración que acumula el 80% de las probabilidades (261 días para distribuciones Beta y 280 días para distribuciones triangulares).

La segunda conclusión importante de PERT es que si se desea realizar CPM para los escenarios optimistas (160 días) y los escenarios pesimistas (410 días) con el objetivo de

determinar una duración global del proyecto optimista y pesimista, dichos valores obtenidos tienen una altísima improbabilidad de representar valores significativos para el proyecto. En efecto la probabilidad de que el proyecto se cumpla en 160 días es de virtualmente 0% y la probabilidad de que el proyecto se termine antes de los 410 días es virtualmente del 100%. Esto se debe a que la probabilidad de darse proyectos donde todas las actividades se cumplan en el escenario optimista o proyectos donde todas las actividades en escenarios pesimistas es en ambos casos muy baja.

Hasta ahora hemos hablado de las bondades del método PERT, sin embargo dicho método tiene una deficiencia importante que comparte con el método CPM en cuanto se focaliza solamente en las actividades que determinan la secuencia de mayor duración o camino crítico. De hecho, si el proyecto de nuestro ejemplo consistiera solamente de la secuencia de actividades A-B-E-G, sin la existencia de las actividades C, F y D y los caminos en paralelo dados por A-C-F-G y A-D-G, obtendríamos exactamente el mismo resultado respecto a la media y desvío estándar con la que construir la distribución de probabilidades de duración del proyecto.

De forma intuitiva resulta razonable considerar que el agregado de secuencias en paralelo a la del camino crítico, con duraciones sumadas de orden similar, debería tener un efecto negativo respecto a la probabilidad de cumplimiento del proyecto en una determinada fecha. En nuestro ejemplo las secuencias de actividades no críticas tienen duración menor al 5% respecto a la duración del camino crítico, sin embargo para la metodología PERT no agregan riesgo<sup>14</sup>.

Por otro lado, el método PERT determina la secuencia de mayor duración la cual define como camino crítico y toma el desvío estándar que surge de esa secuencia, sin importar que otras secuencias no críticas tengan desvíos estándar mayores a la del camino crítico. En nuestro ejemplo en efecto la secuencia que determina el camino crítico es también la de menor desvío estándar lo que implica que de querer informarse la duración que acumula un 80% de probabilidades de cumplimiento tomando la distribución que genera la media y el

---

<sup>14</sup> En libro de Hulett “*Practical Schedule Risk Analysis*” en su apéndice 1, “The Problem with PERT” es una muy buena descripción de la problemática.



desvío estándar del camino crítico A-B-E-G se obtiene una fecha menor que si se utiliza la media y el desvío estándar de la secuencia A-C-F-G.

La problemática descrita se denomina Sesgo de Convergencia (Merge Bias) y será tratado en más detalle dentro de la descripción del método Monte Carlo. Para aproximar la cuantificación del efecto del Merge Bias usando las mismas herramientas que provee PERT se puede recordar que este método suma las medias de las distribuciones dentro de cada secuencia, es decir que en una secuencia de actividades encadenadas en serie y según el CLT se obtiene la duración del proyecto que tiene un 50% de probabilidades por medio de la suma de las duraciones medias de cada actividad individual.

Cuando tres secuencias convergen para luego continuar con otras actividades comunes, como es el caso de nuestro ejemplo con las secuencias (A-B-E, A-C-F, A-D) para luego desarrollar la actividad G, para resolver el arreglo de secuencia en paralelo lo adecuado sería determinar la duración que hace que esas tres secuencias en conjunto terminen con un 50% de probabilidad, es decir el producto de las tres probabilidades individuales debe acumular 50% de probabilidad.

En nuestro ejemplo, la duración que acumula el 50% de probabilidad que las tres secuencias en paralelo se terminen está corrida 12 días (para el caso con distribuciones beta) y 16 días (para el caso de distribuciones triangulares) respecto de la media determinada por el método PERT para la secuencia que produce el camino crítico A-B-E-G.

La descripción de arriba busca estimar, sin usar simulación, cuál es el impacto en la duración media dada una serie de secuencias de actividades en paralelo. Sin embargo PERT no permite obtener parámetros que describan la distribución de duración del proyecto que consideren el impacto de dichas secuencias en paralelo sino solo los referidos a la secuencia que determina el camino crítico.

En el capítulo que sigue nos concentramos es describir el método probabilístico de desarrollo de cronogramas (Proceso 6) de Monte Carlo.

## CAPITULO III - METODOLOGÍA DE MONTE CARLO APLICADA AL DESARROLLO DE CRONOGRAMA

### 1. Método Monte Carlo

El método Monte Carlo es una herramienta muy poderosa de simulación numérica utilizada para resolver ecuaciones matemáticas altamente complejas que en general carecen de solución por medio del desarrollo analítico. El método se basa en la generación aleatoria de variables para las que se evalúan dichas ecuaciones. Por la ley de los grandes números al repetir una gran cantidad de veces la misma evaluación partiendo de una variable aleatoria se puede garantizar que el promedio de los resultados obtenidos converge al valor esperado de la resolución de dicho problema.

El método fue desarrollado por el matemático polaco Stanislaw Ulam en 1947 en los Estados Unidos. Ulam trabajaba en el Laboratorio Nacional Los Alamos para el Proyecto Manhattan<sup>15</sup> y en esa época las simulaciones se realizaron en la computadora analógica FERMIAC desarrollada por Enrico Fermi. Dado que el método Monte Carlo requiere de la resolución de un mismo problema una enorme cantidad de veces, no fue hasta la generalización del uso de las computadoras que se empezó a usar ampliamente.

Monte Carlo es de uso extenso en diferentes ramas de la ciencia que van desde la resolución de la ecuación de Navier Stokes para modelar el comportamiento de fluidos a la simulación de eventos de riesgo para analizar portafolios en finanzas.

En esta tesis nos enfocaremos en describir la aplicación de Monte Carlo al análisis de cronogramas de proyectos. Como ya vimos anteriormente, cada actividad puede describirse como una distribución de probabilidad de duraciones y el proyecto completo como un número de actividades vinculadas entre sí por medio de secuencias lógicas. La simulación de cronogramas por Monte Carlo consiste entonces en resolver el camino crítico y en

---

<sup>15</sup> Resulta interesante resaltar que tanto CPM, como PERT y Monte Carlo fueron desarrollados en el marco de trabajos para el Proyecto Manhattan.

determinar la duración del proyecto una gran cantidad de veces (5000 o 10000 veces por ejemplo) tomando para cada iteración duraciones aleatorias para todas las actividades, las cuales están gobernadas por la distribución de duración de cada una.

Dentro de la simulación por Monte Carlo, y para cada iteración del cronograma, la duración del proyecto y el camino crítico puede cambiar. La potencia de Monte Carlo reside justamente en que evaluando el proyecto una gran cantidad de veces se puede obtener la distribución de probabilidad de duración de todo el proyecto sin ningún tipo de sesgo.

Al respecto es importante mencionar que el nombre Monte Carlo refiere también al método de muestreo completamente aleatorio utilizado para determinar las duraciones de cada actividad durante el proceso de simulación. En la actualidad algunos software para simular cronogramas permiten utilizar el método de muestreo Hipercubo Latino (Latin Hypercube), que consiste en una técnica de muestreo estratificada, la cual ha ganado mayor aceptación dado que logra mejores resultados que el método de muestreo Monte Carlo requiriendo menos iteraciones y dando rapidez a las simulaciones. Nosotros utilizaremos en esta parte teórica el método Monte Carlo a partir de Excel y en el capítulo IV utilizaremos ambos métodos según esté disponible en el software específico (Crystal Ball por ejemplo).

El primer paso para la aplicación del método Monte Carlo es describir la distribución de probabilidad de duración para cada actividad del cronograma. Para esto, al igual que en el método PERT, se debe haber determinado los tres escenarios y el tipo de distribución que modela la duración de la actividad.

Durante la simulación de Monte Carlo, y en cada iteración, toda actividad del cronograma recibirá un número generado aleatoriamente entre 0 y 1 el cual representa la probabilidad acumulada de cumplimiento de dicha actividad en una fecha determinada. Por medio de la evaluación de la inversa de dicha distribución se obtiene la duración de la actividad para esa iteración. El método luego toma esas duraciones y determina la duración del proyecto para cada iteración.

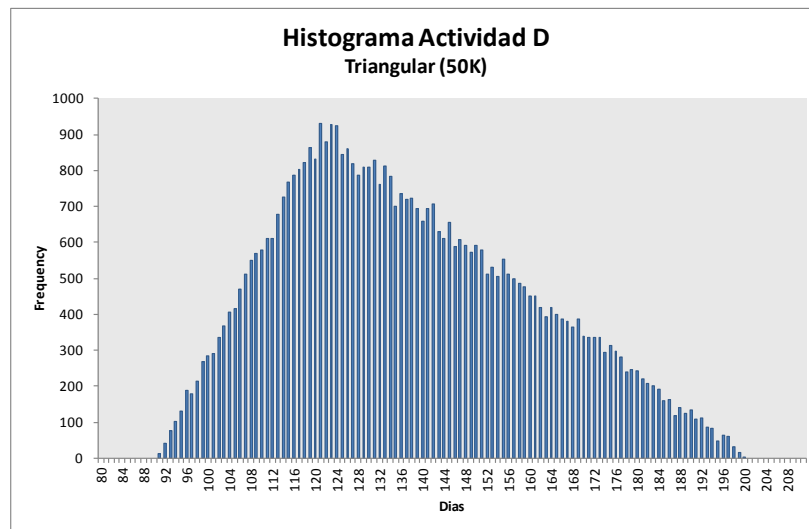
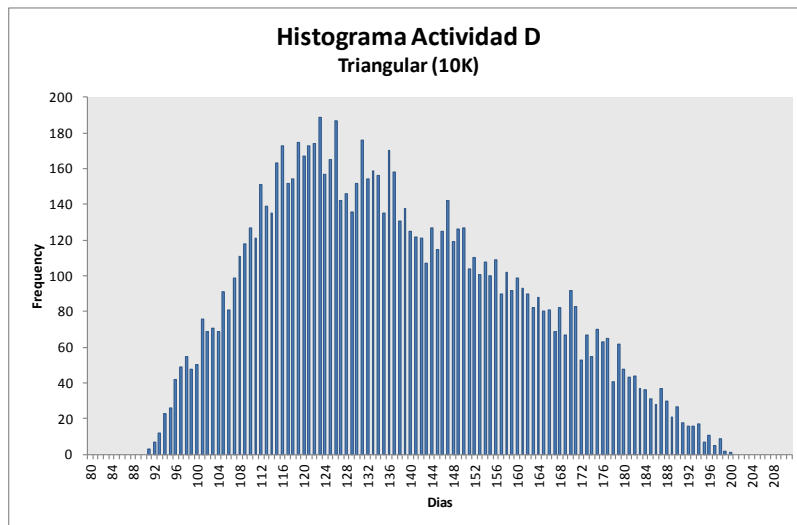
Para modelar distribuciones triangulares se utiliza la siguiente expresión basada en los tiempos de los tres escenarios  $T_O, T_M, T_P$ .

$$F(C) = \frac{T_M - T_O}{T_P - T_O}$$

$$T_i = T_O + \sqrt{P_i * (T_P - T_O) * (T_M - T_O)} \quad 0 < P_i < F(C)$$

$$T_i = T_P - \sqrt{(1 - P_i) * (T_P - T_O) * (T_P - T_M)} \quad F(C) \leq P_i < 1$$

El histograma de la actividad D (por ejemplo) que tiene  $T_O = 90$  días,  $T_M = 120$  días y  $T_P = 200$  días realizado en Excel toma la siguiente forma ya sea que se realice con 10.000 o con 50.000 iteraciones:

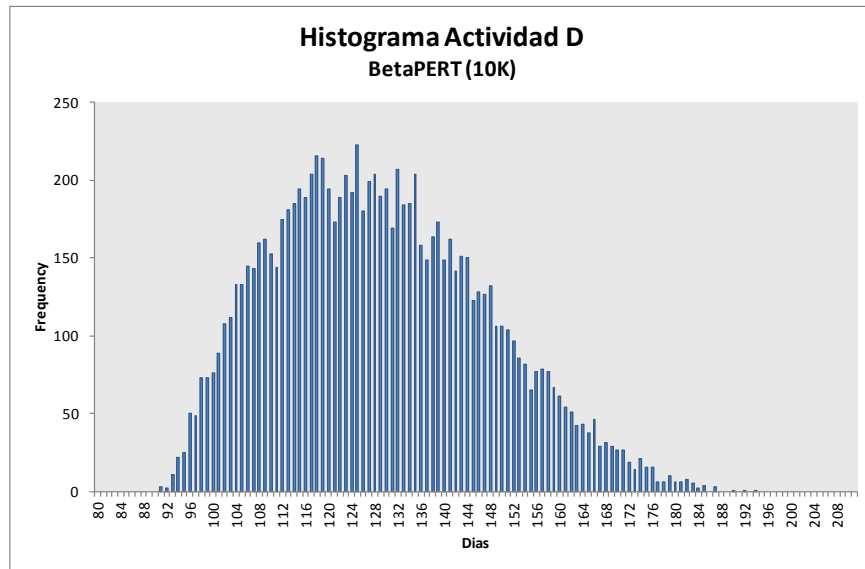


Para modelar distribuciones beta se deben estimar los parámetros de forma por medio de la siguiente expresión basada en los tiempos de los tres escenarios  $T_O, T_M, T_P$ .<sup>16</sup>

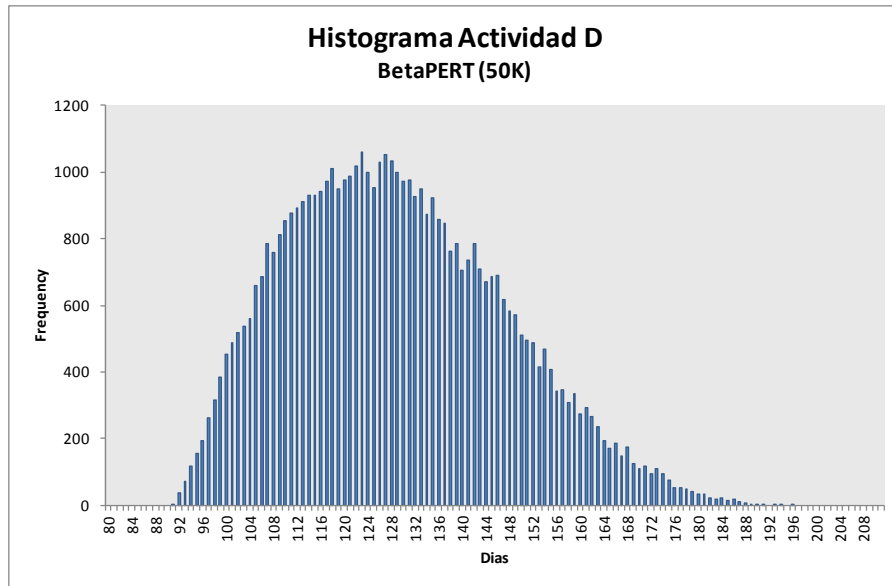
$$\alpha = \left( \frac{2 * (T_P + 4 * T_M - 5 * T_O)}{3 * (T_P - T_O)} \right) \cdot \left[ 1 + 4 \cdot \left( \frac{(T_M - T_O) \cdot (T_P - T_M)}{(T_P - T_O)^2} \right) \right]$$

$$\beta = \left( \frac{2 * (5 * T_P + 4 * T_M - T_O)}{3 * (T_P - T_O)} \right) \cdot \left[ 1 + 4 \cdot \left( \frac{(T_M - T_O) \cdot (T_P - T_M)}{(T_P - T_O)^2} \right) \right]$$

El histograma de la actividad D que tiene  $T_O = 90$  días,  $T_M = 120$  días y  $T_P = 200$  días realizado en Excel toma la siguiente forma ya sea que se realice con 10.000 o 50.000 iteraciones:



<sup>16</sup> Tomado del Paper “Teaching Project Simulation in Excel Using PertBeta Distributions” de Ron Davies. En el mismo el autor defiende el uso de las formulas de PERT y aclara confusiones respecto a el cálculo de los parámetros de forma que se dieron en la academia.



Presentamos ambas distribuciones generadas a partir de diferente cantidad de iteraciones para mostrar gráficamente las dificultades de Monte Carlo respecto al proceso de muestreo para obtener la forma de la distribución que se le ha indicado. Dado que Monte Carlo es realmente aleatorio se requiere una gran cantidad de iteraciones para asegurar que se haya cubierto bien el espectro de la distribución. Por otra parte el método de Hipercubo Latino dado que segmenta el muestreo asegura en muchas menos iteraciones lograr representar acabadamente la distribución de duración de la actividad. Más allá de esta particularidad del método de muestreo, en los ejemplos realizados no obtenemos diferencia en resultados respecto a medias y desvío estándar para las actividades y para el proyecto completo tomando 10.000 o 50.000 iteraciones.

En la descripción que hicimos anteriormente del método CPM y PERT indicamos algunas de las limitaciones de esos métodos para analizar cronogramas. En esta parte describiremos en detalle los cinco puntos más importantes que pueden desarrollarse con Monte Carlo y que sin embargo no se pueden analizar con los métodos CPM y PERT: análisis del sesgo de convergencia y de la importancia relativa de las actividades; modelado de ramificaciones probabilísticas y condicionales; evaluación cuantitativa de riesgos (drivers de riesgo) y modelado de correlación entre actividades.

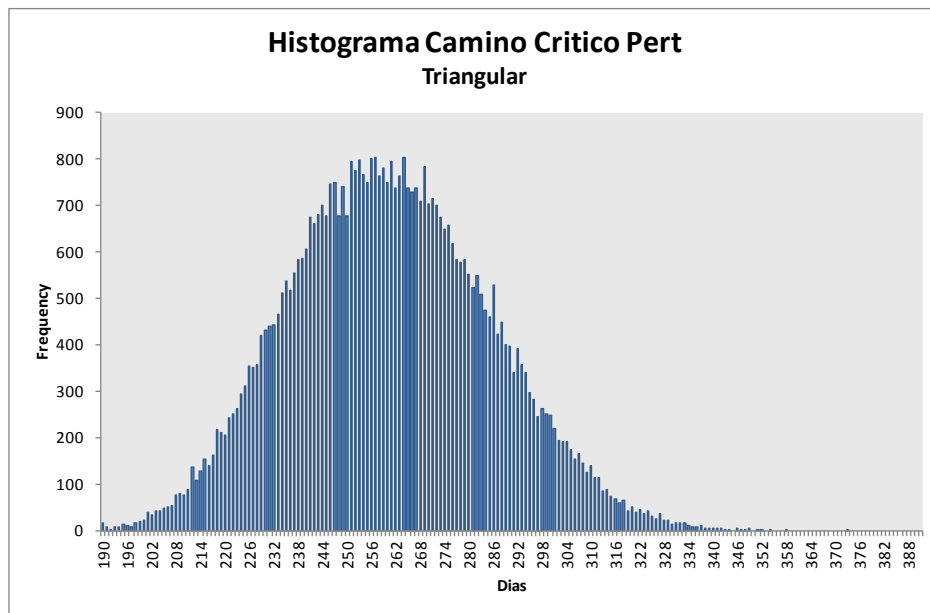
## 1.1 Análisis del Sesgo de Convergencia (Merge Bias)

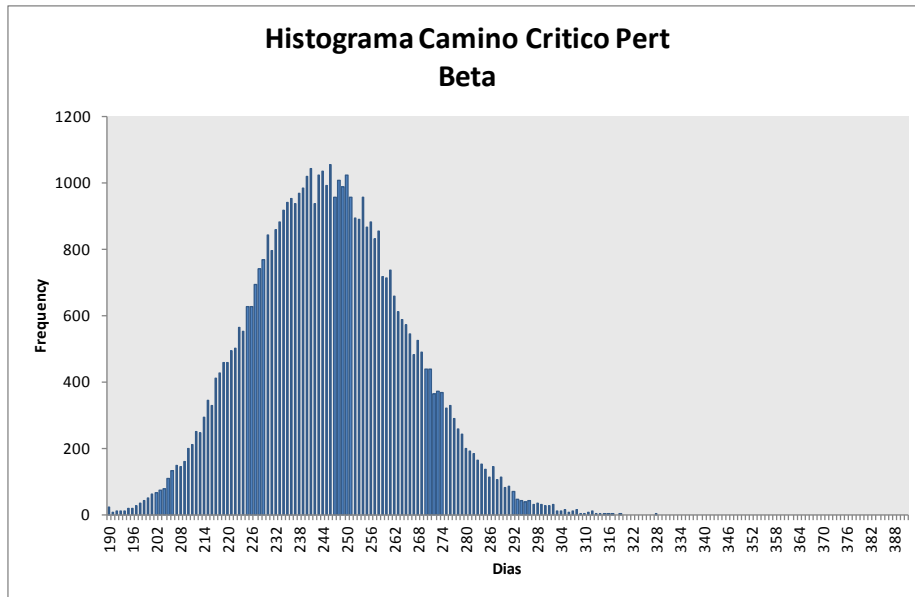
En la descripción de los métodos previos indicamos que tanto CPM como PERT se enfocan en el camino crítico y no toman en cuenta el riesgo incremental derivado de tener secuencias de actividades en paralelo.

En efecto, cuando dos secuencias en paralelo convergen con una lógica Finish – Start es necesario que ambas estén finalizadas para que se cumpla el hito y el proyecto pueda seguir avanzando. Por lo tanto se puede considerar que cualquier secuencia de actividades no crítica pero con poca holgura y desvío estándar considerable (del orden de magnitud de la holgura) puede transformarse en camino crítico de materializarse ciertos riesgos que lleven a algunas de las actividades de esa secuencia hacia los escenarios pesimistas.

Para ejemplificar el impacto del Sesgo de Convergencia en la evaluación de cronogramas retomamos nuestro ejemplo.

La simulación de la secuencia que determina el camino crítico por medio de PERT se puede realizar simplemente con Monte Carlo. Para eso representamos las actividades A-B-E-G con su distribución y sumamos las duraciones que arroja cada iteración en lo que significaría la duración de dicha secuencia si no existiese ninguna otra secuencia en paralelo. De esa simulación obtenemos los siguientes histogramas de duraciones:

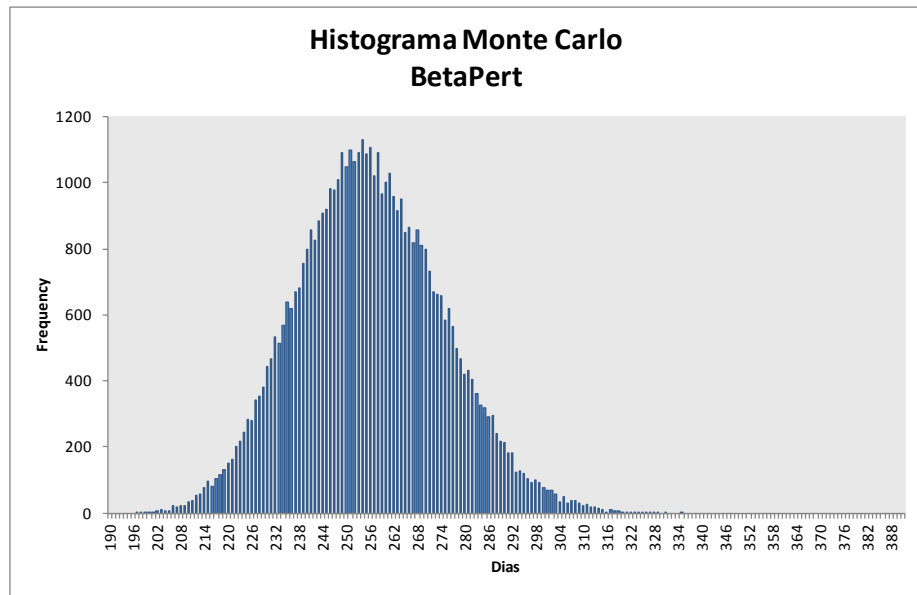
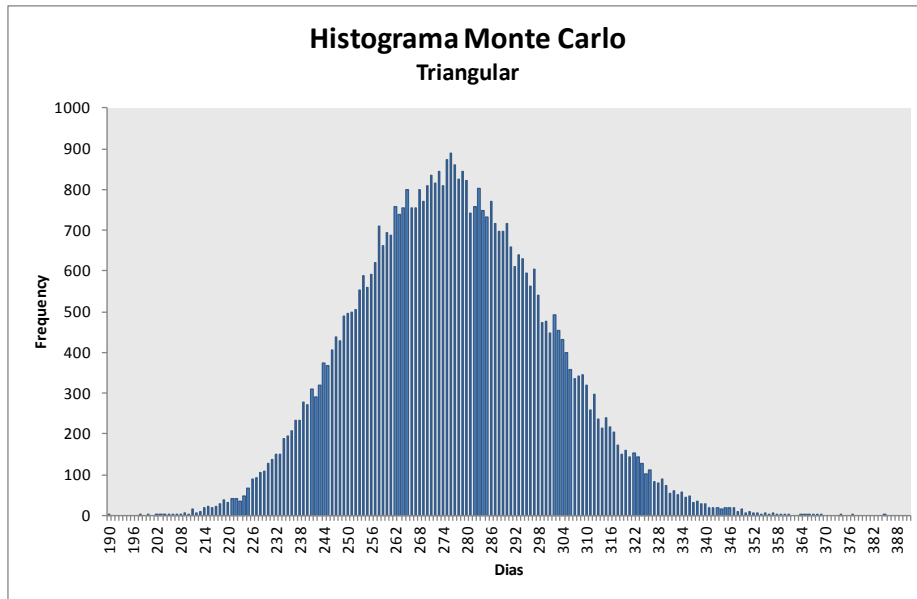




Para ambas simulaciones se obtienen los mismos resultados de media y desvío estándar que aplicando las ecuaciones simples de PERT vistas en la descripción de ese modelo. Para el caso de actividades modeladas como Beta PERT la secuencia A-B-E-G determina 245 días y 19.4 de desvío y para el caso de actividades como distribuciones triangulares obtenemos para dicha secuencia 260 días de media y 24,4 días de desvío estándar.

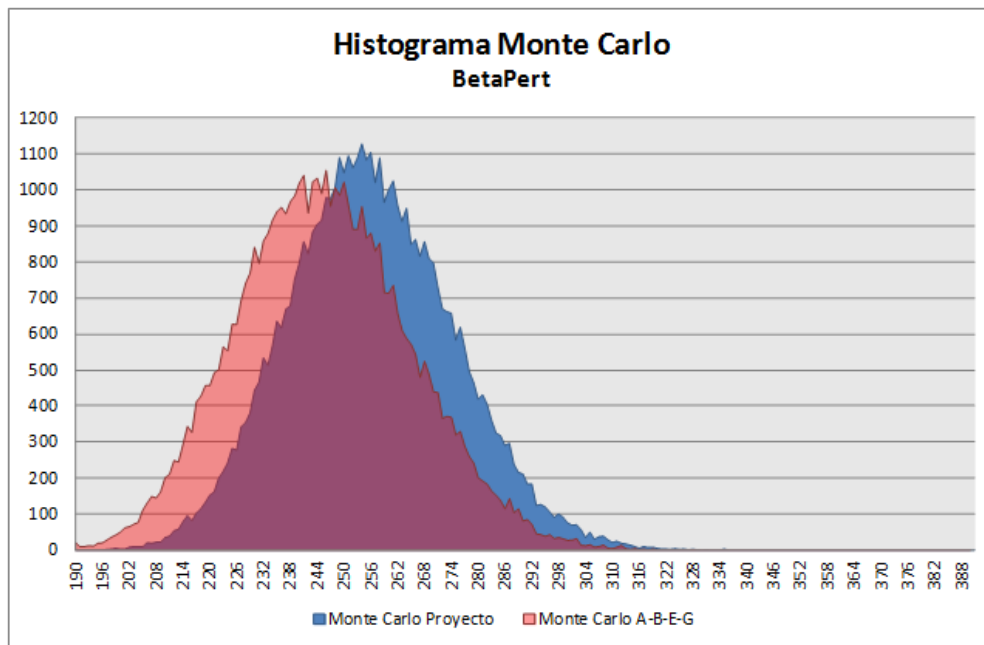
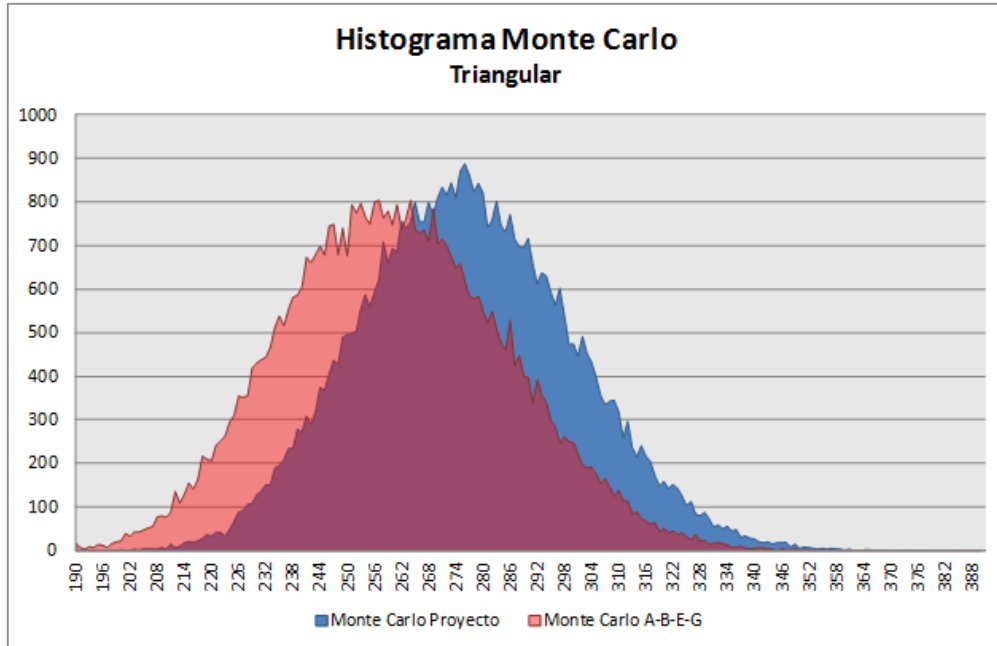
Si en cambio simulamos las tres secuencias en paralelo y permitimos que para cada iteración Monte Carlo registre cuál secuencia ha sido la que más duración ha tenido y por lo tanto la que condiciona el inicio de la actividad G, se obtienen los siguientes resultados que evidencian y cuantifican el Sesgo de Convergencia, que el método PERT y CPM no toman en consideración:





Para el caso de actividades modeladas como Beta PERT para todo el proyecto se determinan 256 días y 18.4 de desvío y para el caso de actividades como distribuciones triangulares obtenemos para todo el proyecto 276 días de media y 23,4 días de desvío estándar.

En resumen, los gráficos incluidos abajo contienen las distribuciones de duración del proyecto simulando solo la secuencia que PERT determina como camino crítico o simulando todas las actividades del proyecto:



En ambos casos la media de duración del proyecto se atrasa respecto a la estimación de PERT unos 11 días en el caso de distribuciones BetaPERT y unos 16 días en el caso de distribuciones triangulares. Si tomamos entonces la distribución de probabilidad de duración del proyecto que se obtiene por medio de Monte Carlo y evaluamos la probabilidad de finalizar el proyecto en las fechas determinadas por CPM y por PERT es

otra forma de visualizar el grado de subestimación de la fecha esperada de terminación del proyecto de esos métodos:

	Método	Duración Esperada	Probabilidad
Beta Pert	CPM	230	8%
	PERT	245	28%
	Monte Carlo	256	50%
Triangular	CPM	230	3%
	PERT	260	25%
	Monte Carlo	276	50%

Por tanto si el equipo de proyecto utiliza CPM e informa la duración estimada mediante dicha metodología la misma tiene menos del 10% de cumplirse. Si en cambio se utiliza PERT la probabilidad de finalizar el proyecto antes de esa fecha es menor al 30%.

Como dijimos anteriormente, durante la simulación de Monte Carlo y dependiendo de la holgura de las secuencias de actividades en paralelo, es factible que para cada iteración cambie cuáles son las actividades que determinan la duración del proyecto y por lo tanto el camino crítico.

Para ayudar al equipo de proyecto a detectar cuáles son las actividades de alta criticidad que deben ser monitoreadas de cerca existen cuatro índices reconocidos para la evaluación de riesgo de la duración de las actividades<sup>17</sup>.

### 1.1.1 Índice de Criticidad (CI)

Para cada iteración dentro de la simulación se puede determinar cuál ha sido la secuencia que determinó el camino de mayor duración antes de la convergencia de las secuencias. Evaluando entonces para cada actividad el porcentaje de iteraciones en el que dicha actividad cayó en el camino crítico se puede determinar la probabilidad de que dicha actividad caiga en el camino crítico. Este índice computa entonces la probabilidad de que la holgura de una actividad dada sea igual a cero. El CI se puede estimar fácilmente por Excel con una función *if* donde si para la iteración *k* la actividad *i* tuvo holgura cero luego esa iteración se cuenta como un *1* para esa actividad y con todas las iteraciones se determina el

<sup>17</sup> Algunos libros, como el de Hulett, citan solamente dos de estos cuatro índices. Aquí tomamos el libro de Vanhoucke donde se han descripto los cuatro índices con muy buen detalle.

porcentaje de veces que cada actividad tuvo holgura cero, lo que implica que estuvo en el camino crítico.

$$CI = \frac{1}{runs} \cdot \sum_{k=1}^{runs} l(holgura_i = 0)$$

$$l(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \text{ true} \\ 0 & \text{if } x \text{ false} \end{cases}$$

Este índice constituye una herramienta importante para analizar la relevancia en términos de riesgo de cada actividad en el cronograma con la metodología Monte Carlo. Sin embargo el CI tiene falencias dado que el simple hecho que una actividad caiga en el camino crítico no la hace relevante para el análisis de riesgo de retraso del proyecto. Existen en proyectos actividades con duración mucho mayor que otras que se realizan en paralelo, por lo que siempre caen en el camino crítico. Sin embargo dichas actividades tienen poco desvío estándar y aunque siempre están en el camino crítico son poco importantes para el análisis de riesgo del proyecto dado que es poco factible que terminen siendo el motivo por el que el proyecto se atrase (Vanhoucke, 2013).

### 1.1.2 Índice de Significancia (SI)

Este índice es similar la CI en cuanto se basa en las estimaciones de duraciones individuales para establecer un ranking de riesgo de las actividades. Busca resolver el problema identificado en CI que solo indica la probabilidad de que una actividad esté en el camino crítico mediante un índice que determine la significancia como relación de duración de las actividades respecto a la duración del proyecto. Se puede cuantificar por medio de la siguiente ecuación:

$$SI = \frac{1}{runs} \cdot \sum_{k=1}^{runs} \left( \frac{d_i^k}{d_i^k + f_i^k} \right) \cdot \left( \frac{D_k}{\bar{D}} \right)$$

Donde  $d_i^k$  es la duración de la actividad  $i$  en la iteración  $k$ ,  $f_i^k$  es la holgura de la actividad  $i$  en la iteración  $k$ ,  $D_k$  la duración estimada para el proyecto en la iteración  $k$  y  $\bar{D}$  la media de la distribución de duración del proyecto luego de todas las iteraciones de Monte Carlo.

Por tanto con este índice las actividades cuyo atraso impactan más directamente en la duración del proyecto tendrán valores más altos.

### 1.1.3 Índice de Crucialidad (CRI)

Este es uno de los índices más utilizados y consiste en computar la correlación entre la duración de la actividad  $i$  y la duración del proyecto. De esta forma se puede determinar en qué grado la duración del proyecto se puede explicar dada la duración de cada una de las actividades.

Vanhoucke indica en su libro tres formas diferentes de calcular el CRI, por el método de productos de momentos de Pearson, la correlación de rangos de Spearman y la correlación de rangos de Kendall.

El CRI por el método Pearson se calcula como:

$$CRI_P = \frac{\sum_{k=1}^{runs} (d_i^k - \bar{d}_i) \cdot (D^k - \bar{D})}{runs \cdot \sigma_{d_i} \cdot \sigma_D}$$

Donde  $\sigma_{d_i}$  es el desvío estándar de la distribución de duración de la actividad  $i$  y  $\sigma_D$  es el desvío estándar de la distribución de duración del proyecto. El método calcula la relación lineal entre las variables duración de actividad y duración del proyecto. Vanhoucke indica que típicamente las duraciones no muestran una relación lineal por lo que el cálculo del índice CRI se mejora con las correlaciones de Spearman o Kendall.

El CRI por el método Spearman se calcula como:

$$CRI_S = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{k=1}^{runs} \delta_k^2}{runs \cdot (runs^2 - 1)}$$

Donde  $\delta_k$  es la diferencia entre los valores de ranking de  $d_i^k$  y  $D^k$ , en Excel como  $rank(d_i^k) - rank(D^k)$ . La correlación compara el ranking de la duración de la actividad  $i$  en la corrida  $k$  contra el ranking de la duración del proyecto en la corrida  $k$ . Cuanto más similares sean ambos rankings, indicando fuerte correlación entre esas duraciones el índice más se acerca a 1.

El CRI por el método de Kendall se calcula como:

$$CRI_k = \left[ \frac{4}{runs \cdot (runs - 1)} \cdot \sum_{k=1}^{runs-1} \sum_{l=k+1}^{runs} I\{(d_i^l - d_i^k) \cdot (D^l - D^k) > 0\} \right] - 1$$

Donde como ya vimos la función  $I(x)$  va a computar un 1 toda vez que el par de duración de la actividad y de duración del proyecto en la iteración  $l$  sea mayor que el par de duración de la actividad y duración del proyecto en la iteración  $k$ . De esta forma el índice busca correlacionar ranking de duraciones de actividades con duraciones de proyecto.

#### 1.1.4 Índice de Sensibilidad del Cronograma (SSI)

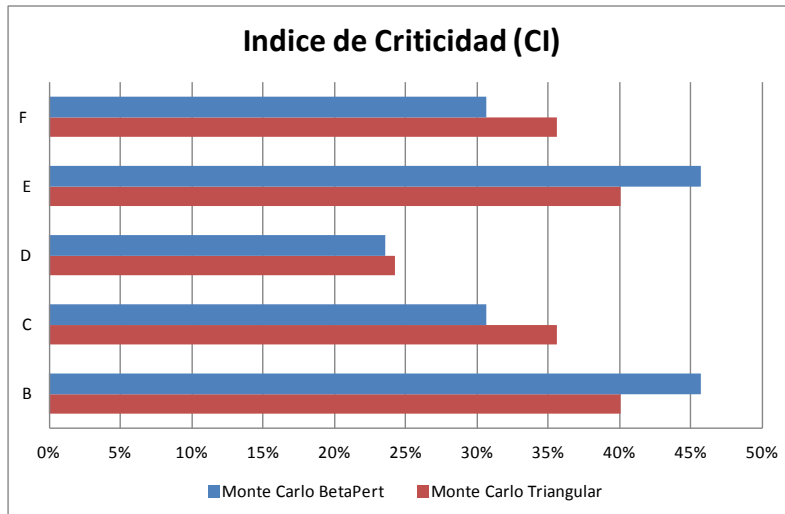
Este índice vincula el ya descrito índice CI con los desvíos estándar de la distribución de duraciones de cada actividad y la duración del proyecto. Como ya habíamos descrito, unas de las críticas del CI es que solo determina el porcentaje de veces que una actividad  $i$  está en el camino crítico, pero no define el riesgo asociado a esa actividad.

El SSI entonces es un ponderador del índice de criticidad por la relación de desvíos estándar de la actividad y del proyecto.

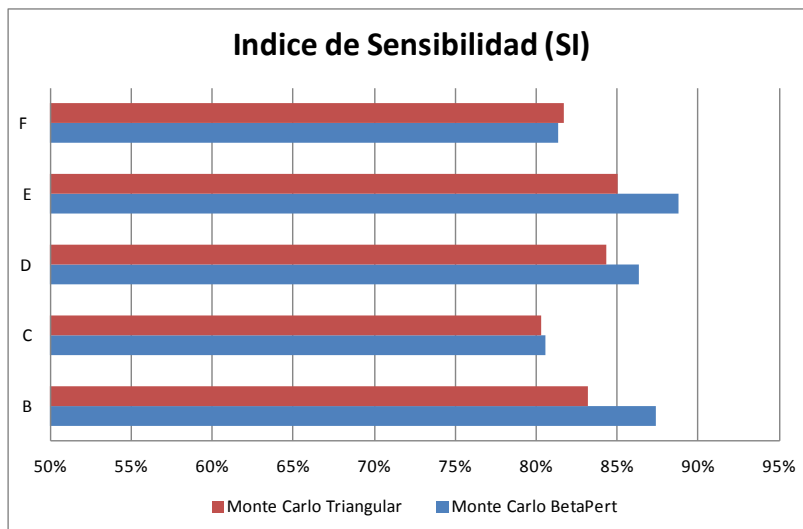
$$SSI_i = \frac{\sigma_{d_i}}{\sigma_D} \cdot CI$$

Hemos realizado para nuestro ejemplo el cálculo de los índices descritos para analizar como ayudan a determinar la criticidad de las actividades en el marco del método Monte Carlo.

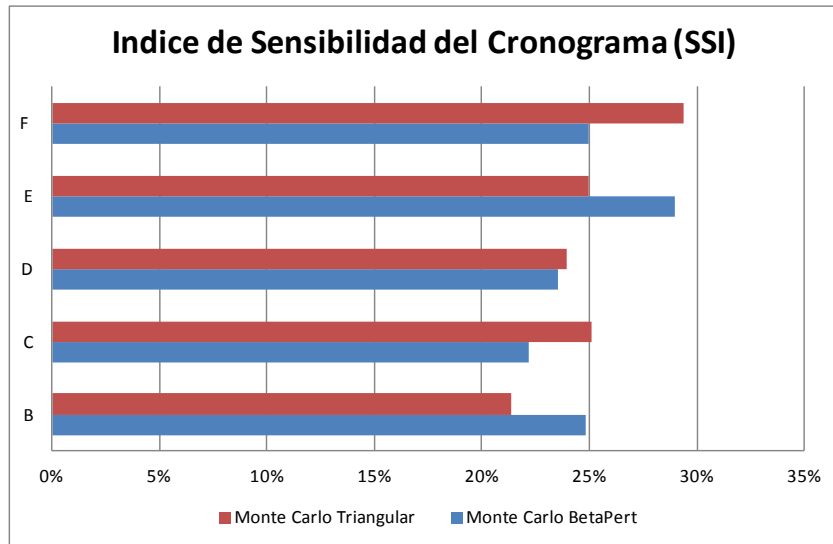
El CI muestra claramente cómo las actividades en el camino crítico tienen mayor índice que las otras dos secuencias en paralelo. Sin embargo es interesante indicar que la secuencia A-B-E no tiene un índice sustancialmente mayor, indicando que en las corridas de Monte Carlo una gran cantidad de veces el camino crítico pasa por las otras secuencias A-D y A-C-F.



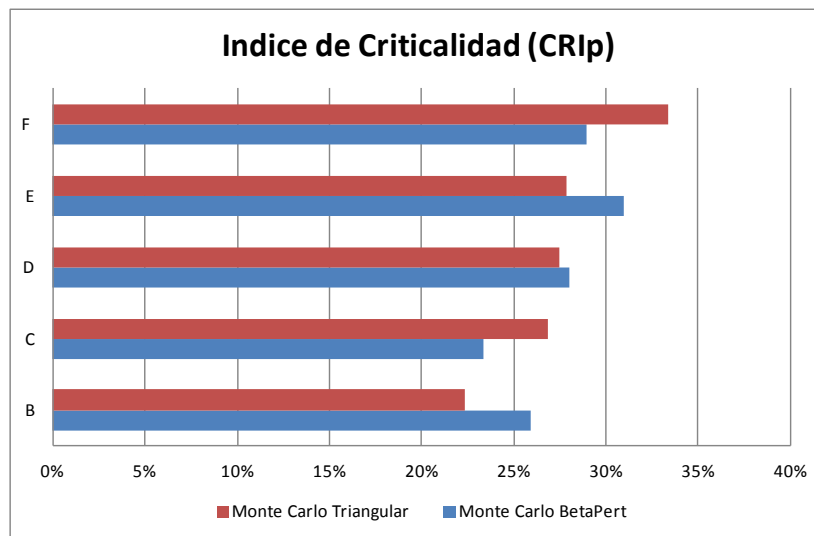
El SI muestra con mayor detalle que las actividades B y E que están en el camino crítico tienen mayor índice que el resto de las actividades en las otras secuencias en paralelo. Sin embargo la actividad D aparece con una sensibilidad importante y del orden de las actividades críticas.



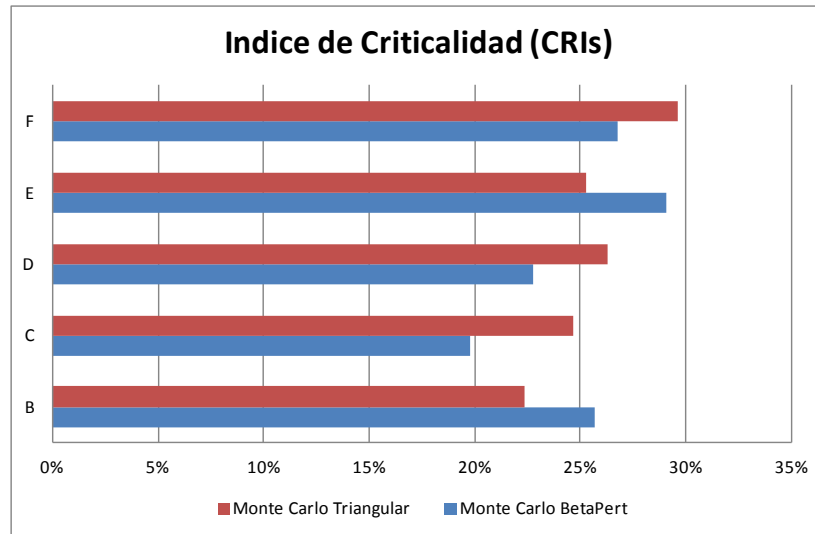
El SSI otorga relevancia a las actividades con mayor desvío estándar, aunque no sean críticas, como es el caso de la actividad F y D. Si se compara con los resultados obtenidos para el cálculo del CI, ambas actividades toman relevancia.



El CRI lo calculamos por el método Pearson y Spearman. Pearson es más simple de realizar en Excel mientras que Spearman, dado que renquea la duración de actividad y del proyecto para cada iteración, hace bastante lento el proceso de simulación. Con ambos modelos obtenemos resultados muy similares que muestran la importancia de la actividad F y la D aunque ambas no son críticas con el modelo CPM.







### 1.2 Ramificación Probabilística (Probabilistic Branching)

Una de las ventajas del modelo de Monte Carlo es que permite no solo analizar distribuciones de duración de actividades y calcular cómo eso impacta en el cronograma, sino que también permite modelar riesgos específicos.

La ramificación probabilística refiere al análisis de riesgos cuya probabilidad de ocurrencia es menor al 100% y cuya materialización implica un cambio y/o agregado de nuevas actividades en el cronograma.

Hasta ahora nuestra aproximación al desarrollo de cronogramas se enfocó en considerar en las actividades la fuente de variación de duraciones. Sin embargo, dentro de la distribución de duración de una actividad existen una serie de riesgos y oportunidades que deben materializarse para que efectivamente la duración de dicha actividad se aproxime a los escenarios pesimista u optimista. En adelante incluiremos también el análisis de riesgos individuales para así poder analizar cómo estos afectan la duración de las actividades y el cronograma.

Dentro de un proyecto existen riesgos cuya probabilidad de ocurrencia es del 100% y lo que se desconoce es el grado de impacto de dicho riesgo en el cronograma. Este es el caso, por ejemplo, de la eficiencia del equipo de desarrollo de ingeniería en un proyecto. Todo equipo de ingeniería tiene inherentemente un grado de eficiencia que determina variación en el requerimiento de horas para completar el desarrollo de documentos y la necesidad de

menor o mayor grado de correcciones y revisiones. Durante el desarrollo del cronograma el Project Manager tiene plena certeza sobre la existencia de este tipo de riesgo pero desconoce el grado de impacto que tendrá en el cronograma. En efecto dicho riesgo puede resultar en una oportunidad (ahorro de tiempo versus el estimado) o una amenaza (exceso de tiempo versus el estimado).

También existen dentro de los proyectos riesgos cuya probabilidad de ocurrencia es menor al 100%. Algunos de estos riesgos al materializarse no agregan nuevas actividades, por ejemplo mayor cantidad de días de lluvia, y solamente generan impacto en el cronograma. Sin embargo también existen riesgos con probabilidad de ocurrencia menor al 100% que al materializarse agregan ramas de actividades en el cronograma que de no materializarse no existen como actividades en el cronograma base. Un ejemplo de este tipo de riesgo es el rechazo de un test de aceptación en fábrica (factory acceptance test, FAT) para un equipamiento listo para ser entregado. De ser aprobado el test de aceptación la siguiente actividad en el cronograma es típicamente el transporte del equipamiento al sitio del comprador, sin embargo, de no ser aprobado el test deben planificarse nuevas actividades para resolver los inconvenientes y poder realizar nuevamente el test<sup>18</sup>.

Estos riesgos son conocidos por el Project Manager y también las actividades que deben realizarse en caso de materializarse, sin embargo no son típicamente incluidos dentro del cronograma ya que transmiten una visión pesimista del proyecto y pueden provocar rápidamente que ese margen tomado se transforme en SAISS.

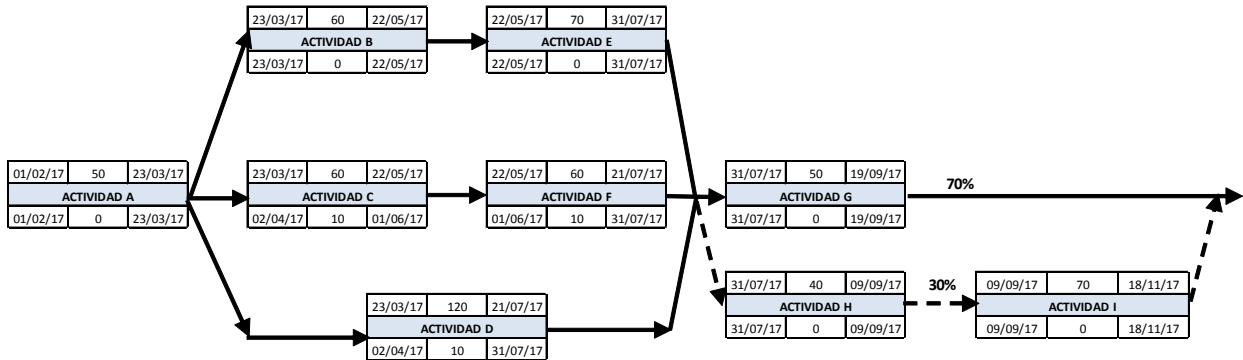
Modelar estos eventos en Monte Carlo es relativamente simple una vez definida la probabilidad de ocurrencia de dicho riesgo y los parámetros que determinan la distribución de duración de las nuevas actividades que se incorporan en base a esa probabilidad de ocurrencia.

Para explicar el funcionamiento de la ramificación probabilística y cómo se desarrolla dentro de Monte Carlo recurrimos a nuestro ejemplo donde hemos agregado dos nuevas actividades H y I en paralelo a la actividad G. De esta forma existe un riesgo con un 30%

---

<sup>18</sup> Este es un ejemplo que usa Hulett en su libro *Practical Risk Schedule Analysis* que hemos tomado dado que es muy gráfico de la ramificación probabilística.

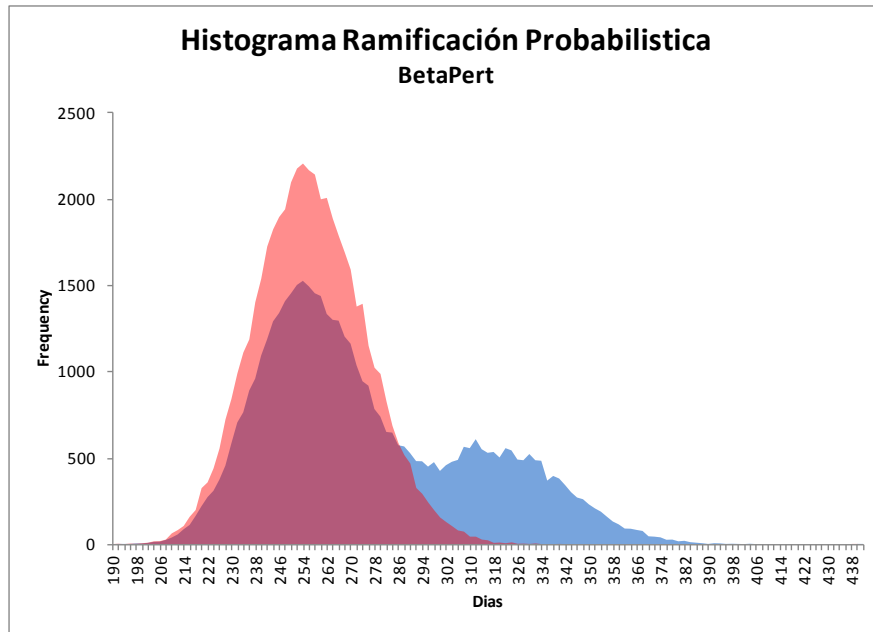
de probabilidad de ocurrencia: en caso de no materializarse dicho riesgo se ejecuta la actividad G, en cambio, en caso de materializarse deben ejecutarse las actividades H e I.



Para esto se incluye en la simulación una variable aleatoria entre 0 y 1 dentro de una función if. Cuando la variable aleatoria toma valor igual o menor que 0.7 (probabilidad de no ocurrencia del riesgo) se ejecuta la actividad G, sin embargo cuando dicha variable toma valores mayores a 0.7 se ejecutan en cambio las actividades H e I.

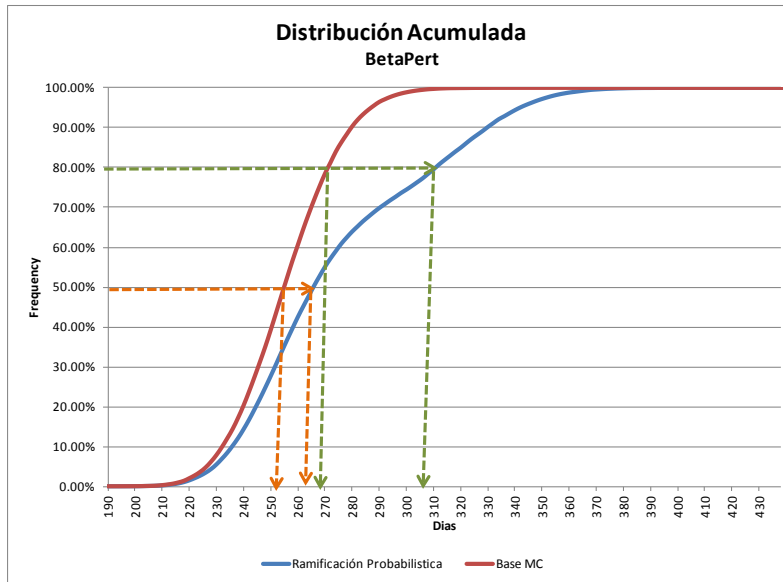
El efecto en el cronograma estimado por medio de Monte Carlo es que desaparecen las distribuciones normales como resultado de la sumatoria de actividades y se obtienen en cambio distribuciones bimodales dados los dos escenarios de marcada diferencia en duración simulados.

Incluimos como ejemplo el histograma que se obtiene de la simulación de Monte Carlo con actividades modeladas como Beta PERT para el caso básico de simulación (sin ramificación probabilística, en rojo) y para el caso donde hay un 30% de probabilidades de tener que realizar las actividades H e I (en azul).

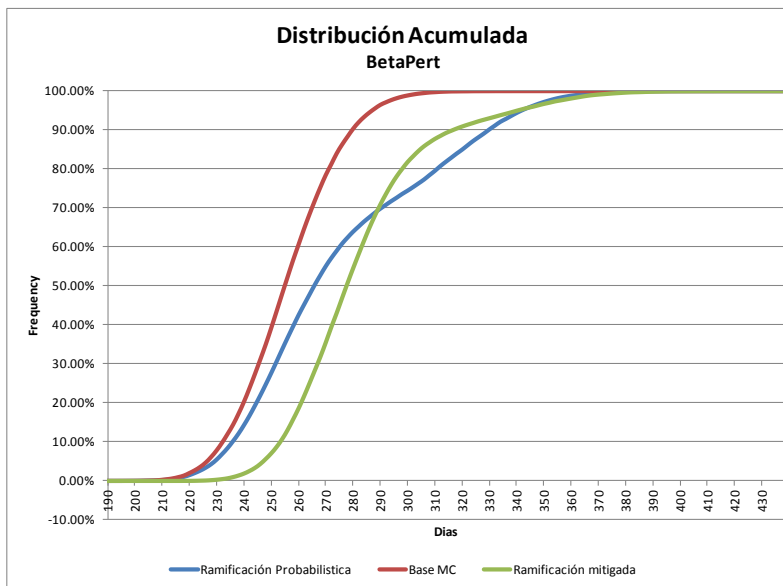


La nueva distribución de duración estimada para el proyecto muestra claramente los dos escenarios donde se acumulan el porcentaje de iteraciones de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia de dicho riesgo. Si graficamos la probabilidad acumulada para ambas distribuciones se puede comprobar la aparición de un hombro en la zona entre las dos modas. El efecto sobre nuestra estimación de duración del proyecto es un corrimiento hacia la derecha que se hace muy marcado a valores altos de probabilidad acumulada.

En particular, para nuestro ejemplo, mientras que la duración para el proyecto que acumula un 50% de probabilidades de ocurrencia se corre 11 días hacia la derecha, la fecha que acumula un 80% de probabilidades de ocurrencia se mueve 40 días hacia la derecha.



Existen alternativas para mitigar dicho efecto que el equipo de proyecto debe considerar como estrategias para bajar la probabilidad de ocurrencia de dicho riesgo. Una propuesta que incluimos aquí para nuestro ejemplo considera el agregado de 20 días durante las actividades previas que pueden usarse para realizar pre-chequeos y así reducir la probabilidad de no pasar la FAT. El efecto sobre la curva de probabilidad acumulada muestra mejora en la fecha estimada que acumula 80% de probabilidades.<sup>19</sup>



<sup>19</sup> Hulett en su libro propone considerar días adicionales para bajar la probabilidad de ocurrencia de una falla en un ensayo. Hemos tomado de su libro la base de esa mitigación y lo simulamos en nuestro ejemplo.

Finalmente, la incorporación de más ramas probabilísticas en paralelo tiene el efecto de correr el hombro en la curva de probabilidad acumulada hacia valores menores, determinando que incluso en proyectos donde se informa la duración con 50% de probabilidad de ocurrencia, el efecto de la ramificación impacte dicha duración.

Una alternativa metodológica al desarrollo de ramificación probabilística que se podría considerar es el agregado del efecto de dicho riesgo en la duración de la actividad durante la determinación de los tres escenarios: optimista, pesimista y más probable. En ese sentido, dado que dicho riesgo genera nuevas actividades, se prefiere no considerar dentro del escenario pesimista la materialización de dicho riesgo y modelar la ramificación probabilística.

En este proceso es clave que durante las entrevistas de determinación de duraciones de las actividades se haya evaluado detalladamente qué riesgos se han considerado y dónde, para así no cuantificar su impacto varias veces y en forma desproporcionada en el proyecto.

### **1.3 Drivers de Riesgo (Risk Drivers)**

El concepto de Risk Drivers constituye una aproximación diferente al desarrollo de cronogramas por el método Monte Carlo en cuanto se enfoca en analizar los riesgos en forma individual y su impacto en las diferentes actividades del proyecto.

El foco en las entrevistas, que en el análisis basado en determinar la distribución de duración de actividades consiste en caracterizar los escenarios optimista, pesimista y más probable, en el modelo de Risk Drivers se modifica hacia la identificación y el análisis de los riesgos presentes, la determinación de las actividades que son afectadas y los rangos de impacto de esos riesgos sobre la duración de las actividades.

La duración de las actividades entonces dejan de ser distribuciones de probabilidad de duración entre los escenarios optimista y pesimista para ser una distribución mucho más estrecha de un valor más probable y el rango determinado solo por el error de estimación dependiendo de la fase del proyecto en la cual se desarrolla.

Esta metodología es fundamental para el desarrollo de análisis de riesgos de cronogramas ya que permite clasificar los riesgos según el grado de impacto potencial y en base a ello

estimar un cronograma más probable y una reserva o buffer global explicada en base a las contribuciones marginales de los riesgos presentes. La premisa de risk drivers es que los riesgos son verdaderamente independientes entre sí, no así las actividades que están correlacionadas dado que son afectadas por riesgos comunes, y a partir de este análisis cada riesgo puede expresarse como un multiplicador de la duración de las actividades afectadas que surge de la distribución de impacto de dicho riesgo entre un valor optimista (ejemplo 0.9), un valor más probable (1 por ejemplo) y uno pesimista (1.3).

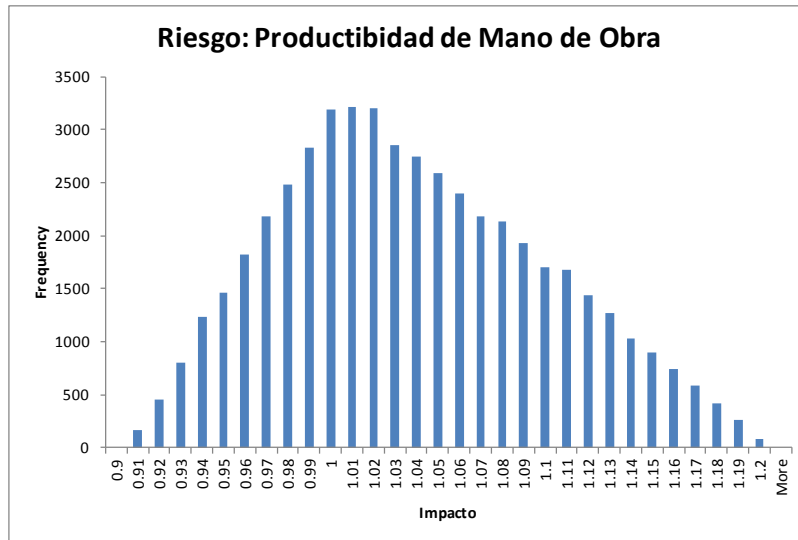
### **1.3.1 Riesgos con probabilidad de ocurrencia del 100%.**

La definición más tradicional de riesgo indica que los mismos se pueden caracterizar como el producto de su probabilidad de ocurrencia multiplicado por la consecuencia o impacto.

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Consecuencia}$$

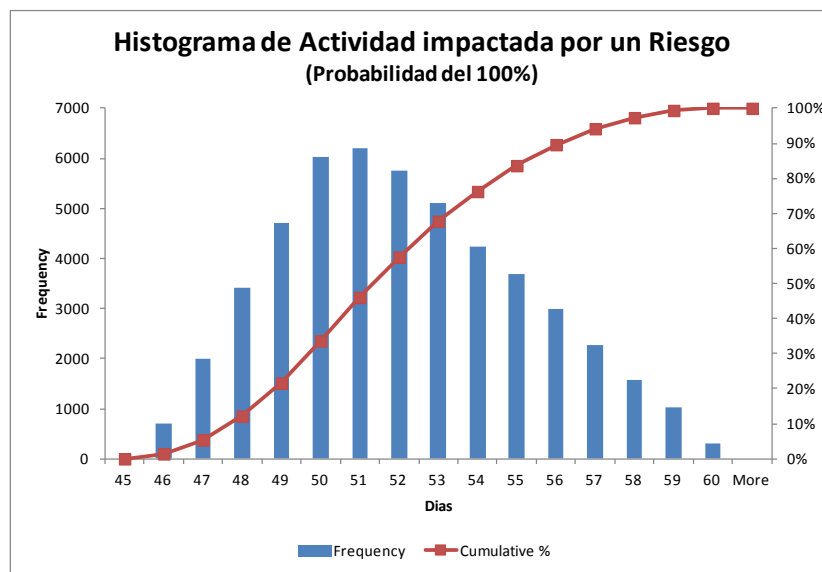
Existen algunas variables identificadas en los proyectos que se definen como riesgos aunque su probabilidad de ocurrencia es del 100%. Esto implica decir que hay certidumbre respecto a que dicha variable tendrá algún impacto sobre las actividades del cronograma. El motivo por el cual se las trata como riesgos radica en que la consecuencia es desconocida por lo que el efecto de dicha variable en las actividades del proyecto puede significar un beneficio o perjuicio para los tiempos. El ejemplo que clásicamente se cita para este tipo de riesgos es la productividad de la mano de obra y cuál será el impacto en el avance de las actividades (Hulett, Practical Schedule Risk Analysis, 2009)

Dicho riesgo entonces puede caracterizarse por tres posibles impactos, uno optimista, uno más probable y uno pesimista. Dado que la probabilidad de ocurrencia del riesgo es igual a 100%, la curva de distribución de este riesgo se parece a la distribución típica triangular utilizada para la duración de actividades. Para el ejemplo de la productividad de la mano de obra se puede suponer que un equipo de alta productividad podría reducir la duración de las actividades respecto a la más probable en un 10% y un equipo ineficiente aumentar la duración de las actividades en un 20% respecto a la duración más probable, así se construye una distribución con los parámetros (0,9 / 1 / 1,2).



Durante la simulación de Monte Carlo se genera una variable aleatoria entre 0 y 1 que por medio de la inversa de la distribución triangular con los tres escenarios definidos arroja un valor de impacto para ese riesgo, el cual se utiliza como multiplicador de la duración de las actividades que están afectadas por ese riesgo.

Si suponemos entonces una actividad que es afectada por ese riesgo con una duración de 50 días obtenemos la siguiente distribución triangular que varía entre 45 días y 60 días con un valor más probable de 50 días.





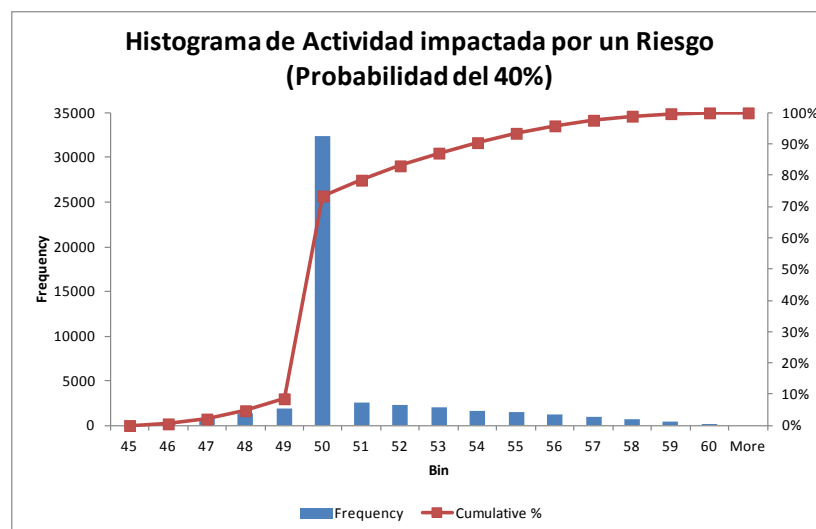
### 1.3.2 Riesgos con probabilidad de ocurrencia menor al 100%

La gran mayoría de los riesgos, exceptuando los indicados anteriormente, tienen una probabilidad de ocurrencia menor al 100%. Esto implica que las actividades que están relacionadas con ese riesgo solamente serán afectadas toda vez que durante la simulación de Monte Carlo de ese riesgo la variable aleatoria supere el valor de la probabilidad de no ocurrencia.

Suponemos entonces un riesgo que tiene una probabilidad de ocurrencia del 40% con parámetros optimista, más probable y pesimista iguales al ejemplo anterior (0,9/1/1,2). La mecánica es similar en cuanto se define una variable aleatoria para determinar la distribución triangular de impacto del riesgo. Sin embargo debe definirse una segunda variable aleatoria para la cual cuando el valor obtenido es menor a 0.6 implica que el riesgo no se materializa y por lo tanto la duración de la actividad será la definida como más probable. Solo será impactada la duración de la actividad por los multiplicadores que se obtienen toda vez que la segunda variable aleatoria tenga valores mayores a 0.6.

Esto implica decir que el 60% del tiempo la duración de la actividad impactada por ese riesgo es igual a la duración definida como más probable y el 40% restante se distribuye en base a la distribución triangular de impacto del riesgo.

El gráfico que se obtiene para una actividad impactada por este tipo de riesgo es el siguiente:



Como puede verse en el histograma el 60% de la probabilidad se acumula en el valor más probable.

### 1.3.3 Combinación de riesgos sobre una misma actividad

A partir de lo analizado anteriormente se puede definir una serie de riesgos según su probabilidad de ocurrencia y su impacto. A partir de cada riesgo individual se construye un multiplicador de la combinación de dichos riesgos que se aplica a la duración de la actividad.

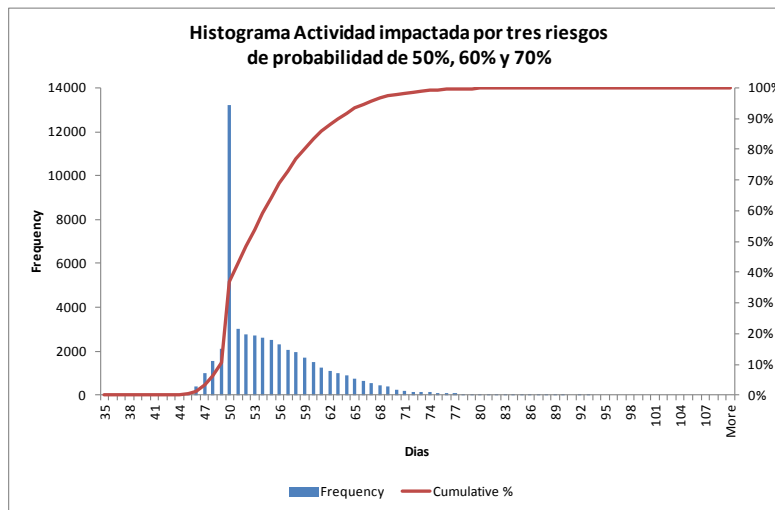
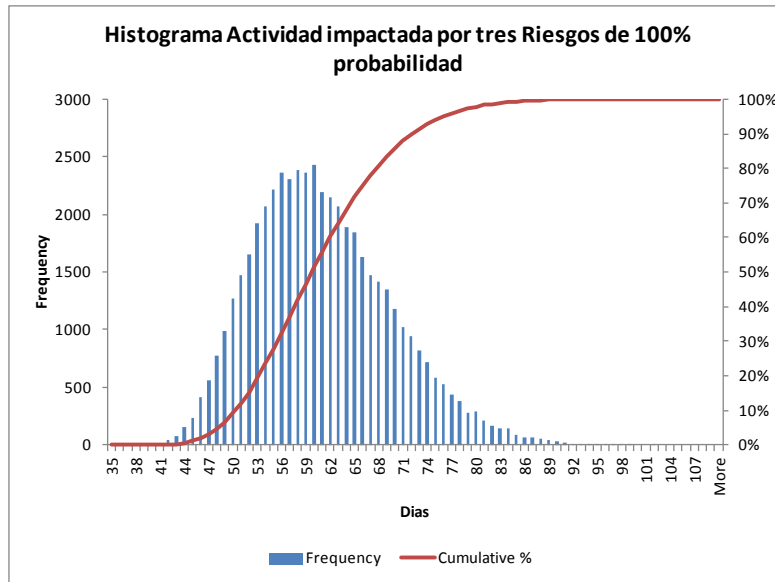
El riesgo total que se aplica a la duración de la actividad es igual a la productoria de los multiplicadores individuales:

$$\text{Multiplicador de Actividad} = \prod_{i=1}^n \text{Individual Risk multiplier}_i$$

Para los N riesgos que fueron vinculados a la actividad en análisis.

La distribución de duración de las actividades que están impactadas por varios riesgos por la CLT tienden a distribuciones del tipo normales cuando la gran mayoría de los riesgos tienen probabilidad de ocurrencia del 100% y mantienen su forma donde se concentra una probabilidad grande cuando los riesgos tienen probabilidad de ocurrencia menor al 100%.

Adjuntamos dos histogramas donde una actividad ha sido impactada por tres riesgos en un caso los tres con 100% de probabilidad de ocurrencia y otro con probabilidades menores a 100%.



De esta forma, simulando por Monte Carlo la ocurrencia de determinados riesgos, se puede obtener para cada iteración la duración de cada actividad del proyecto para así construir una curva de distribución de duración del proyecto. Para mostrar la aplicación retomamos el ejemplo que hemos elaborado para esta parte teórica, con la diferencia de que eliminamos de la duración de actividades los escenarios optimistas y pesimistas para solo definir un valor más probable y el rango de incertidumbre en el cálculo de la duración más probable de dichas actividades. Ponemos aquí como ejemplo la simulación con modelado de actividades con distribución triangular donde la incertidumbre de estimación del valor más probable de duración es baja (-5% / +10%) indicando una fase del proyecto avanzada.

ACTIVIDAD	METODO CPM			METODO PERT		METODO MONTE CARLO	
	Escenarios			Triangular		Triangular	
	O	M	P	Media	Desvio St	Media	Desvio St
A	48	50	55	51	1.6	51	1.6
B	57	60	66	61	1.9	61	1.9
C	57	60	66	61	1.9	61	1.9
D	114	120	132	122	3.7	122	3.7
E	67	70	77	71	2.2	71	2.2
F	57	60	66	61	1.9	61	1.9
G	48	50	55	51	1.6	51	1.6
A-C-F-G	209	220	242	224	3.4	224	3.5
A-B-E-G	219	230	253	234	3.6	234	3.6
A-D-G	209	220	242	224	4.3	224	4.3
<b>PROYECTO</b>	<b>219</b>	<b>230</b>	<b>253</b>	<b>234</b>	<b>3.6</b>	<b>234</b>	<b>3.6</b>

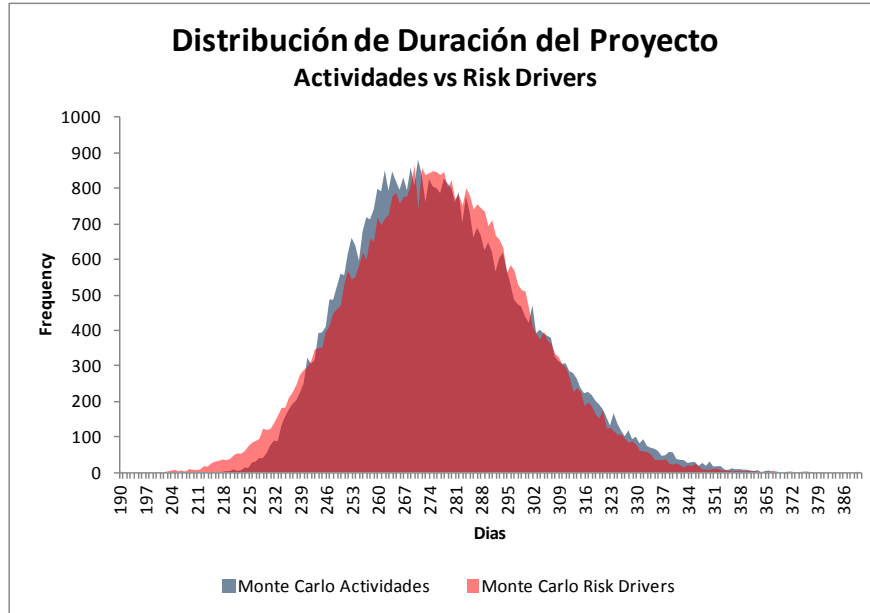
Al eliminar los escenarios optimistas y pesimistas para reemplazarlos por el rango -5% / +10% de incertidumbre de la estimación se reducen los desvíos estándar de las actividades de modo que los modelos deterministas y probabilísticos resultan bastante similares en cuanto al resultado. Dicho de otra forma: un proyecto sin riesgos se puede modelar perfectamente con CPM dado que desaparece la incertidumbre y se transforma en un problema determinista.

Creamos luego seis riesgos determinados, tres de ellos con 100% de probabilidad de ocurrencia y los restantes tres con probabilidades menores al 100%.

Riesgo	Rango Multiplicadores				Actividad Afectada
	O	M	P	Prob	
1	90%	100%	140%	100%	B
2	95%	100%	130%	75%	C D E G
3	90%	100%	148%	85%	F
4	90%	100%	140%	100%	A C
5	85%	100%	135%	100%	D F
6	95%	100%	130%	60%	A B E G

La combinación de riesgos que afectan las actividades y los multiplicadores individuales de cada riesgo los desarrollamos de forma de aproximar en sus valores extremos optimistas y pesimistas rangos similares a los que tenían las actividades en la simulación de Monte Carlo basada en distribución de duración de actividades.

En el siguiente gráfico se superponen las distribuciones de duración del proyecto con el Método Monte Carlo aplicado a actividades y el Método Monte Carlo aplicado con Risk Drivers.



El objetivo del ejemplo presentado es simplemente mostrar que se puede lograr una distribución de duración del proyecto muy similar simulando Monte Carlo con una aproximación basada en distribución de duración de actividades, donde no se segmenta y analiza individualmente cada riesgo, o por el modelo de Risk Drivers que habilita luego a realizar un análisis específico sobre el impacto de cada riesgo en el proyecto.

#### 1.4 Ramificación Condicional (Conditional Branching)

En este apartado se cubre una técnica para el modelado en Monte Carlo de diferentes tipos de acciones que el Project Manager puede tomar durante el desarrollo del proyecto para recuperarse frente a algún evento ocurrido. Hasta ahora hemos modelado actividades y riesgos para luego analizar cómo contribuyen a la curva de duración del proyecto. Aquí modelaremos decisiones gerenciales que son parte de la estrategia de desarrollo del proyecto que se define tomar en caso que alguna condición específica del proyecto se materialice.

La ramificación condicional difiere de la ramificación probabilística en cuanto la primera implica el análisis del impacto de una decisión de estrategia de desarrollo de proyecto mientras que la segunda es el resultado de un evento que tiene una probabilidad de ocurrencia.

Dentro del seguimiento y control del cronograma se pueden programar una serie de disparadores (triggers en inglés) que consisten en acciones específicas y modificación en las actividades a realizarse si algún parámetro determinado se cumple.

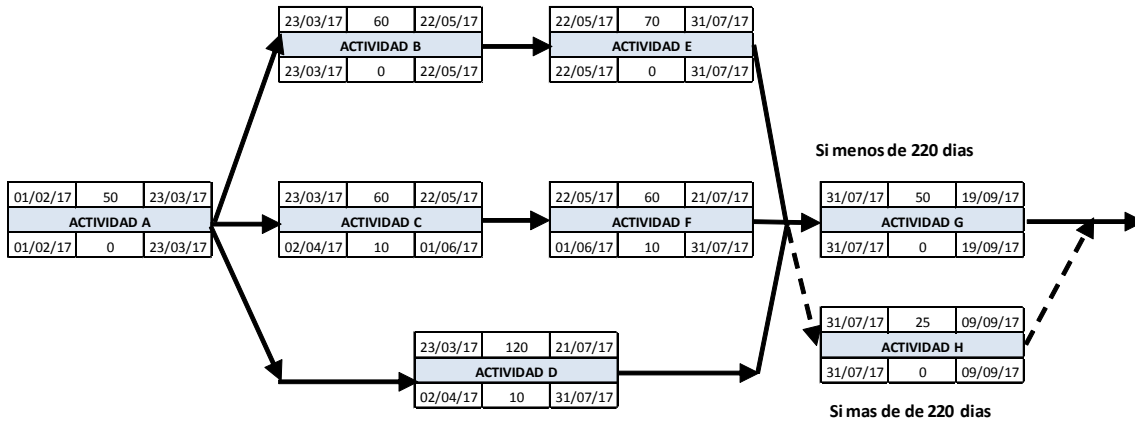
La estructura de ramificación condicional está definida por una condición que puede ocurrir y dos alternativas: una primera alternativa si esa condición sucede y una segunda alternativa si esa condición no sucede. Esto puede programarse fácilmente en Excel con una función if y dos alternativas para los casos donde la condición if es verdadera o falsa.

Un ejemplo que se puede indicar es el cambio de tipo de transporte entre el sitio donde se fabrica un equipamiento al sitio donde debe instalarse basado en el atraso en el proceso de fabricación. Típicamente los equipamientos para plantas industriales son transportados por barco hacia el sitio donde se instalarán. Sin embargo en alguna situación puede determinarse el transporte aéreo dado que permite reducir sustancialmente el tiempo de transporte a expensas de un mayor costo de flete.

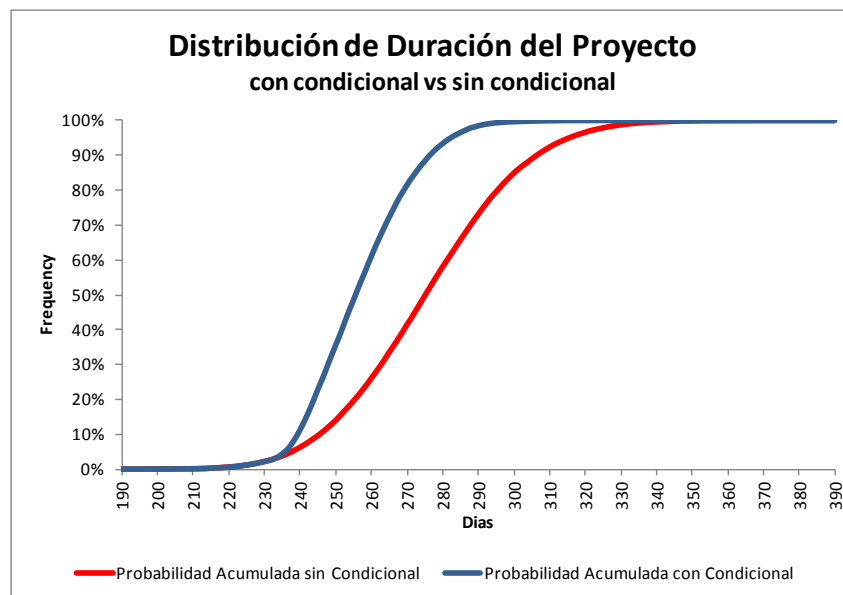
Otro ejemplo donde la ramificación condicional puede aplicarse es en proyectos donde ciertas actividades solo pueden suceder durante alguna temporada del año (ventanas de tiempo). En particular, el caso que analizaremos en el capítulo IV es el de un proyecto en la selva amazónica peruana, donde el transporte del equipamiento pesado debe realizarse en barcas que solamente pueden navegar durante la época de lluvias, dado que hay buen caudal en los ríos. En este tipo de ejemplos se puede configurar la simulación de Monte Carlo para determinar el transporte del equipamiento solo si se cumple con el rango de fechas del periodo de lluvia o alternativamente esperar y retrasar el proyecto hasta el año siguiente.

A efectos de analizar el impacto de la ramificación condicional suponemos que para nuestro ejemplo la actividad G supone el transporte marítimo de un equipamiento con una duración más probable de 50 días. Por otro lado se define la actividad H como transporte

aéreo. Definimos entonces una condición tal que si la convergencia entre las secuencias B-E, C-F y D sucede luego del día 220 de proyecto entonces debe implementarse el transporte aéreo del equipamiento (actividad H), mientras que si la convergencia sucede antes de ese día se transporta por barco, como está originalmente previsto.



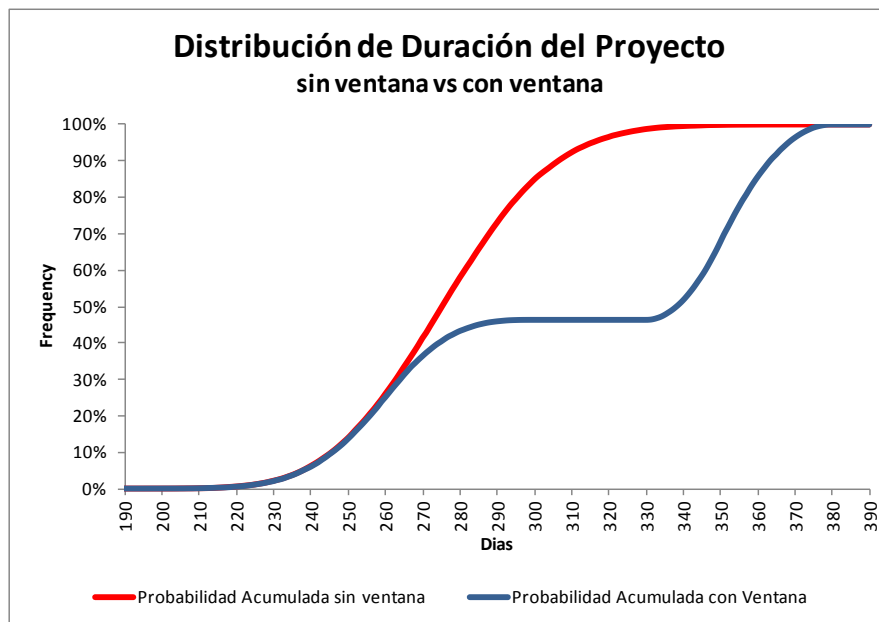
La mejor forma de visualizar el efecto de la ramificación condicional es diagramar la curva de probabilidad acumulada de duración del proyecto original simulado por Monte Carlo, con fecha de finalización con 50% de probabilidad de 276 días y 23,4 días de desvío estándar, y la misma curva con la condición impuesta sobre la fecha más tarde de la convergencia.



En nuestro ejemplo, simular la opción de transportar en avión permite bajar el tiempo medio del proyecto a 256 días y el desvío estándar a 14.7 días. Esto implica que la ramificación condicionada reduce sustancialmente el desvío estándar del proyecto ya que reduce riesgo actuando sobre escenarios tardíos y planificando una actividad que está diseñada para recuperar tiempo.

Como ya dijimos, con ramificación condicionada también se puede modelar una ventana de tiempo definiendo, para nuestro ejemplo, una condición para la cual si la convergencia entre las secuencias B-E, C-F y D no ha sucedido antes del día 220 entonces se debe esperar hasta el día 300 para recién poder realizar la actividad G.

Esto introduce típicamente distribuciones de duraciones bimodales con curvas de probabilidad acumulada como se indica en el siguiente gráfico de nuestro ejemplo:



Entre el día 300 (fecha pesimista de finalización de la actividad G habiéndola iniciado justo antes del día 220) y el día 330 (fecha optimista de finalización de actividad G habiéndola iniciado el día 300) no hay ninguna punto en la simulación, dado que el proyecto perdió la ventana del límite del día 220 y debió esperar hasta el día 300 para completar la actividad G.



El uso de ramificación condicionada en la gestión de riesgos de cronogramas es una de las herramientas más poderosas disponibles para modelar decisiones que un Project Manager puede tomar durante el transcurso del proyecto. La capacidad de modelar decisiones permite esencialmente optimizarlas y hacerlas efectivas asegurando no tomar medidas demasiado temprano o en forma muy tardía.

## 1.5 Correlación entre actividades

En la primer parte del análisis del modelo de Monte Carlo hemos supuesto que las actividades eran independientes entre sí. Sin embargo durante el análisis de drivers de riesgo indicamos que existen riesgos que afectan a varias actividades en simultáneo.

Dado que los riesgos individuales son los que causan variabilidad en la duración de las actividades y en muchos casos un grupo de actividades comparten riesgos comunes, es adecuado considerar que algún grado de correlación debe tener las actividades entre sí.

El tipo de correlación más común presente en proyectos es positiva, esto implica que cuando ciertos riesgos no se materializan, o incluso cuando existen oportunidades, las actividades involucradas tienden a mejorar en conjunto la duración. De igual modo cuando los riesgos se materializan e impactan negativamente en la duración, todas las actividades vinculadas a ese riesgo tienden a resultar de duraciones más pesimistas. Este efecto resulta en curvas de distribución de duración con mayor desvío estándar.

### 1.5.1 Signo y Fuerza de la correlación entre actividades

La correlación es un parámetro que se define para un par de actividades. Cuando se analiza el comportamiento de la duración de las actividades para determinar la existencia de correlación se puede obtener alguna de estas tres situaciones, que definimos como signo:

- **Correlación Positiva:** Ambas actividades se mueven en forma similar, es decir que suelen determinar tiempos optimistas o pesimistas simultáneamente aunque no necesariamente con la misma intensidad. El coeficiente de correlación es positivo entre 0 y 1.

- **Correlación Negativa:** Ambas actividades muestran comportamiento opuesto. Cuando una se encuentra en duraciones optimistas la otra tiende a estar en duraciones pesimistas. El coeficiente de correlación es negativo entre 0 y -1.
- **Sin Correlación:** Esto corresponde a la situación de independencia, donde el comportamiento de ambas actividades no muestra tendencia común.

La fuerza de la correlación entre dos actividades está relacionada con el valor que toma el coeficiente de correlación dado que coeficientes cercanos a 1 y -1 implican casi perfecta correlación positiva o negativa. Es lógico pensar que la fuerza de la correlación depende en gran medida de los riesgos que cada una de esas dos actividades tiene asignados. Para definir fuerza de correlación entre actividades se utiliza el método de drivers de riesgo que ya se analizó en este capítulo. A partir de la asignación de riesgos a las actividades se pueden obtener:

- **Correlación Perfecta:** corresponde a un coeficiente de correlación virtualmente igual a 1 y sucede cuando las dos actividades están afectadas por los mismos riesgos.
- **Correlación Parcial:** corresponde a un coeficiente entre 0 y 1 (o 0 y -1) y se obtiene cuando las actividades comparten algún riesgo pero tienen también asignados riesgos diferentes.

### 1.5.2 Modelado de correlación y efecto en el cronograma

El método de Monte Carlo basado en la definición de distribución de duración por medio de los tres escenarios produce actividades independientes dado que cada distribución se genera con un número aleatorio diferente.

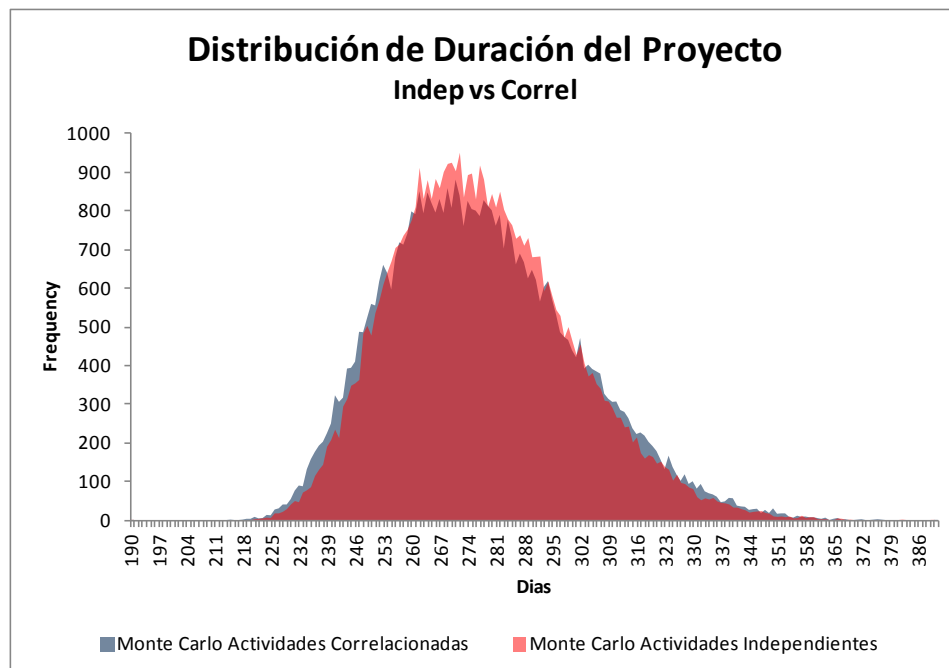
La herramienta para correlacionar actividades usando Excel es por medio de método de drivers de riesgo que se vio antes. Cuando una serie de riesgos se afectan a diferentes actividades del cronograma se impone un grado de correlación entre las actividades.

Para modelar con nuestro ejemplo el impacto de contar con actividades correlacionadas o independientes retomamos el resultado obtenido con el método de drivers de riesgo donde se usaron los mismos riesgos para afectar las actividades del proyecto. Generamos luego

una simulación con riesgos idénticos en magnitud pero diferentes en cuanto a la variable aleatoria que lo genera y afectamos de esta forma a las actividades del proyecto con riesgos de igual magnitud pero en ningún caso las actividades comparten riesgos.

El resultado más importante está asociado a la disminución del desvío estándar de la distribución de duración del proyecto cuando se manejan actividades independientes vs el caso cuando se manejan actividades correlacionadas. La disminución del desvío estándar es del orden del 10%.

En el grafico incluido aquí se comparan ambas distribuciones, se puede ver como con idénticos parámetros la curva roja queda contenida dentro de la curva azul, haciendo visible la reducción de desvío estándar para el caso de actividades independientes versus actividades correlacionadas.



## CAPITULO IV – ANALISIS DE CASO: CAMISEA WELL HEAD COMPRESSION PROJECT 2021 (WHCP21)

### 1. Descripción del Proyecto WHCP21

#### 1.1 Breve resumen de Camisea

La planta de procesamiento Malvinas se encuentra ubicada sobre la margen del río Urubamba en la selva amazónica peruana. Esta planta constituye el nodo industrial donde toda la producción de gas y condensado<sup>20</sup> de los Bloques 88 y 56 (Camisea) es recibida y procesada para luego ser transportada por medio de ductos a través de la cordillera de los andes hacia la costa del pacífico.

Camisea, y todas sus instalaciones industriales incluyendo planta Malvinas, es operada por la empresa Pluspetrol. Actualmente Camisea produce aproximadamente 1.7 bcf<sup>21</sup> de gas natural y 100,000 barriles de hidrocarburos líquidos por día que son íntegramente procesados en planta Malvinas. Estos volúmenes de producción representan más del 90% de la producción total de gas y petróleo de Perú lo que transforman a esta área petrolera en crítica para la cadena de suministro de energía del país.

La planta Malvinas está diseñada para recibir en alta presión<sup>22</sup> el gas con condensado producido por los pozos de Camisea. Luego de una separación de fases, la corriente de gas es procesada en 5 unidades criogénicas con tecnología de turbo-expansión para recuperar más del 97% del propano y el 100% del butano e hidrocarburos superiores presentes en el gas producido. El condensado por su parte es estabilizado en tres unidades de ajuste de presión de vapor y deshidratación.

Luego del procesamiento en planta Malvinas el gas natural está en condiciones de ser transportado a través de un gasoducto de 730 km hasta la ciudad de Lima. Por su parte los

---

<sup>20</sup> Hidrocarburos líquidos presentes en la producción de pozos de gas. Típicamente el condensado luego del procesamiento se separa en cortes comerciales de LPG, nafta virgen y diesel.

<sup>21</sup> BCF significa “billion of standard cubic feet”. Equivale a 28.3 millones de metros cúbicos estándar.

<sup>22</sup> 1300 PSIG “pounds per inch square”, unidad de presión. 1 atm = 14,7 PSIG.

hidrocarburos líquidos son transportados por un oleoducto de 560 km hasta la planta de fraccionamiento y despacho Pisco.

La planta Pisco, también operada por la empresa Pluspetrol, consta de tres unidades de fraccionamiento que permiten producir, a partir de los líquidos recibidos de planta Malvinas y por medio de procesos de destilación, cuatro productos con grado comercial (propano, butano, nafta virgen y MDBS). Planta Pisco tiene también capacidad para almacenar y cargar buques que transportan sus productos hacia los clientes finales.



## 1.2 Proyectos de Compresión de Pozo (WHCP)

Cuando los bloques de gas de Camisea iniciaron su producción en el año 2004 el volumen de gas y condensado de cada pozo productor podía ser recuperado en superficie en condición de alta presión (modo alta presión). Esto permitía que todo el procesamiento en planta Malvinas pueda realizarse obteniendo altos niveles de eficiencia en la recuperación de hidrocarburos líquidos sin la necesidad de instalación de compresores que aumenten la presión del gas por encima a la que producen los pozos.

Como sucede en todos los yacimientos gasíferos como parte del proceso de explotación de sus reservas, en el transcurso de los últimos 13 años se ha materializado una reducción de la presión de los reservorios lo que trae aparejado una declinación de la producción de gas en modo alta presión. La estrategia para mantener niveles de producción y asegurar un buen recupero de las reservas implica reducir la presión contra la que deben producir los pozos

(contrapresión) por medio de la instalación de compresores en zonas cercanas a los pozos o en la entrada a planta (well head compression projects, WHCP).

En el caso de Camisea se desarrolló en el año 2010 un estudio conceptual que determinó la conveniencia de implantar las unidades de compresión en la planta Malvinas. La compresión de los bloques productores se realizaría en fases que representan niveles de presión específicos. En total para comprimir toda la producción de Camisea se estima que deberían instalarse aproximadamente 210 MW distribuidos en siete turbocompresores centrífugos durante el lapso de 15 años.

En el año 2013 se puso en funcionamiento los primeros dos turbocompresores Siemens SGT-700 para comprimir el gas que llega a planta Malvinas producido del bloque 56. Ese proyecto se denominó WHCP13 (Well Head Compression Project 2013) y se realizó entre 2009 y 2013.

Durante el año 2017 se debe iniciar la primera etapa de ingeniería de un nuevo proyecto que tiene por objetivo instalar dos turbocompresores adicionales de similar potencia a lo instalado en 2013. El proyecto debe desarrollarse de forma de asegurar que hacia el año 2021 se puedan poner en marcha esas dos nuevas unidades y así iniciar la etapa de compresión del bloque 88.

### **1.3 ¿Por qué elegimos WHCP21 para modelar Monte Carlo?**

Para analizar en qué grado el método Monte Carlo agrega valor a la gestión del cronograma de un proyecto de la industria “upstream” del gas y petróleo, y cuáles son sus ventajas frente a métodos deterministas como CPM y PERT hemos decidido utilizar el ejemplo del proyecto WHCP21. En esta sección describimos la problemática más común encontrada a la hora de aplicar Monte Carlo a proyectos “upstream” e indicamos los motivos por los que hemos seleccionado WHCP21 para nuestro análisis.

Consideramos que la complejidad de los proyectos que se desarrollan en el upstream no deriva de la magnitud del proyecto, en general de menor escala que proyectos “downstream” o grandes obras civiles, sino de la combinación de factores coyunturales que obliga a plantear estrategias y definir expectativas de duración de actividades para cada

proyecto sin poder hacer uso de datos históricos o estimaciones como las que hemos visto en la parte teórica.

Cada proyecto upstream típicamente se desarrolla en una geografía remota con grandes complejidades logísticas y climáticas. La logística debe establecerse en muchos casos específicamente para el proyecto por lo que es difícil conocer estadística de tiempos de transporte. Las complejidades climáticas suelen ser subestimadas o son poco conocidas si es la primera vez que la empresa o la contratista principal de obra realizan un proyecto en esa zona.

La ingeniería a desarrollar tiene en general un alcance técnico muy diferente respecto a otros proyectos por lo que la experiencia previa solo parcialmente puede ser de utilidad para estimar duraciones de actividades en futuros proyectos. Los tipos de equipamiento a fabricar e instalar deben cumplir especificaciones diferentes en cada proyecto, en muchas oportunidades incluso los materiales de fabricación son específicos para las condiciones particulares de fluido y climáticas.

El mercado de empresas de construcción es muy limitado, generalmente con pocas empresas capacitadas para desarrollar este tipo de proyectos y cuya disponibilidad depende del nivel de actividad que es gobernado en muchos casos por el precio del barril de petróleo. Suele suceder entonces que cuando las empresas petroleras tienen condiciones favorables para realizar proyectos aparece muy presente la limitante de empresas constructoras con disponibilidad para realizarlos.

Los procesos de suministros suelen confrontarse con limitaciones de cantidad de oferentes o cumplimiento parcial de los requerimientos técnicos del proyecto. Todo esto determina que sea muy complejo poder estimar plazos de contratación y muchas veces deba realizarse una ingeniería de contratación específica para cada proyecto.

Las empresas constructoras que deben desarrollar la obra en el sitio generalmente toman la fuerza laboral específicamente para cada proyecto con personal que debe estar dispuesto a realizar esquemas de rotación entre el sitio de obra y su hogar. A priori existe gran incertidumbre en la estimación de parámetros de productividad y por lo tanto en la estimación de duración de tareas.

En resumen, hemos listado algunos de los motivos más importantes que entendemos explican el porqué en la actualidad no resulta ser una práctica habitual, ni en empresas del Oil and Gas ni empresas de la construcción, el desarrollo de cronogramas aplicando Monte Carlo al menos en las fases donde el proyecto no está todavía totalmente desplegado.

Entendemos que la herramienta mayormente se usa, en cambio, para el desarrollo de análisis de riesgo de cronogramas y sensibilidad en proyectos donde los principales contratistas han sido definidos y ya se ha podido iniciar actividades de construcción.

En términos generales, incurrir en una sobreestimación del escenario pesimista produce un alejamiento sustancial de la media respecto al valor más probable en el método de estimación de tres puntos. Por lo tanto esta sobreestimación determina duraciones esperadas, para las actividades y para el proyecto, muy diferentes de lo que se puede obtener por CPM. En un contexto de falta de datos para sustentar las estimaciones de escenarios pesimistas es poco el valor que puede agregar al equipo de proyecto una estimación de duración probabilística. Para el desarrollo de Monte Carlo es clave la calidad de la información de base que se utiliza para el modelo. Hillson describe en el prefacio del libro de Hulett “Practical Schedule Risk Analysis” el problema denominado GIGO (por Garbage In Gospel Out)<sup>23</sup> que suele darse en muchos modelos donde se presta muy poca atención a la calidad de información de input pero luego se le asigna gran credibilidad al output del modelo.

El desarrollo del proyecto Camisea se inició a principios del año 2000 y a la fecha se han ejecutado cinco proyectos mayores como parte del plan de desarrollo del yacimiento. En total estos cinco proyectos implicaron la instalación de cinco plantas criogénicas y nueve turbocompresores.

La filosofía de crecimiento en las instalaciones ha seguido un esquema modular lo que determinó grandes similitudes entre los cinco proyectos desarrollados en términos de desarrollo de ingeniería, estrategia de suministros, complejidad logística y alcance de la construcción.

---

<sup>23</sup> Tradicionalmente GIGO se utiliza como abreviatura de Garbage In Garbage Out. Hillson usa una versión algo más reciente de dicha sigla que hace hincapié no solo en el hecho de que los modelos son creados a partir de mala información sino que luego se les asigna una credibilidad muy alta.



Pluspetrol ha operado en la selva amazónica durante 15 años lo que le ha permitido adquirir un conocimiento profundo de los aspectos coyunturales, tales como ventanas de navegación fluvial e intensidad de lluvias, y trabajar en optimizar recursos y duración de actividades en ese contexto conocido.

Creemos entonces que los riesgos específicos de cada actividad, que son el input necesario para poder estimar adecuadamente los escenarios optimista y pesimista, son conocidos por la organización y el avenimiento de un sexto proyecto (WHCP21) podría pensarse con un modelo de desarrollo de cronogramas con base probabilística desde el inicio mismo del proyecto sin caer en modelos que tengan el efecto GIGO.

#### **1.4 Alcance del proyecto WHCP21**

En esta sección describimos brevemente el alcance específico del proyecto WHCP21 para que sirva al desarrollo de los procesos de PTM necesarios para la construcción del cronograma de proyecto.

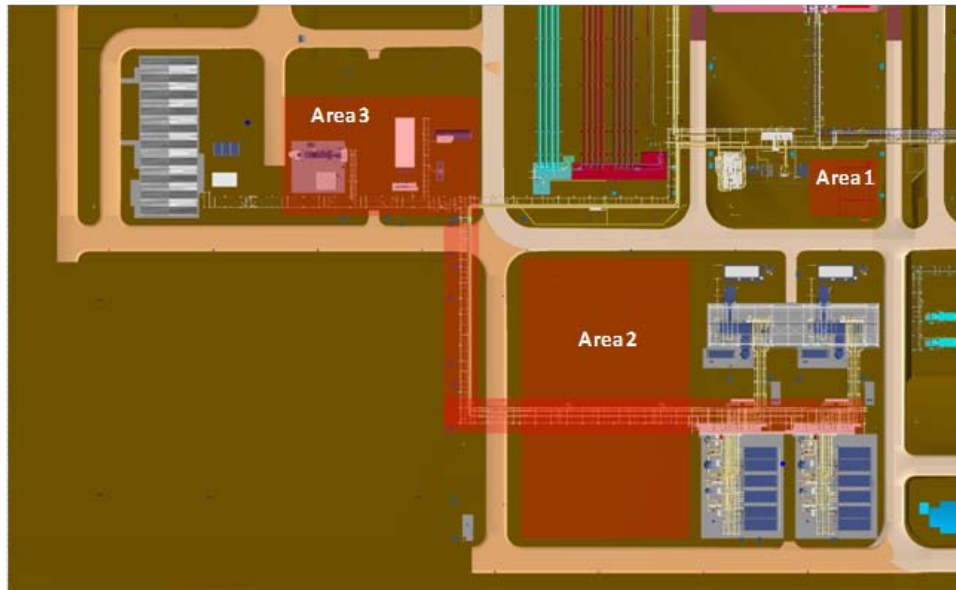
WHCP21 debe ampliar la capacidad de compresión de gas producido que llega a planta Malvinas desde los pozos. Esto implica la instalación de dos turbocompresores centrífugos de 30 MW cada uno con todos sus sistemas y equipos complementarios y auxiliares.

Los sistemas complementarios de cada compresor refieren a todo equipamiento necesario para permitir la compresión de gas exceptuando el compresor y la turbina misma. Ejemplo de estos equipos son los separadores de succión, separador de sólidos y scrubbers, dado que es crítico para el funcionamiento del compresor que no haya ingreso de líquido con la corriente gaseosa. También se incluye en este rubro los aeroenfriadores de inter-etapa y de salida, dado que el proceso de compresión genera calentamiento en la corriente gaseosa que luego debe enfriarse.

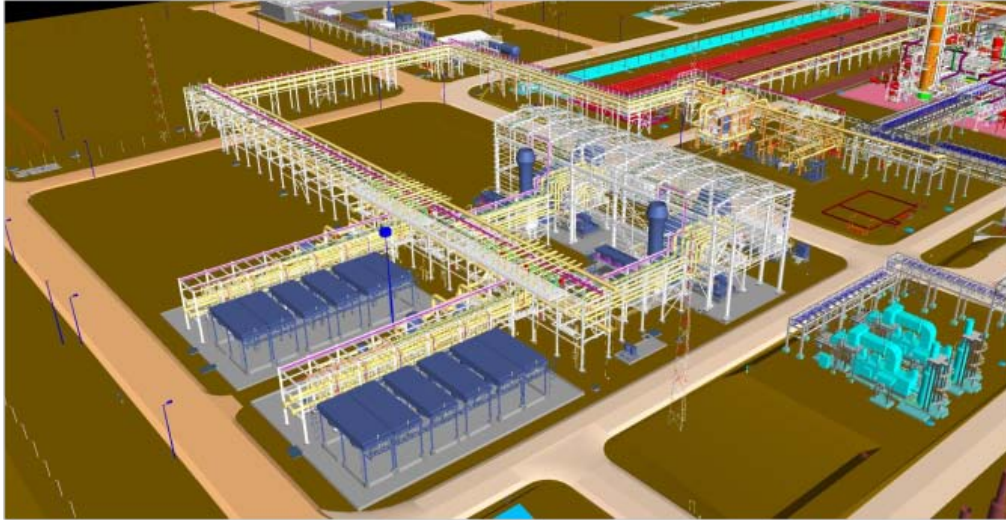
Los sistemas auxiliares a ambos compresores refieren a todos los servicios que deben suministrarse al compresor para que pueda funcionar. Esto incluye gas combustible para la operación de la turbina, energía para la electrónica y equipos con motores eléctricos, nitrógeno para el funcionamiento de los sellos, aire de instrumentos para el funcionamiento de las válvulas de control y shut down y sistemas de drenajes y alivio. Para poder

suministrar estos servicios a los compresores deben desarrollarse instalaciones con equipamiento que permita producirlos. De esto deriva la necesidad de instalar compresores de aire, generadores de energía, membranas para producir nitrógeno y una serie de recipientes a presión para almacenar y dotar a la instalación de una autonomía mínima de estos servicios.

Los equipos a instalar se distribuyen en tres áreas específicas de la planta que se indican en la imagen adjunta:



- Área 1: Separador, sistemas de fuel gas y gas de sello.
- Área 2: Turbocompresores, aerofriadores, scrubbers y separador de sólidos.
- Área 3: Turbogenerador, sistema de nitrógeno y aire de instrumentos
- Interconexión de tuberías, cables de potencia, instrumentación entre estas tres áreas.



Vista de compresores 1 y 2 instalados durante WHCP13 (aeroenfriadores, turbocompresor, parrales) y espacio adjunto donde deben instalarse los compresores 3 y 4 de WHCP21.

## **2. Desarrollo de procesos de PTM para WHCP21**

En esta sección desarrollamos los procesos 1, 2, 3 y 5 de PTM para luego construir el cronograma de proyecto con las tres metodologías CPM, PERT y Monte Carlo.

### **2.1 Planificar la Gestión del Cronograma (Proceso 1)**

Como se indicó en el apartado teórico, este proceso define las bases para el desarrollo, gestión y control del cronograma durante el proyecto. Nosotros utilizamos el marco de este proceso para definir los criterios y variables con el cual desarrollaremos el cronograma.

#### **2.1.1 Modelo de Cronograma**

Los cronogramas de proyecto pueden construirse a partir de diferentes grados de apertura de las actividades. En la medida que los proyectos avanzan en su ejecución y es necesario planificar en detalle la demanda de recursos se hace necesario llevar las actividades a su mínima expresión. Por ejemplo, podríamos definir para la ingeniería de un proyecto los siguientes tipos de apertura en actividades que la componen:

- **Global sin apertura: 1 actividad**

Actividad: Ingeniería del Proyecto

- **Apertura Alto Nivel: 4 actividades**

Actividad 1: Ingeniería Conceptual

Actividad 2: Ingeniería FEED

Actividad 3: Ingeniería de Equipos Principales

Actividad 4: Ingeniería de Detalle de la Construcción

- **Apertura Detallada: 50 actividades**

Actividad 1 a 5: Ingeniería Conceptual (cada entregable como actividad)<sup>24</sup>

Actividad 6 a 12 : Ingeniería FEED (cada especialidad de ingeniería como actividad)<sup>25</sup>

Actividad 13 a 29: Ingeniería de Equipos Principales (por grupo de documentos)<sup>26</sup>

Actividad 30 a 50: Ingeniería de Detalle de la Construcción (por grupo de documentos).

Para nuestro cronograma utilizaremos un grado de apertura compatible con lo que hemos definido como Alto Nivel. Esto determina cronogramas de proyecto con aproximadamente 50 actividades en total, que resulta útil para el manejo global del proyecto sin perder calidad en la descripción de las actividades individuales que lo constituyen. Cada una de estas actividades luego es debidamente abierta en las actividades de apertura detallada por cada uno de los contratistas y la estimación de duración de las actividades en Alto Nivel es periódicamente actualizada con el resultado de los cronogramas detallados.<sup>27</sup>

### 2.1.2 Nivel de estimación de duración de actividades

Para la definición de duración de actividades utilizaremos fundamentalmente el juicio de expertos y estimación por análogos. En todos los casos la referencia más importante se toma de los proyectos anteriormente realizados por lo que consideramos se puede asegurar un rango de confiabilidad suficientemente bueno aunque todavía no se haya iniciado la ingeniería del proyecto.

---

<sup>24</sup> Por ejemplo balance de masa, diagramas de proceso, listado de equipos principales, estimación de costos y cronograma de alto nivel de proyecto.

<sup>25</sup> Ingeniería de procesos, tuberías y estructuras, civil, electricidad, instrumentación y control, mecánica, equipos rotantes.

<sup>26</sup> Por ejemplo desarrollo de P&IDs, Hojas de datos de equipos, hojas de datos de instrumentos y válvulas de control.

<sup>27</sup> La AACE tiene una práctica recomendada 37R-06 que define niveles de detalle de cronogramas. En esta publicación definen 5 niveles (L0 a L4X). Para nuestro ejemplo Global sin apertura en ingeniería sería L1, Alto Nivel es L3 y Apertura Detallada L4X.

Para cada actividad determinaremos a partir de las metodologías arriba indicadas los tres escenarios Optimista, Mas Probable y Pesimista de duración. Modelaremos las actividades con distribuciones triangulares para ubicarnos con una estimación conservativa dándole mayor peso al escenario pesimista respecto al modelado con BetaPERT.

Durante las entrevistas buscaremos asegurarnos que el escenario optimista sea el 1% de los casos y el pesimista sea el 99%.

### **2.1.3 Unidades de Medida**

Definiremos la duración de las actividades en días corridos con semanas de 7 días. La estimación incluye dentro del valor indicado según el tipo de actividad días no laborables.

### **2.1.4 Fecha de inicio**

Definiremos como fecha de inicio del proyecto el día 1 de mayo de 2017.

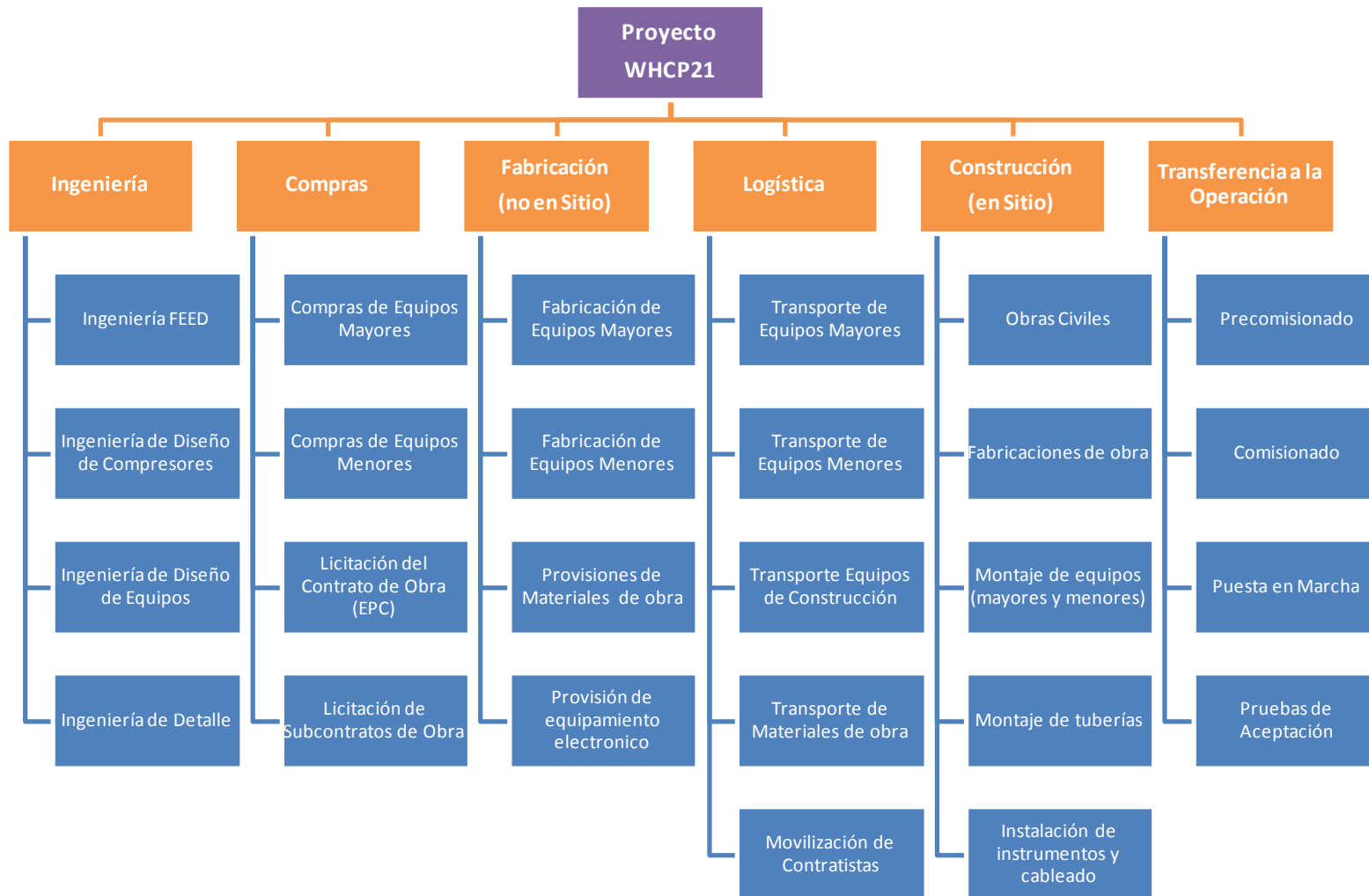
## **2.2 Definir Actividades (Proceso 2)**

Para el proceso de definición de actividades a partir de las cuales desarrollaremos el cronograma de proyecto hemos seguido los lineamientos del PMBOK. En primera instancia determinamos una apertura del alcance del proyecto en base a rubros de actividades que lo componen para construir una estructura de descomposición del trabajo (Work Breakdown Structure, WBS).

Definimos seis rubros mayores: ingeniería, compras, fabricación (no en sitio), logística, construcción (en sitio) y transferencia a la operación. Cada uno de estos rubros constituye una parte esencial del alcance del proyecto y puede asimismo abrirse en entregables más acotados y actividades específicas.

A continuación incluimos la WBS generada donde hemos descompuesto el alcance solamente hasta el grado de detalle que nos interesa para identificar las actividades compatibles con un cronograma de alto nivel.

Apertura del alcance del proyecto de acuerdo a los grandes rubros de actividades:



### **2.2.1 Ingeniería**

El proyecto se inicia con un nivel de definición técnica baja. El equipo de proyecto debe preparar un paquete de documentación de ingeniería que permita avanzar con la compra de aquellos equipos que tienen muy largo plazo de entrega (en este caso los turbocompresores) y con el proceso de determinación del contratista de obra. Esta primera fase de ingeniería se denomina FEED (Front End Engineering Design).

Luego de completada la compra de los equipos de largo plazo de entrega existe una fase de ingeniería que desarrolla el proveedor de dicho equipamiento como parte del diseño previo a la fabricación.

Por último, una vez definido el contratista principal de obra, se debe iniciar la ingeniería de detalle del proyecto. Esta es una fase larga de la ingeniería donde cada elemento que compone el alcance debe ser diseñado y definido detalladamente. La provisión del equipamiento auxiliar y de equipos menores (generalmente de menor plazo de entrega) suele ser parte del alcance del constructor.

### **2.2.2 Compras**

El segundo rubro está vinculado con la gestión de suministro de los servicios y materiales necesarios para desarrollar el alcance del proyecto. Una primera fase de compras incluye el proceso para la compra de los equipos mayores y la determinación del contratista principal de obra.

Posteriormente cada uno de esos dos contratos, provisión de turbocompresores y contratista de obra, deben desarrollar compras de equipos auxiliares y materiales para la fabricación (no en sitio) y construcción (en sitio).

### **2.2.3 Fabricación**

Este rubro incluye todas las actividades de fabricación de equipos mayores, equipos auxiliares y menores que se realiza en talleres de proveedores que han sido contratados para su suministro. Los talleres están ubicados típicamente en zonas urbanas donde la fabricación se realiza en ambientes controlados que permite asegurar niveles de

productividad y reducir rangos de duraciones. Una vez concluida la fabricación deben realizarse ensayos de fábrica (Factory acceptance tests, FATs) que pueden resultar en re-trabajos del tipo de ramificación probabilística como se vio en la teoría. Por último, luego de aprobadas las FAT los equipos deben transportarse hasta el sitio de la obra, típicamente por barco.

Este rubro también incluye los procesos de provisión de otros materiales como instrumentación, tableros y válvulas, que aunque siendo elementos más estandarizados tienen un plazo de entrega considerable.

#### **2.2.4 Logística**

Dado que el sitio donde debe realizarse el proyecto se encuentra en la selva amazónica peruana, la logística de movimiento de materiales y grupos de trabajo es crítica y debe ser cuidadosamente gestionada. Prácticamente la totalidad de los equipos y materiales deben transportarse via océano Atlántico y río Amazonas hasta la ciudad de Iquitos para luego completar el trayecto hasta la planta Malvinas por via fluvial en barcazas.

Existen muy pocos barcos que hacen recorrido regular con Iquitos y que tienen capacidad para descargar equipos, dado que el puerto de Iquitos no cuenta con infraestructura para movimiento de cargas pesadas. Esto obliga a que un equipo fabricado en Europa deba quizás enviarse por barco a Houston para recién cargarse en el barco especial que puede llegar y descargarlo en Iquitos.

Los ríos selváticos sufren grandes variaciones en su cauce dependiendo de la época del año. Durante la época de lluvia suelen ser caudalosos lo que permite transportar cargas pesadas en barcazas, sin embargo durante la época sin lluvias el transporte es virtualmente imposible. Durante el periodo de vaciante, que transcurre entre junio y septiembre, virtualmente ningún equipamiento se puede transportar en forma fluvial, solamente cargas de bajo peso. Las cargas de peso moderado deben ser transportadas entre octubre y mayo y las cargas de gran peso solamente pueden ser transportadas durante la época de creciente en los meses que van desde diciembre a marzo.



Hay por tanto para los compresores y el separador, ambos equipos de gran peso, una ventana de navegabilidad que transcurre entre diciembre y marzo donde necesariamente se debe asegurar que se realice el transporte. Caso contrario habría que esperar unos ocho meses hasta la próxima temporada. Este fenómeno puede modelarse como una ramificación condicionada tal como se vio en la teoría aunque para fines prácticos del proyecto es inadmisibles perder la ventana y todo el cronograma del proyecto y la secuencia de actividades debe pensarse para reducir al máximo la probabilidad de esa ocurrencia.

### **2.2.5 Construcción**

Incluye todas las actividades de construcción que se desarrollan en planta Malvinas. La construcción se inicia con las obras civiles para preparación de la zona donde se instalarán los nuevos equipos, siendo las bases de los compresores la de mayor envergadura. Posteriormente deben montarse sobre sus bases todos los equipos recibidos en planta.

También incluye, entre otras actividades, toda la fabricación en campo de tuberías de interconexión y estructuras (tales como parrales, soportes y pasarelas), montaje de tuberías que vinculan los nuevos equipos a la instalación existente y válvulas manuales, instalación de cableado eléctrico y de instrumentos.

### **2.2.6 Transferencia a la Operación**

Este rubro incluye todas las actividades que deben realizarse como parte de las pruebas y controles necesarios para garantizar que las instalaciones construidas están en condiciones de ponerse en funcionamiento en forma segura. Este grupo de actividades suele definirse como pre-comisionado y consiste en un exhaustivo y largo proceso de revisión sistemática y registro de todos los componentes instalados.

Luego de aprobadas todas las actividades del pre-comisionado se puede avanzar en desarrollar el comisionado. Esta etapa incluye una serie de actividades destinadas a probar las nuevas instalaciones con fluido de proceso (gas natural en este caso) y se desarrolla previo a la puesta en marcha y ensayos de funcionamiento (Site Acceptance Tests, SAT o también Performance Tests).

## 2.2.7 Agrupamiento de Actividades

A partir de la apertura del alcance de proyecto descripta definimos tres grupos de actividades de acuerdo con la secuencia del proyecto y sus contratos principales. Estos son actividades generales, actividades asociadas al contrato de provisión de los compresores y actividades asociadas a la construcción en sitio (EPC por Engineering, Procurement and Construction).

<b>PROYECTO WHCP21</b>			
<b>GENERALES</b>			
<b>Contrato</b>	<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
General	E01	Ingeniería FEED	Preparación de ingeniería para licitar compra de equipos principales y EPC. Incluye estudios especiales.
General	E02	Pliego Compresores	Preparación del pliego técnico para licitar compresores
General	E03	Pliego EPC	Preparación del pliego técnico para licitar Construcción.
<b>COMPRESORES</b>			
<b>Contrato</b>	<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
Contrato Compresores	S01	Licitación Compresores	Proceso de compra de los dos turbocompresores.
Contrato Compresores	E11	Diseño Termodinámico	Diseño básico de compresor por proveedor
Contrato Compresores	E12	Diseño Compresor	Diseño de detalle de compresor y auxiliares
Contrato Compresores	S11	Compra insumos y componentes menores	Compra de partes (rotor, casing, auxiliares)
Contrato Compresores	F11	Fabricación de Compresor	Fabricación de elementos del compresor (rotor, casing, otros elementos).
Contrato Compresores	L11	Entrega y Transporte a Peru de Dummy	entrega de dummy para permitir la instalación de piping en obra sin tener el compresor.
Contrato Compresores	F12	Ensamble Compresor en Fabrica	Ensamble de compresor y fabricación de skids
Contrato Compresores	F13	Ensamble Skids	Preparación del paquete turbina, compresor y auxiliares para el ensayo FAT
Contrato Compresores	F14	Ensayo de Performance	Ensayo de performance de compresores. Desarrollo de FAT
Contrato Compresores	F15	Resolución de Punch List	Levantamiento de no conformidades detectadas en FAT
Contrato Compresores	F16	Embalaje para Transporte	Export packing para transporte a Peru
Contrato Compresores	L12	Transporte de Compresores a Peru	Transporte marítimo a Peru (hasta Malvinas). Franja de navegabilidad entre septiembre y marzo.

EPC			
Contrato	Código	Nombre	Descripción
Contrato EPC	S02	Licitación de EPC	Proceso de suministros para seleccionar empresa que realiza EPC.
Contrato EPC	E22	Ingeniería de Detalle	Ingeniería de detalle del proyecto para todas las especialidades. Desarrollo de toda la documentación para compra de elementos del proyecto.
Contrato EPC	S21	Compra Separadores	Licitación y compra de recipientes a presión (separadores y scrubbers)
Contrato EPC	S22	Compra Generador	Licitación y compra de turbogenerador a gas.
Contrato EPC	S23	Compra otros equipos críticos	Licitación y compra de otro equipamiento de planta (compresores de aire, nitrógeno, skid de fuel gas)
Contrato EPC	S24	Compra Aeros Enfriadores	Licitación y compra de aeroenfriadores
Contrato EPC	S25	Compra hasta entrega de piping 80% y válvulas manuales	Licitación y compra del MTO que surge de un avance parcial de la ingeniería de detalle. Es aproximadamente el 80% de todo lo requerido
Contrato EPC	S26	Compra instrumentos / electricidad	Licitación y compra de toda la instrumentación, equipos eléctricos (CCM) y materiales de control y eléctricos (cables, bandejas, etc.)
Contrato EPC	S27	Compra hasta entrega de piping 20%	Compra del remanente de materiales de piping luego de completada la ingeniería de detalle
Contrato EPC	F21	Fabricación Separadores	Fabricación de los separadores en taller.
Contrato EPC	F22	Fabricación Generadores	Fabricación de turbogenerador
Contrato EPC	F23	Fabricación Aero Enfriadores	Fabricación de aeroenfriadores
Contrato EPC	F24	Fabricación Puente Grúa	Fabricación de puente grúa a instalarse en cada uno de los galpones de compresores.
Contrato EPC	F25	Fabricación otros equipos críticos	Fabricación de otros equipos críticos (compresor de aire, nitrógeno, fuel gas).
Contrato EPC	L21	Transporte de Separador a Peru	Transporte marítimo a Peru (hasta Malvinas).
Contrato EPC	L22	Transporte de Generador a Peru	Transporte marítimo a Peru (hasta Malvinas).
Contrato EPC	L23	Transporte de Aeros a Peru	Transporte marítimo a Peru (hasta Malvinas).
Contrato EPC	L24	Transporte de Puente Grúa	Transporte marítimo a Peru (hasta Malvinas).
Contrato EPC	L25	Transporte de otros equipos críticos	Transporte marítimo a Peru (hasta Malvinas).
Contrato EPC	L26	Transporte Piping 80%, válvulas	Transporte marítimo a Peru (hasta Malvinas).
Contrato EPC	L27	Transporte de Instrumentos / elect	Transporte marítimo a Peru (hasta Malvinas).
Contrato EPC	L28	Transporte Piping 20%	Transporte a Peru (hasta Malvinas). No necesariamente el via marítima.
Contrato EPC	L29	Movimiento de Equipos a Obra	Transporte de equipos requeridos para la ejecución de la obra (grúas, maquinas soldadoras, etc).
Contrato EPC	C21	Instalación de Campamento	Instalación del contratista en Malvinas. Armado de oficina de obra y traslado de mano de obra
Contrato EPC	C22	Movimiento de suelo	Obra civil de nivelación y preparado de suelo en zona de obra.
Contrato EPC	C23	Construcción de bases civiles	Fabricación de bases civiles de compresores. Incluye también fabricación de otras bases civiles del proyecto.

<b>EPC (continuado)</b>			
<b>Contrato</b>	<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
Contrato EPC	C24	Construcción de Galpón de Compresores	Montaje del galpón de compresores.
Contrato EPC	C25	Montaje de Compresores	Montaje de Compresores y Turbinas
Contrato EPC	C26	Montaje de Equipos auxiliares	Montaje de todos los equipos (separadores, generador, etc)
Contrato EPC	C27	Fabricación de Estructuras y Piping	Fabricación en sitio de estructuras metálicas y tuberías
Contrato EPC	C28	Montaje Estructuras y Piping	Instalación de estructuras y montaje de tuberías
Contrato EPC	C29	Instalación de Instrumentación	Instalación de toda la instrumentación y cableado entre sala de control y campo.
Contrato EPC	C30	Instalación de cables de potencia	Instalación de equipos eléctricos en sala de control y cableado a campo.
Contrato EPC	C31	Precomisionado de piping	Precomisionado de especialidad piping (incluye prueba hidráulica y barrido).
Contrato EPC	C32	Precomisionado de instrumentos	Precomisionado de instrumentación y control. Incluye calibración de instrumentos, pruebas de lazos y revisión de cableado.
Contrato EPC	C33	Precomisionado eléctrico	Precomisionado de equipos eléctricos. Incluye megado de cables y chequeos de conexionado.
Contrato EPC	C34	Precomisionado de procesos	Precomisionado de procesos. Incluye revisión de P&IDs y prueba de matriz de shut down.
Contrato EPC	C35	Comisionado	Comisionado de todas las especialidades. Prueba de instalación con fluido de proceso.
Contrato EPC	C36	Puesta en marcha Compresor 3	Puesta en marcha de Compresor 3
Contrato EPC	C37	Puesta en marcha Compresor 4	Puesta en marcha de Compresor 4
Contrato EPC	C38	Performance Test	Test de performance de ambos compresores a caudal de diseño.

### **2.3 Secuencia de Actividades (Proceso 3)**

Para la definición de la secuencia y relación lógica entre las actividades definidas en el punto anterior se trabajó fundamentalmente con las técnicas de entrevista a expertos y análisis de información histórica.

Tal como definimos arriba los tres grupos de actividades en el proyecto WHCP21, un primer grupo de actividades generales, otro de actividades relacionadas al contrato de provisión de los compresores y por último de actividades vinculadas al contrato del EPC.

En este apartado describimos brevemente la secuencia y relaciones lógicas entre dichas actividades.

### **2.3.1 Secuencia de actividades generales**

La primera actividad del proyecto consiste en iniciar la ingeniería FEED con el objetivo de definir con mayor precisión y apertura el alcance técnico del proyecto. Esto implica el desarrollo de un volumen de documentación de ingeniería de todas las disciplinas (electricidad, instrumentación y control, mecánica, procesos, tuberías, etc.) con un grado de detalle que permita proceder a licitar provisiones mayores y la construcción.

Luego de que se ha logrado cierto avance en la definición de ingeniería se debe considerar el inicio de trabajos para desarrollar los pliegos de licitación de aquellas provisiones que dado el plazo de entrega elevado resulta necesario considerar su compra en fase temprana. A estos equipos que se define comprar durante el FEED se los denomina LLI (Long Lead items).

Asimismo con un mayor avance de la ingeniería FEED se puede iniciar la preparación del pliego para licitar la construcción. La empresa que resulte adjudicataria de la construcción deberá completar la ingeniería desarrollando la fase de Ingeniería de Detalle y comprar todos aquellos elementos que no fueron definidos como LLI.

Las actividades que se desarrollan durante la ingeniería del FEED están mejor representadas por una lógica Start – Start con una cantidad de días de corrimiento respecto al inicio de la ingeniería del FEED.

Alternativamente durante esta fase se podría también proceder a gestionar la compra de otros equipos menores, materiales de tuberías e instrumentos con gran plazo de entrega. También se puede considerar la contratación de la obra civil (movimiento de suelo y construcción de bases civiles mayores). La definición de cuáles son las actividades que deben desarrollarse durante la ingeniería del FEED o pueden ejecutarse dentro del contrato de la construcción (EPC) depende de los resultados de la simulación del cronograma y como dichas actividades mejoren la probabilidad de cumplimiento del proyecto en los plazos requeridos.

### **2.3.2 Secuencia de actividades del contrato de compresores**

Una vez completo el pliego de compresores se inicia el proceso de licitación de los mismos que culmina con la adjudicación al proveedor. A partir de este punto se inician una serie de actividades que son realizadas por el proveedor de dichos compresores.

La secuencia generalmente incluye desarrollar el diseño final de los compresores, comprar los elementos necesarios para su fabricación, proceder a la fabricación, ensamble, pruebas y entrega al cliente. Todas actividades que se pueden modelar bien con una lógica Finish – Start.

### **2.3.3 Secuencia de actividades del contrato de Construcción (EPC)**

El contrato del EPC es la parte central del proyecto y generalmente incluye la mayor parte de las actividades.

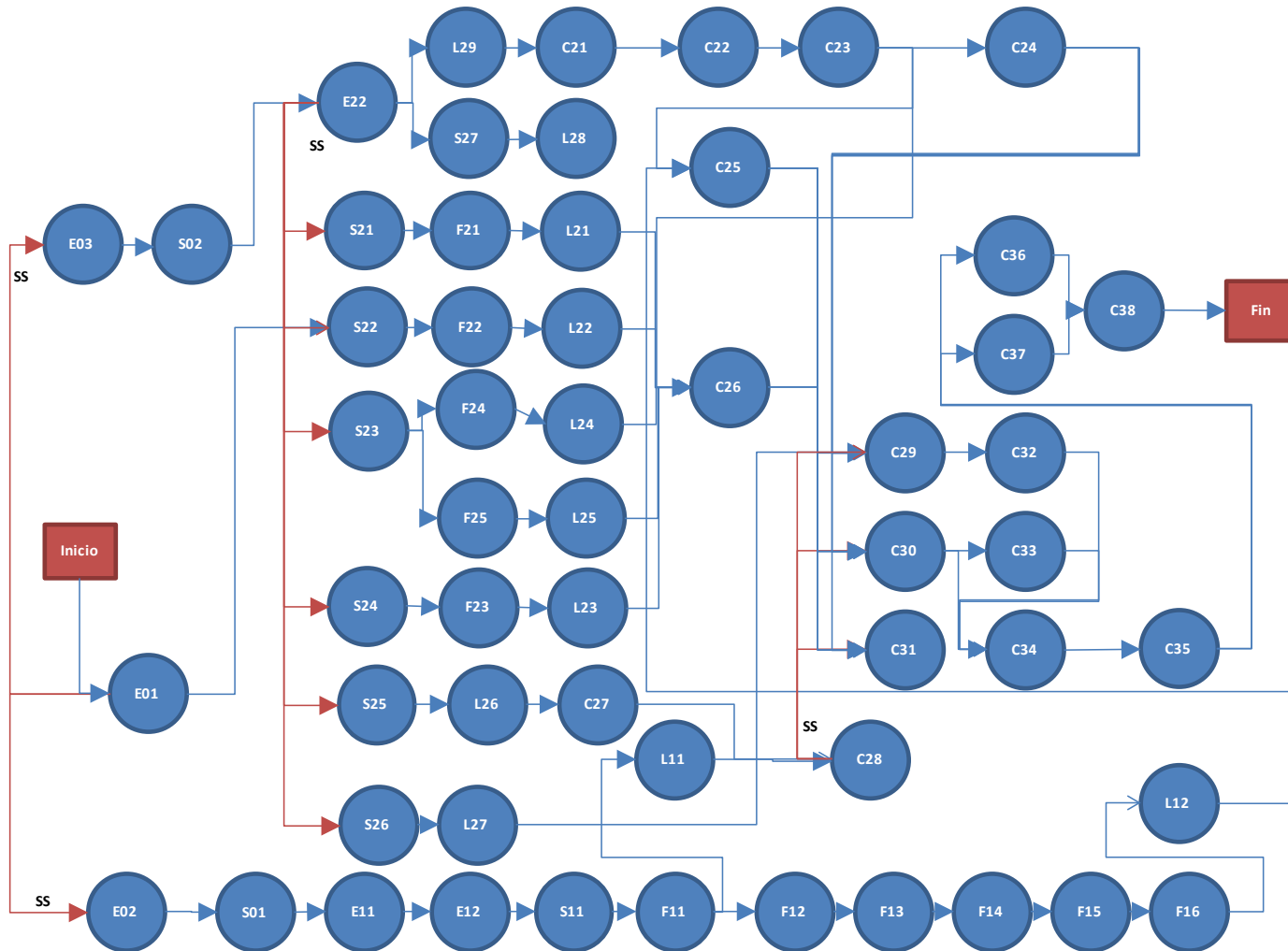
Luego de la licitación del contrato del EPC debe iniciarse la ingeniería de detalle. A medida que esta ingeniería avanza es posible ir procediendo a comprar los equipos y todos los elementos necesarios para el desarrollo del proyecto. Las compras de los materiales para la construcción tienen una lógica Start – Start más un periodo determinado de días necesarios para garantizar que la ingeniería de detalle ha avanzado lo suficiente como para especificar adecuadamente lo que se requiere comprar.

Cada una de las compras realizadas por el contratista de la construcción genera una secuencia de actividades en serie asociadas a la fabricación, transporte a Perú y montaje en obra.

Por último una vez llegados todos los materiales a obra existen una serie de actividades que funcionan como punto de convergencia (Merge Points). Estos son en general las actividades de montaje de instrumentos, montaje de electricidad y todas las actividades de pre-comisionado las cuales requieren haber completado toda la fase constructiva y de montaje.

### 2.3.4 Secuencia de actividades del contrato de EPC

Incluimos el diagrama de precedencia. Cada actividad identificada por su código. En rojo se indican las lógicas Start – Start.



## 2.4 Estimar Duración de Actividades (Proceso 5)

La determinación de la duración de cada una de las actividades fue indudablemente el proceso más complejo dentro del desarrollo de los procesos de PTM. En nuestro ejemplo hemos desarrollado una estimación del tipo top down, partiendo de información general del proyecto para determinar información particular.

Las duraciones de las actividades, sin embargo, dependen fuertemente de detalles específicos. En particular todas las actividades vinculadas con la construcción dependen del volumen de trabajo<sup>28</sup> y de la capacidad máxima de recursos que pueden manejarse en paralelo<sup>29</sup> que son parámetros solo conocidos luego de avanzada la ingeniería de detalle.

Para determinar duraciones utilizamos las técnicas de entrevista a expertos y análisis de información histórica. A partir de esa información determinamos los tres escenarios de acuerdo al método de estimación por tres puntos y modelamos las actividades con distribución de duración triangular.

Cuatro entrevistas a expertos se realizaron en todos los casos a personas que se desempeñaron en pasados proyectos como gerentes de proyectos y responsables de ingeniería. En general hubo buen acuerdo en el escenario optimista y más probable. Sin embargo fue complejo determinar el escenario pesimista en donde se evidenció mayor dispersión en la estimación. Como escenario pesimista optamos por tomar aquel que más veces apareció en las entrevistas y no el más pesimista. En este punto consideramos que utilizar distribución triangular ya le da gran peso al escenario pesimista.

Por otra parte utilizamos los cronogramas de proyectos pasados para comparar las estimaciones realizadas por los expertos buscando verificar que en todos los casos caían en los rangos determinados para este ejercicio. Se adjuntan las tablas de actividades con la duración de los tres escenarios expresados en días corridos.

---

<sup>28</sup> Algunos ejemplos son los trabajos civiles que dependen fuertemente del volumen en m<sup>3</sup> y la disponibilidad de maquinaria y mano de obra en simultáneo. El montaje de equipos en función de la disponibilidad de grúas o fabricación de tuberías en función de las pulgadas de soldadura, cantidad de soldadores calificados y equipos de soldadura.

<sup>29</sup> La determinación de la cantidad máxima de mano de obra en simultáneo debe definirse en base a criterios económicos, evitando picos pronunciados de cantidad de mano de obra que obligue a sobredimensionar campamento y otros costos fijos.



**PROYECTO WHCP21**
**GENERALES**

Contrato	Cod	Nombre	Lógica	Predecesores	Optimista	Mas Probable	Pesimista
General	E01	Ingeniería FEED			150	180	220
General	E02	Pliego Compresores	SS+90	E01	25	30	45
General	E03	Pliego EPC	SS+120	E01	45	60	90

**COMPRESORES**

Contrato	Cod	Nombre	Lógica	Predecesores	Optimista	Mas Probable	Pesimista
Contrato Compresores	S01	Licitación Compresores	FS	E02	120	150	250
Contrato Compresores	E11	Diseño Termodinámico	FS	S01	30	45	60
Contrato Compresores	E12	Diseño Compresor	FS	E11	30	45	60
Contrato Compresores	S11	Compra insumos y componentes menores	FS	E12	25	30	60
Contrato Compresores	F11	Fabricación de Compresor	FS	S11	100	120	180
Contrato Compresores	L11	Entrega y Transporte a Peru de Dummy	FS	F11	75	90	120
Contrato Compresores	F12	Ensamble Compresor en Fabrica	FS	F11	25	30	45
Contrato Compresores	F13	Ensamble Skids	FS	F12	15	20	50
Contrato Compresores	F14	Ensayo de Performance	FS	F13	7	10	15
Contrato Compresores	F15	Resolución de Punch List	FS	F14	10	15	45
Contrato Compresores	F16	Embalaje para Transporte	FS	F15	10	15	30
Contrato Compresores	L12	Transporte de Compresores a Peru	FS	F15	75	90	120

EPC							
Contrato	Cod	Nombre	Lógica	Predecesores	Optimista	Mas Probable	Pesimista
Contrato EPC	S02	Licitación de EPC	FS	E03	120	160	270
Contrato EPC	E22	Ingeniería de Detalle	FS	S02, E01	250	300	400
Contrato EPC	S21	Compra Separadores	SS Y FS	E22 (SS+60D), E12 (FS)	25	30	60
Contrato EPC	S22	Compra Generador	SS+60d	E22	25	30	60
Contrato EPC	S23	Compra otros equipos críticos	SS Y FS	E22 (SS+60D), E12 (FS)	25	30	60
Contrato EPC	S24	Compra Aeros Enfriadores	SS Y FS	E22 (SS+60D), E12 (FS)	25	30	60
Contrato EPC	S25	Compra hasta entrega de piping 80% y válvulas manuales	SS+30d	E22	80	120	200
Contrato EPC	S26	Compra instrumentos / electricidad	SS+90d	E22	100	120	180
Contrato EPC	S27	Compra hasta entrega de piping 20%	FS	E22	50	60	120
Contrato EPC	F21	Fabricación Separadores	FS	S21	210	240	300
Contrato EPC	F22	Fabricación Generadores	FS	S22	210	240	300
Contrato EPC	F23	Fabricación Aero Enfriadores	FS	S24	180	210	300
Contrato EPC	F24	Fabricación Puente Grúa	FS	S23	180	210	300
Contrato EPC	F25	Fabricación otros equipos críticos	FS	S23	150	180	240
Contrato EPC	L21	Transporte de Separador a Peru	FS	F21	50	60	90
Contrato EPC	L22	Transporte de Generador a Peru	FS	F22	50	60	90
Contrato EPC	L23	Transporte de Aeros a Peru	FS	F23	50	60	90
Contrato EPC	L24	Transporte de Puente Grúa	FS	F24	50	60	90
Contrato EPC	L25	Transporte de otros equipos críticos	FS	F25	50	60	90

<b>EPC (continuado)</b>							
<b>Contrato</b>	<b>Cod</b>	<b>Nombre</b>	<b>Lógica</b>	<b>Predecesores</b>	<b>Optimista</b>	<b>Mas Probable</b>	<b>Pesimista</b>
Contrato EPC	L26	Transporte Piping 80%, válvulas	FS	S25	50	60	90
Contrato EPC	L27	Transporte de Instrumentos / elect	FS	S26	50	60	90
Contrato EPC	L28	Transporte Piping 20%	FS	S27	20	30	90
Contrato EPC	L29	Movimiento de Equipos a Obra	SS+30d	E22	50	60	90
Contrato EPC	C21	Instalación de Campamento	FS	L29	20	30	40
Contrato EPC	C22	Movimiento de suelo	FS	C21	60	75	120
Contrato EPC	C23	Construcción de bases civiles	FS	C22	60	80	120
Contrato EPC	C24	Construcción de Galpón de Compresores	FS	C23	45	60	90
Contrato EPC	C25	Montaje de Compresores	FS	C23, L12	45	60	90
Contrato EPC	C26	Montaje de Equipos auxiliares	FS	C23, L21, L22, L23, L24, L25	45	60	90
Contrato EPC	C27	Fabricación de Estructuras y Piping	FS	L26	100	130	200
Contrato EPC	C28	Montaje Estructuras y Piping	FS	C27, L28, L11	130	140	210
Contrato EPC	C29	Instalación de Instrumentación	FS	C25, C26, C28 (SS+100), L27, C24	45	60	90
Contrato EPC	C30	Instalación de cables de potencia	FS	C25, C26, C28 (SS+100), L27, C24	45	60	90
Contrato EPC	C31	Precomisionado de piping	FS	C25, C26, C28 (SS+100), C24	90	120	180
Contrato EPC	C32	Precomisionado de instrumentos	FS	C29	50	60	90
Contrato EPC	C33	Precomisionado eléctrico	FS	C30	50	60	90
Contrato EPC	C34	Precomisionado de procesos	FS	C29, C30	50	60	90
Contrato EPC	C35	Comisionado	FS	C31, C32, C33, C34	25	30	45
Contrato EPC	C36	Puesta en marcha Compresor 3	FS	C35	10	15	30
Contrato EPC	C37	Puesta en marcha Compresor 4	FS	C35	10	15	30
Contrato EPC	C38	Performance Test	FS	C36, C37	7	10	20

## **2.5 Desarrollo de Cronograma (Proceso 6)**

En este apartado describimos el proceso que seguimos para desarrollar el cronograma del proyecto WHCP21.

Para el desarrollo del ejemplo utilizado en la parte teórica se había utilizado exclusivamente la herramienta de Microsoft Excel. Cada actividad la habíamos modelado a partir de una variable aleatoria y calculando la inversa de la distribución que se determinaba a partir de los tres escenarios. Para cada una de las 10,000 corridas se debía resolver el cronograma y determinar puntos de convergencia eligiendo la rama de máxima duración. Finalmente la distribución de duración del proyecto quedaba determinada. Esta mecánica determina archivos de mucho tamaño y una muy lenta resolución de cada corrida. Por otra parte es muy complejo realizar cambios al cronograma dado que requiere rehacer gran parte de las formulas que vinculan las actividades.

Para la parte analítica consideramos poco útil el uso de Excel en su versión básica para el desarrollo del cronograma del proyecto WHCP21 dada la cantidad de actividades y la compleja lógica que las vincula. En ese sentido creímos de mayor valor estudiar qué herramientas hay disponibles para el desarrollo de cronogramas y procedimos a desarrollar el cronograma de proyecto en esas herramientas.

En lo que sigue presentamos las diferentes herramientas utilizadas, los resultados obtenidos y algunos comentarios sobre dichas herramientas que surgieron a partir de su uso.

### **2.5.1 Microsoft Project**

Project es una herramienta para el desarrollo de cronogramas deterministas. El software es de fácil uso en lo que respecta a definir actividades, duraciones y lógicas.

Definidas todas las actividades, lógicas y duraciones el programa determina la duración del proyecto por el método CPM y permite visualizar cuales son las actividades criticas.

Project también cuenta con una aplicación para calcular la duración por el método PERT. Para esto se deben incluir los tres escenarios optimista, más probable y pesimista, y determinar los pesos relativos de cada escenario. En ese sentido si se quiere calcular PERT

modelando las actividades como distribuciones beta se debe incluir en la ventana de pesos los valores 1 en optimista, 4 en más probable y 1 en pesimista. Si en cambio se quiere modelar como distribución triangular se debe incluir 2 en optimista, 2 en más probable y 2 en pesimista. En cualquier caso la suma de los tres coeficientes debe ser igual a 6.

Con Project se obtiene por el método CPM una duración del proyecto de 1005 días y por el método PERT con distribución triangular de 1104 días. La secuencia de actividades críticas es la indicada en el cuadro adjunto.

<input checked="" type="checkbox"/> Critical: Yes	1005 days	Mon 01/05/17	Thu 30/01/20
Ingeniería FEED	180 days?	Mon 01/05/17	Fri 27/10/17
Pliego EPC	60 days?	Tue 29/08/17	Fri 27/10/17
Licitación EPC	160 days	Sat 28/10/17	Thu 05/04/18
Ingeniería de Detalle	300 days?	Fri 06/04/18	Wed 30/01/19
Compra hasta entrega de piping 20%	60 days?	Thu 31/01/19	Sun 31/03/19
Transporte Piping 20%	30 days?	Mon 01/04/19	Tue 30/04/19
Montaje Estructuras y Piping	140 days?	Wed 01/05/19	Tue 17/09/19
Instalación de Instrumentación	60 days?	Fri 09/08/19	Mon 07/10/19
Instalación de cables de potencia	60 days?	Fri 09/08/19	Mon 07/10/19
Precomisionado de instrumentos	60 days?	Tue 08/10/19	Fri 06/12/19
Precomisionado electrico	60 days?	Tue 08/10/19	Fri 06/12/19
Precomisionado de procesos	60 days?	Tue 08/10/19	Fri 06/12/19
Comisionado	30 days?	Sat 07/12/19	Sun 05/01/20
Puesta en marcha Compresor 3	15 days?	Mon 06/01/20	Mon 20/01/20
Puesta en marcha Compresor 4	15 days?	Mon 06/01/20	Mon 20/01/20
Performance Test	10 days?	Tue 21/01/20	Thu 30/01/20

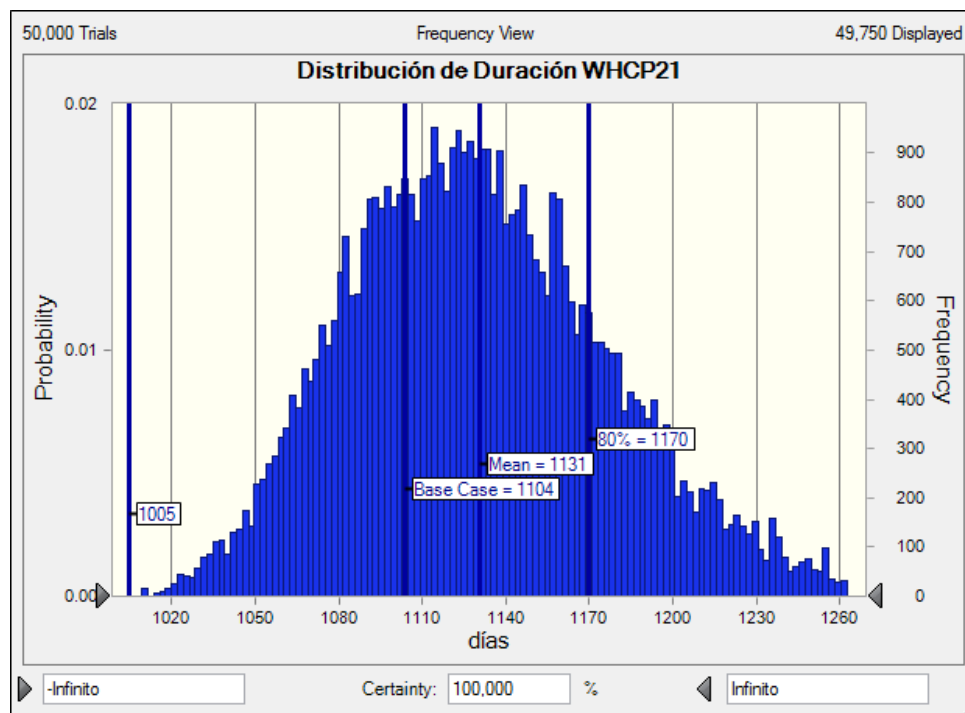
### 2.5.2 Oracle Crystal Ball

La herramienta de Oracle que corre con Excel permite simplificar el problema del modelado de cada actividad que vimos si se usa solamente Excel.

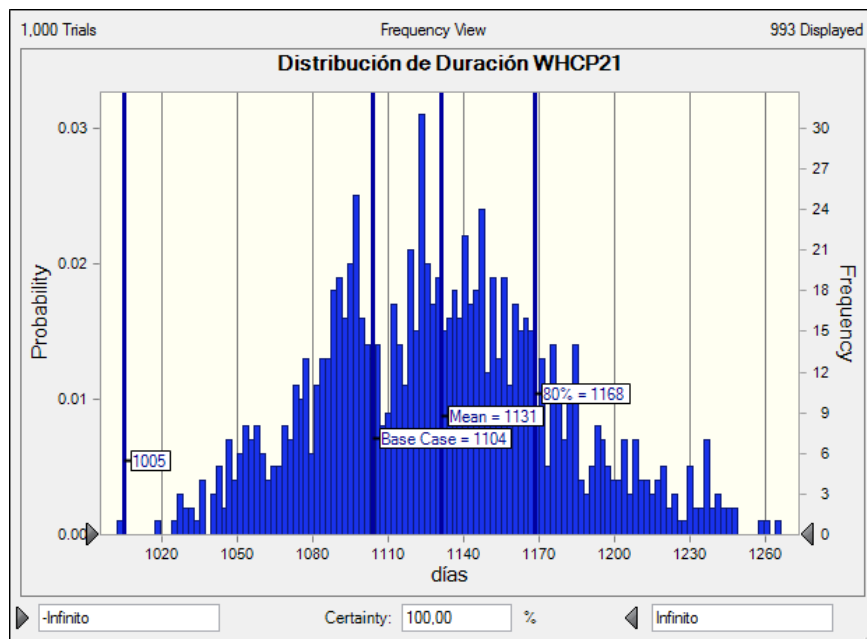
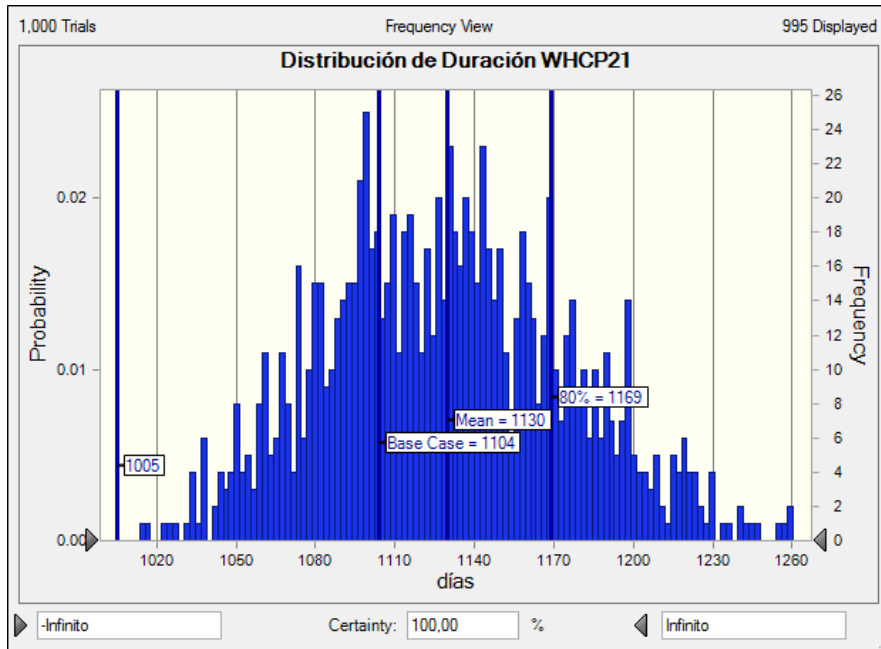
Definiendo cada actividad con sus tres escenarios se puede determinar la distribución que se quiere modelar con esos tres puntos con la función “Define Assumption”. Vinculando las actividades según la lógica determinada, sumando actividades o definiendo el máximo en los puntos de convergencia, se puede calcular la distribución de duración del proyecto total o la distribución de duración hasta un punto específico de avance con la opción “define forecast”. Crystal ball permite definir el tipo de muestreo a utilizar por lo que realizamos los cálculos con Latin Hipercube.

Con Crystal Ball y Excel se puede calcular el valor de duración por CPM, PERT y Monte Carlo. CPM surge de recorrer toda la lógica de actividades utilizando el valor más probable, PERT surge directamente de definir el tipo de distribución para cada actividad en “define assumption” dado que por default el programa calcula en la celda el valor esperado (la media).

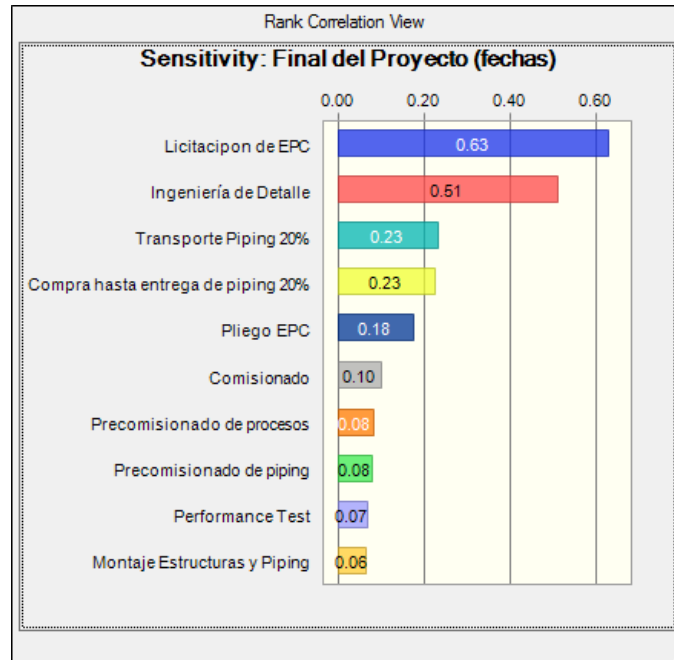
El histograma incluido abajo surge de simular el cronograma con Crystal Ball con 50,000 iteraciones. Con esto obtenemos una duración por el método CPM de 1005 días, una duración medio de PERT de 1104 días y una duración utilizando Monte Carlo de 1131 días de promedio (redondeo hacia arriba de 1130.8 días) y mediana de 1127 días.



También incluimos aquí la misma simulación realizada con solamente 1000 iteraciones y utilizando Latin Hipercube (primer gráfico) y Monte Carlo (segundo gráfico). En todos los casos se puede ver que con muy pocas iteraciones y cualquiera de los métodos de muestreo el resultado es virtualmente el mismo.



Por último, con Crystal Ball se pueden obtener datos de sensibilidad que permite determinar cuáles son las actividades que tienen mayor impacto en la duración. En la tabla abajo se incluyen las primeras diez actividades que arrojan mayor índice de crucialidad según el método de rangos de Spearman (CRIs)



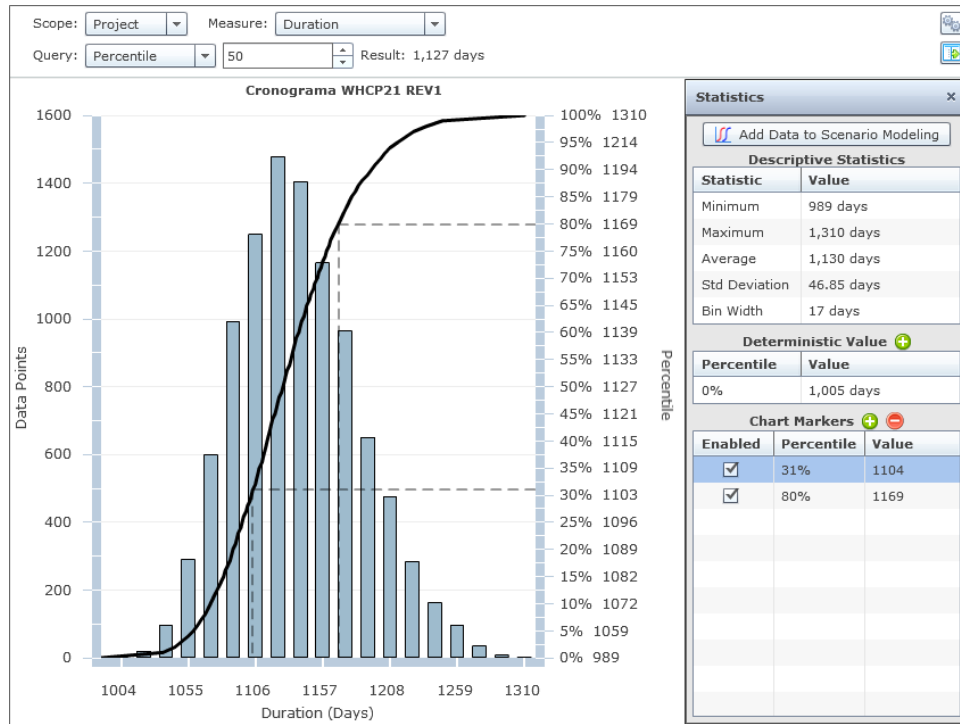
### 2.5.3 Polaris (Booz – Allen – Hamilton)

Booz – Allen – Hamilton es la corporación que en 1958 desarrolló el método PERT para el desarrollo del proyecto Polaris. Actualmente sigue siendo una consultora que provee servicios al departamento de defensa de Estados Unidos y la NASA, entre otras organizaciones y compañías.

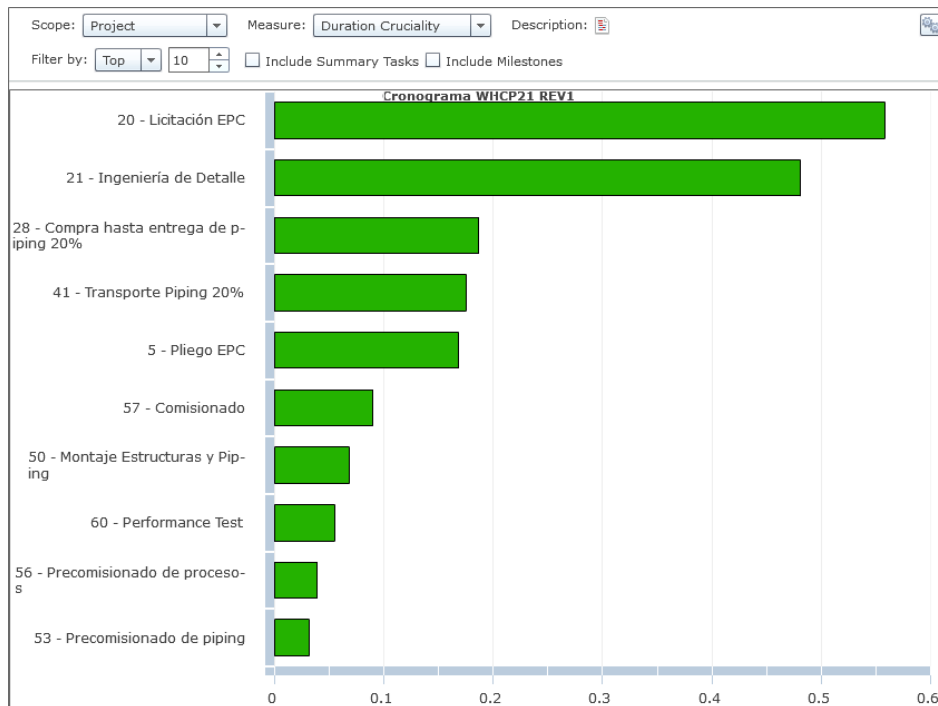
Polaris es el nombre del software para análisis de riesgos de cronogramas y costos que han desarrollado basado en simulación Monte Carlo. La herramienta permite importar cronogramas realizados en MS Project y Primavera para luego requerir completar información de distribución de duración de actividades y riesgos específicos del tipo ramificaciones probabilísticas y condicionales.

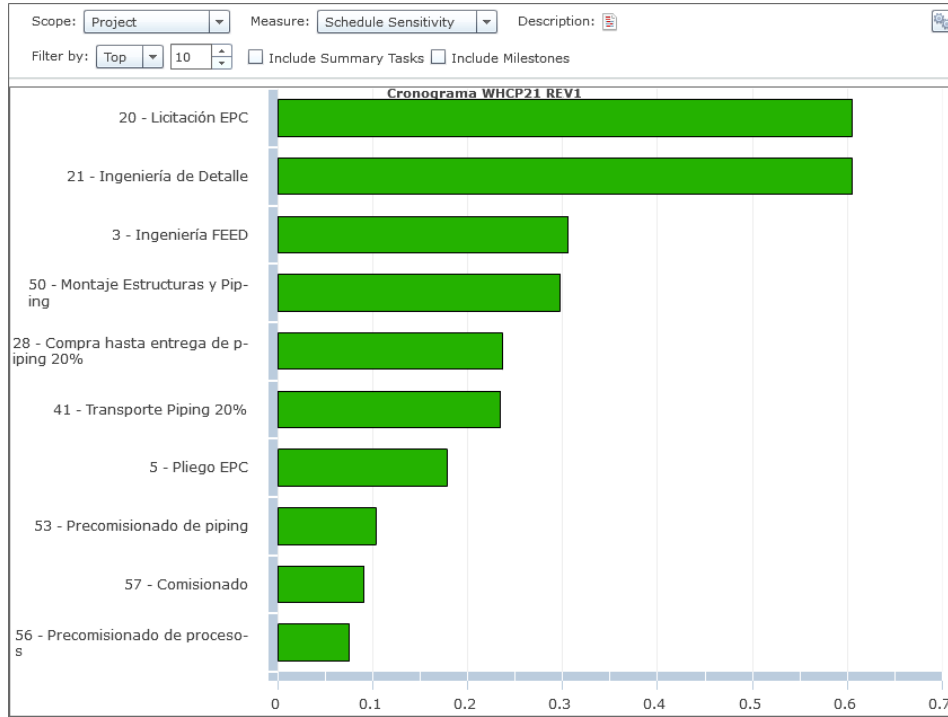
En el gráfico adjunto se incluye la salida del programa donde se visualiza la distribución de duración y la probabilidad de ocurrencia del valor calculado por CPM y PERT. Los resultados son iguales a los obtenidos con Crystal Ball, 1005 días por CPM (0.1% de probabilidad), 1104 días por PERT (31% de probabilidad) y 1130 días de duración promedio calculado con Monte Carlo (redondea hacia abajo) y 1127 días es la mediana.





Polaris cuenta adicionalmente con la opción de cálculo de sensibilidad reportando los índices descritos en la parte teórica. Aquí incluimos Crucialidad (CRI) y Sensibilidad de Cronograma (SSI).



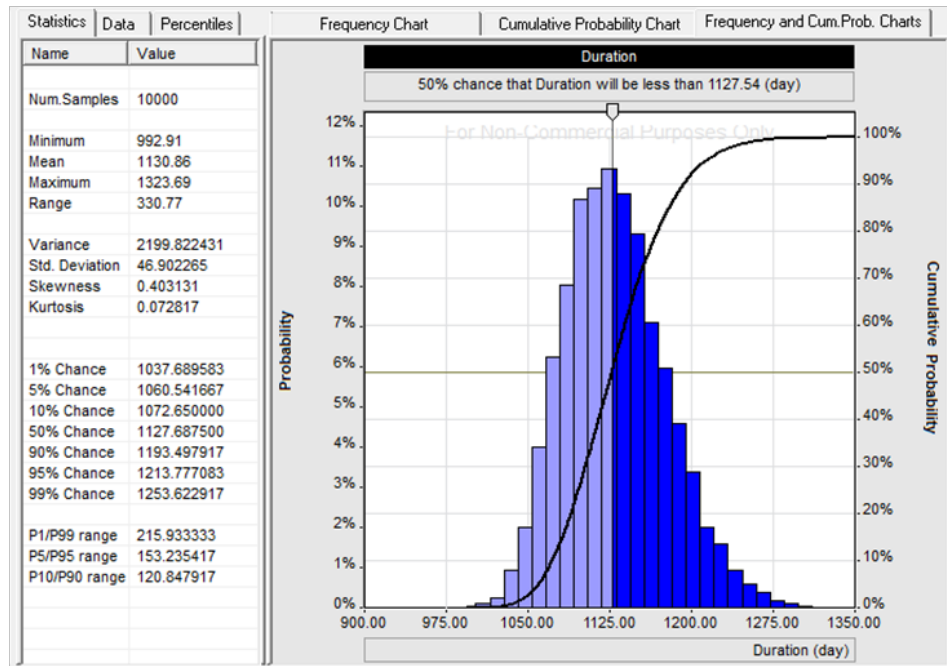


### 2.5.4 Risky Project (Intaver Institute)

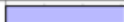




Otro software que analizamos es el que desarrolla el Instituto Intaver de Canadá. Entre los clientes de Intaver se encuentran organizaciones y empresas líderes. Al igual que Polaris el software permite importar el cronograma realizado en MS Project.

Risky Project permite instalar en MS Project una barra de herramientas para vincular programas sin necesidad salir de MS Project. Respecto a la interfaz grafica, opciones para generar reportes, gráficos y la velocidad para realizar la corrida hemos preferido el uso de Polaris.

Los resultados obtenidos son iguales a los obtenidos con Crystal Ball y Polaris. Adjuntamos aquí la distribución de duración y datos estadísticos de la corrida:



Risky genera los mismos índices de sensibilidad que Crystal Ball. Aquí incluimos el CRIs.

Task Duration affected project: Duration						
	Name	Task ID	Type	Sensitivity Chart	Ranking	
1	Task: Licitación EPC	20	Duration		0.626	
2	Task: Ingeniería de Detalle	21	Duration		0.502	
3	Task: Compra hasta entrega de piping 20%	28	Duration		0.238	
4	Task: Transporte Piping 20%	41	Duration		0.235	
5	Task: Pliego EPC	5	Duration		0.177	

## 2.6 Optimización del Cronograma

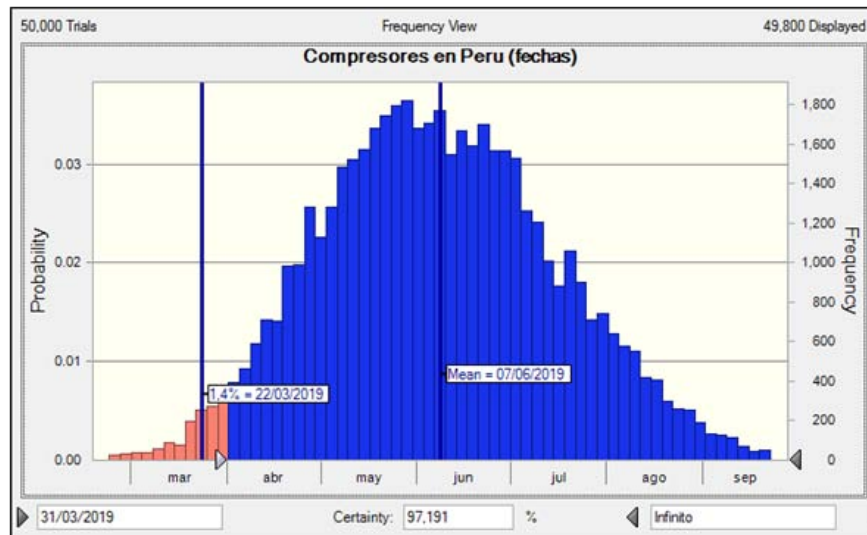
Hasta el momento hemos resuelto el cronograma para el proyecto WHCP21 por medio de las tres metodologías CPM, PERT y Monte Carlo y presentado la estimación de duración para todo el proyecto que se obtiene de cada método.

La diferencia de 27 días entre la estimación por PERT y Monte Carlo (1104 días vs 1131 días) se explica como el efecto de todas las convergencias entre múltiples actividades en paralelo que tiene el proyecto.

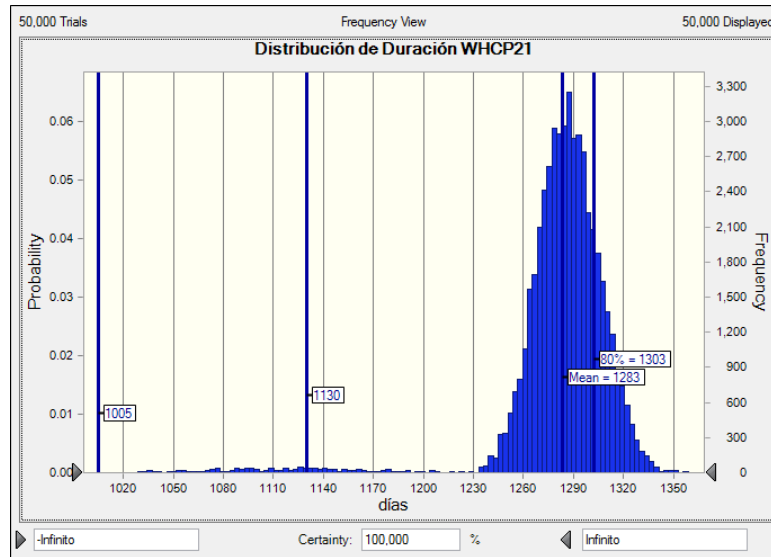
Como habíamos indicado anteriormente existen condiciones temporales vinculadas a las ventanas de navegación fluvial y épocas de lluvias donde no resulta posible realizar la obra civil. Analizamos aquí que esas actividades y los resultados del modelo.

### 2.6.1 Ventana de Navegación – Transporte de Compresores

En el grafico incluido abajo se detalla la distribución de probabilidad de fechas de arribo de los compresores a la planta Malvinas. Si el análisis lo hacemos puramente por medio de CPM la conclusión es que el 22/03/19 se culmina el transporte, fecha que se encuentra dentro de la ventana de navegación. Esta información podría enviar el mensaje al equipo de proyecto que la estrategia de contratación de los compresores es adecuada.



Sin embargo el uso de PERT y particularmente Monte Carlo permite identificar que la probabilidad de que el transporte caiga fuera de la ventana de navegación es muy grande (del 97%). En nuestro modelo podemos entonces considerar una ramificación condicionada que indique que si el transporte de los compresores a Perú termina luego del 31/3/2019 debe entonces programar el inicio del transporte para el 1/11/2019. En base a la distribución de duración de llegada de los compresores es fácil ver que la gran mayoría de las iteraciones determinarán que el inicio del transporte se realizará a partir del primero de noviembre del 2019. La distribución de duración del proyecto toma esta nueva forma:



Con el 3% de las iteraciones compatibles con la rama donde se llega a la primer ventana en 2019 y el restante 97% entrando en la segunda ventana 150 días después en el año 2020.

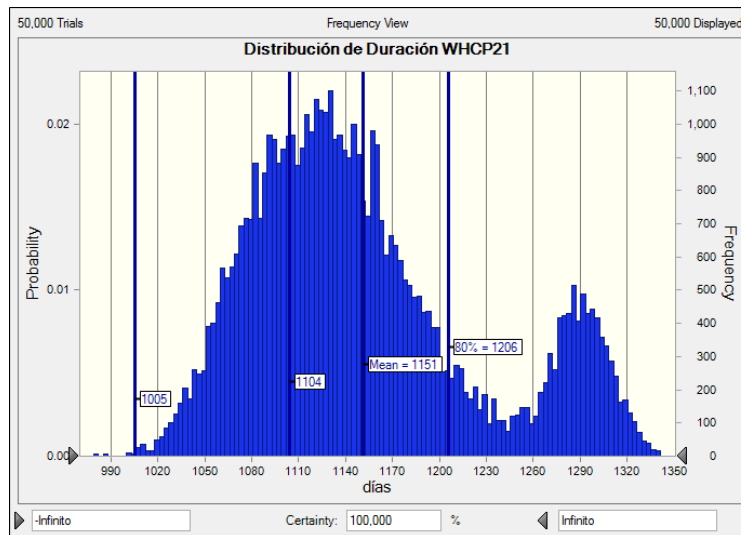
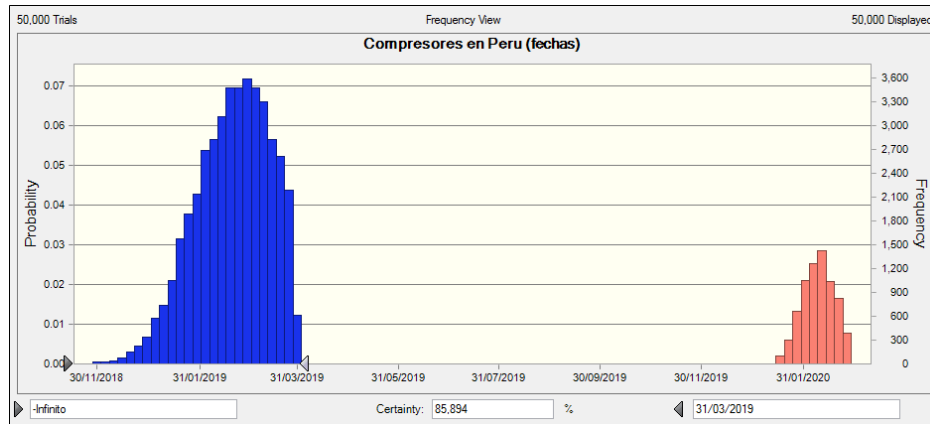
Para efectos prácticos no resulta adecuado considerar la ramificación condicionada en forma aislada y en este punto reside la importancia del programador del proyecto. Si la probabilidad de perder la ventana de navegación es grande la estrategia del Project Manager debería considerar la revisión de la secuencia de actividades de proyecto en cambio de asumir la espera hasta el próximo año.

Para lograr un nivel alto de confiabilidad que el transporte de los compresores se realice dentro de la ventana de 2019 se requiere introducir cambios en la estrategia de contratación de los compresores. Dos posibles acciones para reducir el riesgo de perder la ventana del año 2019 consisten en:

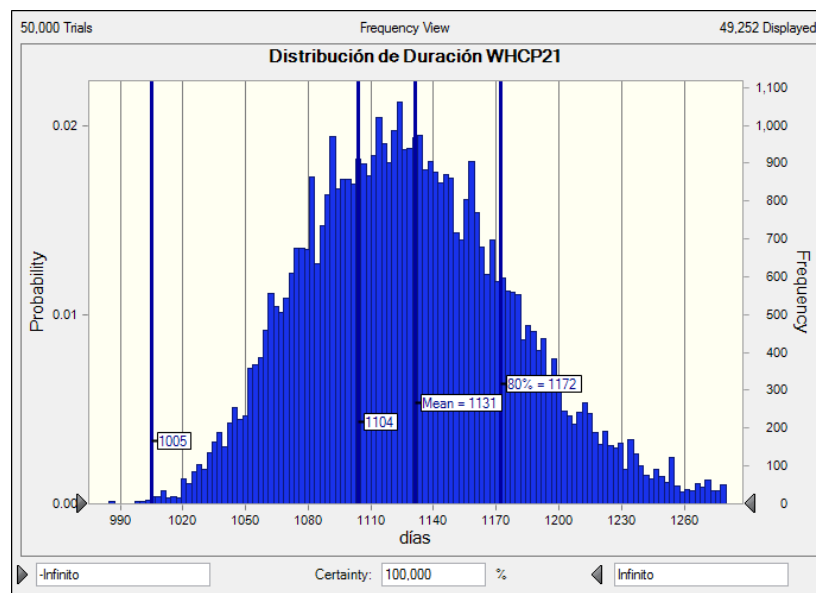
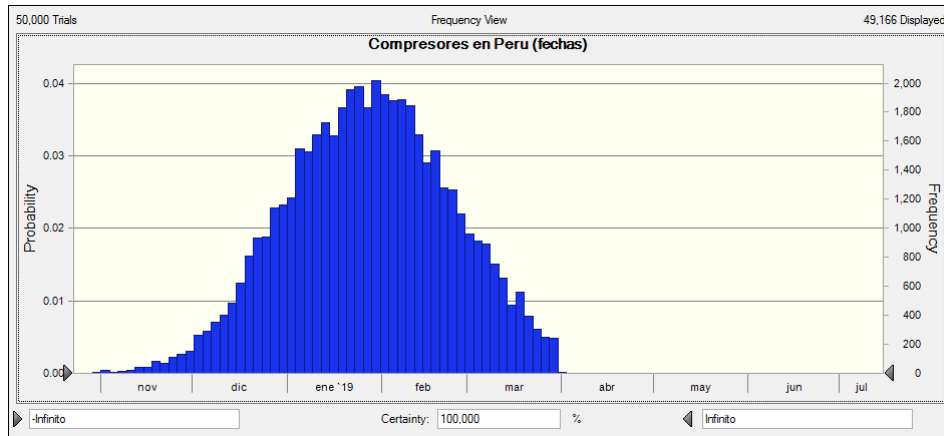
- **Acelerar el inicio del desarrollo del pliego para la compra de los compresores.** La actividad E02 inicia 90 días luego de iniciado E01 y se puede considerar que inicie 60 o 30 días de iniciado E01 asegurando más recursos para el desarrollo de ingeniería.
- **Lograr un proceso de licitación de compresores de menor duración y menor rango** entre el escenario más probable y pesimista asegurando que toda la organización esté alineada con el objetivo de adjudicar en un plazo determinado y

conozca los riesgos de no lograr ese objetivo. S01 con Optimista 80 días, más probable 100 días, pesimista 130 días.

Reduciendo a 60 días la salida del pliego a licitación se verifica que en un 85% de los casos se ingresa en la ventana del 2019 y se visualiza una distribución de duración del proyecto bimodal.



Reduciendo a 30 días la salida del pliego a licitación se verifica que se asegura ingresar en la ventana del 2019 en un 98% de los casos y la distribución de duración del proyecto vuelve a ser de una sola moda.



Es importante resaltar que este cambio de estrategia para la licitación del compresor reduce el riesgo de atraso del proyecto pero la eliminación de dicho riesgo no implica una mejora en la duración esperada estimada sin el agregado de la ramificación condicionada (1131 días) dado que las actividades optimizadas solo toman índices de sensibilidad y crucialidad importantes cuando se introduce la ramificación condicionada.

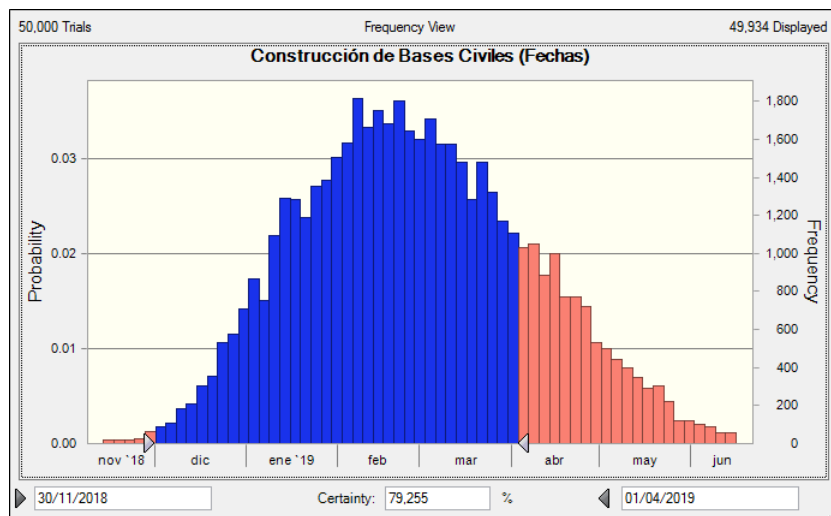
## 2.6.2 Temporada Seca – Obra Civil

Como ya hemos comentado la obra civil más importante del proyecto WHCP21 está vinculada a la construcción de las bases donde se deben instalar los nuevos turbocompresores. Dado que los trabajos se deben realizar al aire libre y requiere

excavaciones es necesario realizarlas en épocas secas. La época de lluvias coincide con la época de ventana de navegación donde los ríos suben su cauce.

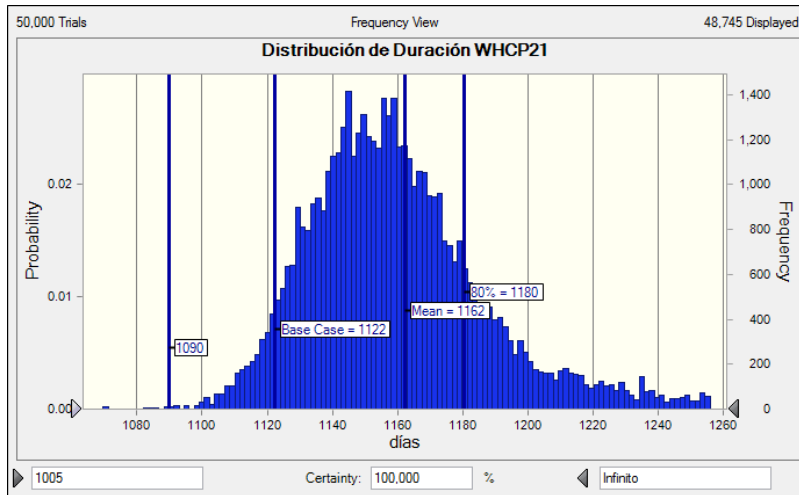
En resumen, la obra civil debe realizarse antes de diciembre del 2018 o después de marzo de 2019. Sin embargo, para no impactar en el montaje de los compresores que según se vio anteriormente arribarían a planta Malvinas antes del marzo de 2019, es necesario asegurar que la obra civil se realice antes de principios de diciembre del 2018.

Un análisis a la distribución de duración de la actividad de construcción de bases civiles tal como tenemos el modelo de cronograma hasta este momento indica lo siguiente:



La conclusión es que si se considera dejar la construcción de las bases civiles dentro de las tareas que debe realizar el contrato del EPC es virtualmente imposible realizarlas antes de diciembre del 2018. Modelando entonces una ramificación condicionada que determine que las tareas de movimiento de suelo y construcción de bases civiles deben realizarse hasta antes del 01/12/2018 caso contrario deben iniciarse luego del 1/4/2019 obtenemos la siguiente distribución de duración del proyecto.

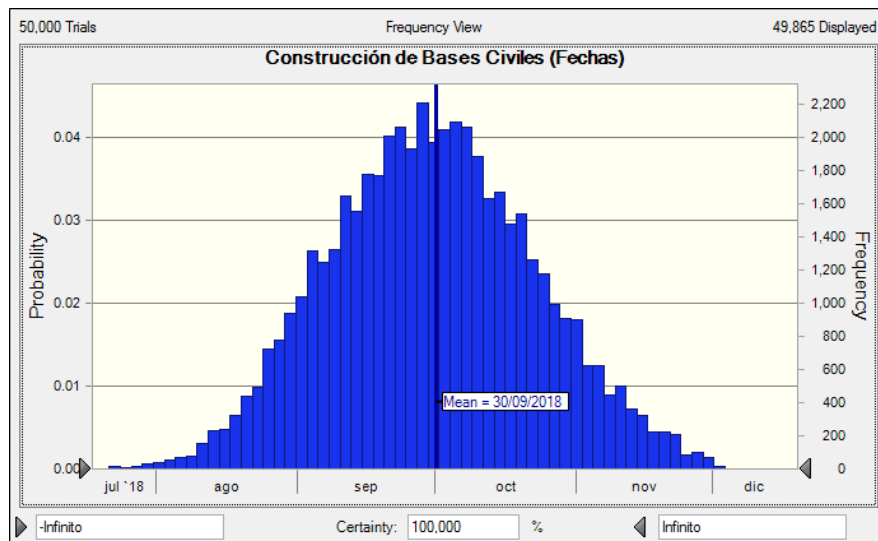




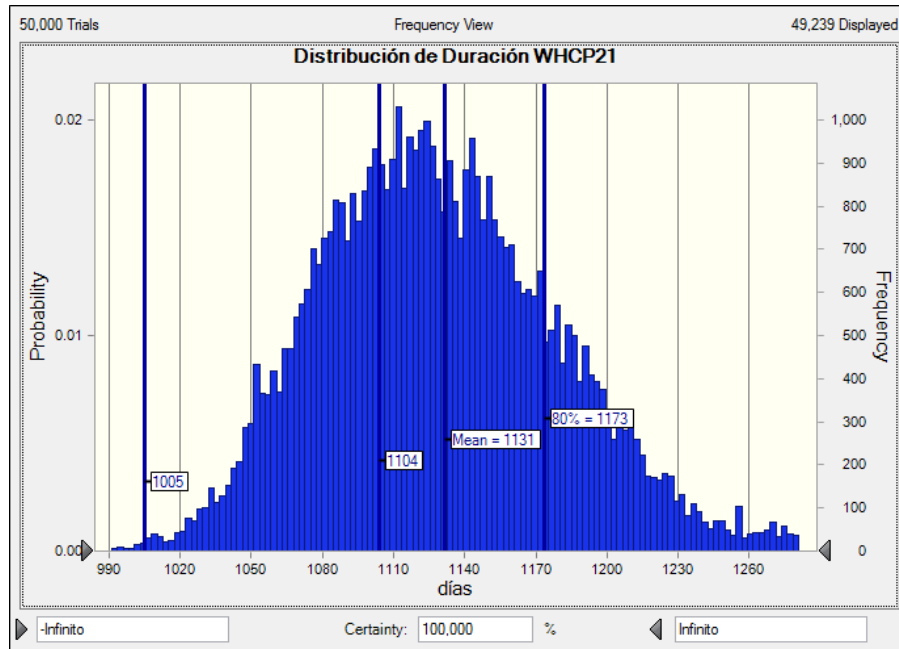
Esto indica que de no tomar acción sobre la secuencia de actividades que derivan en la construcción de las bases civiles se retrasa el proyecto unos 30 días (1130 días vs 1162 días) y la construcción de las bases civiles se transforma en una actividad crítica.

Para asegurar que la construcción de bases civiles se realice antes del 1/12/2018 se puede considerar retirar del alcance del EPC la construcción de las mismas y licitar directamente la obra civil en paralelo con la licitación de compresores. De esta forma en cuanto el proveedor de los compresores tenga el detalle de dichos equipos se puede proceder a la construcción de las bases en planta Malvinas y durante el 2018.

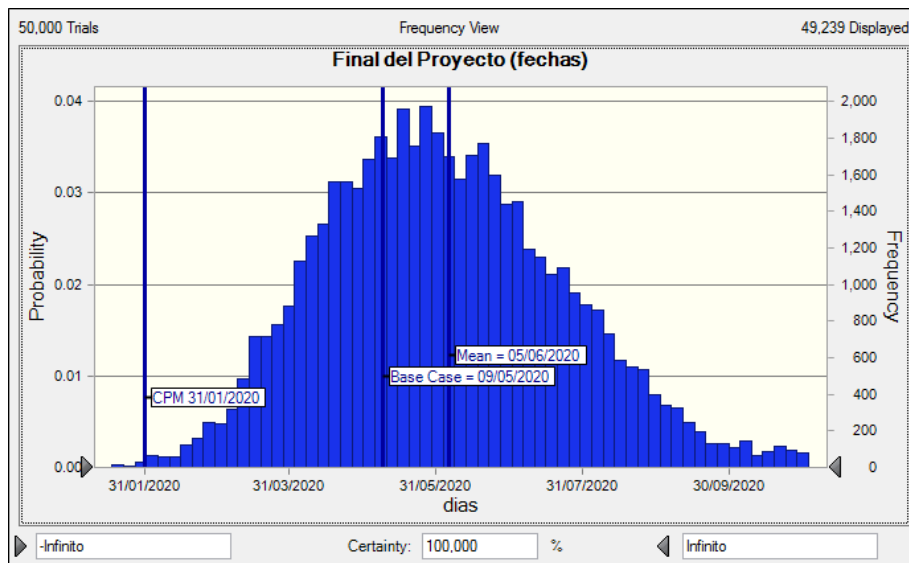
Con esta modificación en el cronograma se obtiene la siguiente distribución de fechas de completamiento de la construcción de bases civiles:



Y la distribución de duración de todo el proyecto con el ajuste para cumplir con las ventanas para el transporte fluvial y para cumplir con la ventana de construcción de obra civil es el siguiente:



Y la distribución de fechas de terminación del proyecto es la siguiente:



### 3. Análisis de resultados y aplicaciones

#### 3.1 Comparativa de metodologías CPM, PERT y Monte Carlo

En la siguiente tabla se detallan las duraciones del proyecto WHCP21 que resultan del modelado del cronograma con las tres metodologías aplicadas. Se incluye también la probabilidad de cumplimiento de dicha duración tomando la distribución obtenida con la metodología Monte Carlo.

Método	Duración (días)	Fecha Fin	Probabilidad
Critical Path Method (CPM)	1005	31/01/2020	0.1%
Project Evaluation and Review Technique (PERT)	1104	09/05/2020	33.0%
Monte Carlo (P50)	1127	01/06/2020	50.0%
Monte Carlo (P80)	1173	17/07/2020	80.0%

En esta sección incluimos los puntos de interés y conclusiones que hemos obtenido sobre cada uno de los métodos.

##### 3.1.1 Critical Path Method (CPM)

Consideramos que la metodología CPM, que es totalmente determinista, puede usarse solamente como una primera aproximación al desarrollo de un cronograma de proyecto. Es importante que el equipo de proyecto conozca las limitaciones más importantes que esta metodología tiene, a continuación listamos las más importantes identificadas.

La duración del proyecto que surge de la determinación del camino crítico usando las duraciones de actividades más probables arroja en general un valor de muy baja probabilidad de ocurrencia y que no debería usarse para tomar compromisos de plazos en proyectos. La causa está directamente relacionada con la forma de las distribuciones de duración de actividades donde el valor más probable (moda) está en la mayoría de los casos a la izquierda de la mediana.

La duración del proyecto que surge de la determinación del camino crítico usando las duraciones de actividades optimistas o pesimistas tampoco arrojan ninguna información útil para el equipo de proyecto. En nuestro ejemplo dichas duraciones eran respectivamente 842 días y 1485 días, ambos valores caen muy por fuera de la distribución de duración del proyecto. En ningún caso debería proponerse como duración optimista o pesimista para un proyecto el resultado de realizar CPM con dichas duraciones.

Por último este método solo se enfoca en las actividades críticas y no permite analizar adecuadamente en qué grado otras actividades pueden transformarse en críticas ni evaluar los riesgos reales asociados al cumplimiento de hitos o fechas específicas. En nuestro ejercicio usando CPM no se podía evidenciar el real riesgo de no cumplir con la ventana de navegación o el periodo donde se puede realizar la obra civil.

Consideramos que de usarse CPM es necesario incluir dentro de la programación un adecuado buffer que surja de los análisis de reserva que se desarrollen como parte de PTM.

### **3.1.2 Project Evaluation and Review Technique (PERT)**

Consideramos que la metodología PERT agrega mucho más valor que CPM y requiere virtualmente el mismo esfuerzo. Como estimación de duración de proyecto en fases tempranas permite capturar buena parte del riesgo asociado a la variabilidad de la duración de las actividades. En nuestro ejercicio obtuvimos más de tres meses de diferencia entre la estimación de PERT y CPM, y un valor bastante próximo al P50 que se obtiene por Monte Carlo.

Este método permite obtener una curva de distribución de duración del proyecto calculando la media y el desvío estándar como se vio en la parte teórica. El desvío estándar calculado por PERT es siempre mayor al desvío estándar calculado por Monte Carlo dado que las convergencias tienden a reducir ese parámetro en la simulación de Monte Carlo. En ese sentido si el equipo de proyecto informa, por ejemplo, la duración con la que obtiene un 80% de probabilidad de finalización del proyecto las estimaciones entre PERT y Monte Carlo se acercan incluso (1159 días vs 1173 días).

PERT no permite, sin embargo, analizar cualquier otra actividad que no sea crítica ni evaluar en qué grado puede impactar en la duración del proyecto. En este sentido no resulta ser una herramienta que permita al equipo de proyecto optimizar el cronograma ni estimar como la reducción de incertidumbre de actividades no críticas mejora la duración esperada del proyecto.

El desarrollo de PERT tal como la realiza MS Project tampoco permite analizar adecuadamente la probabilidad de cumplimiento de hitos o ventanas. Sin embargo la resolución de cada secuencia del proyecto calculando media y desvío estándar permite obtener una distribución de duración parcial de una serie de actividades no necesariamente críticas que permita estimar el cumplimiento de hitos o ventanas de tiempo. Finalmente PERT tampoco permite identificar el impacto asociado al sesgo de convergencia ni modelar riesgos o ramificaciones lo cual limita la posibilidad del análisis de escenarios de cronogramas.

Nuestra recomendación sería considerar PERT como herramienta básica para el desarrollo de cronogramas en vez de CPM dado que permite capturar buena parte del riesgo asociado al desarrollo de las actividades.

### **3.1.3 Monte Carlo**

La simulación de cronogramas utilizando Monte Carlo permite construir modelos de cronogramas completos y tan realistas como se desee. En primer lugar es factible modelar actividades con cualquier tipo de distribución de duración según mejor la describa, un mismo cronograma puede contener actividades con distribuciones de cualquier tipo. Es posible también modelar riesgos y ramificaciones para poder cuantificar en qué grado afectan la duración del proyecto.

La gran cantidad de software disponibles para la simulación de cronogramas utilizando Monte Carlo, y la relativa simpleza de uso de dichas herramientas, nos permite considerar que cualquier organización que desarrolla proyectos importantes, donde la fecha de completamiento tiene impacto en el negocio, debería disponer de estas herramientas y usarlas en forma estándar para la planificación de sus proyectos.

El cronograma puede desarrollarse en MS Project y a partir de ese punto analizarlo con herramientas que realizan Monte Carlo. No es necesario disponer del modelo completo con todos los riesgos simulados, de hecho recomendaríamos ir completándolo gradualmente en la medida que el proyecto va clarificando su alcance y los riesgos son mejor identificados.

Con Monte Carlo todas las actividades son analizadas, sin existir segregación entre críticas y no críticas. Es posible simular en qué grado cualquier actividad del proyecto puede afectar el cronograma global o parcial. Este punto creemos que puede tener una aplicación importante en el análisis de costos y beneficios del proyecto.

La variedad de gráficos e información de índices que generan los software que desarrollan Monte Carlo permiten monitorear adecuadamente cuales son las actividades que contribuyen a incrementar los plazos del proyecto dejando de lado el concepto determinista de actividad crítica o no crítica.

Polaris y Risky son dos de los productos de software que pudimos utilizar dado que tienen un free trial de un mes. Sin embargo también verificamos que Excel en su versión más básica, o usando Crystal Ball, es perfectamente apto para modelar cronogramas. En esta tesis pudimos modelar y replicar lo que realizan los productos de software que se comercializan para realizar Monte Carlo. Las actividades se modelan con las funciones RAND y calculando la inversa de la distribución elegida. El modelado de riesgos es esencialmente el uso de funciones IF, la resolución de convergencias se simplifica al uso de la función MAX y muchos de los índices al uso de las funciones COUNT o RANK.

### **3.2 Aspectos económicos y de control de gestión**

En esta tesis nos enfocamos en lo específico al desarrollo de cronogramas y la evaluación de diferentes metodologías. Sin embargo este análisis se puede completar con la evaluación cuantitativa de los recursos requeridos para el desarrollo de cada actividad y el modelado de costos del proyecto.

Hulett en 2011 publicó su segundo libro “Integrated Cost – Schedule Risk Analysis” en donde con la misma metodología explicada en esta tesis se modela adicionalmente los

costos totales del proyecto. Ese libro es una excelente referencia para quienes estén interesados en el tema de costos.

En este apartado pretendemos analizar en qué medida el desarrollo de cronogramas con Monte Carlo provee herramientas para aplicar conceptos que son parte del MBA, tales como el de valor esperado que puede aplicarse para la toma de decisiones, e información para la definición de indicadores que puedan usarse en herramientas de control de gestión.

### **3.2.1 Duración esperada y valor esperado para el análisis de acciones**

Tal como hemos descripto en la parte analítica, los proyectos son desarrollados por múltiples contratistas encargados de la fabricación y provisión de ciertos elementos que hacen al alcance del proyecto.

En esta tesis para nuestro proyecto de WHCP21 incluimos la provisión de los turbocompresores, equipos críticos (separador, aero-enfriadores, etc.), materiales (tuberías, instrumentos y eléctricos), obra civil y EPC. Cada uno de esos contratos ha sido modelado por una serie de actividades que describen razonablemente el alcance de provisión.

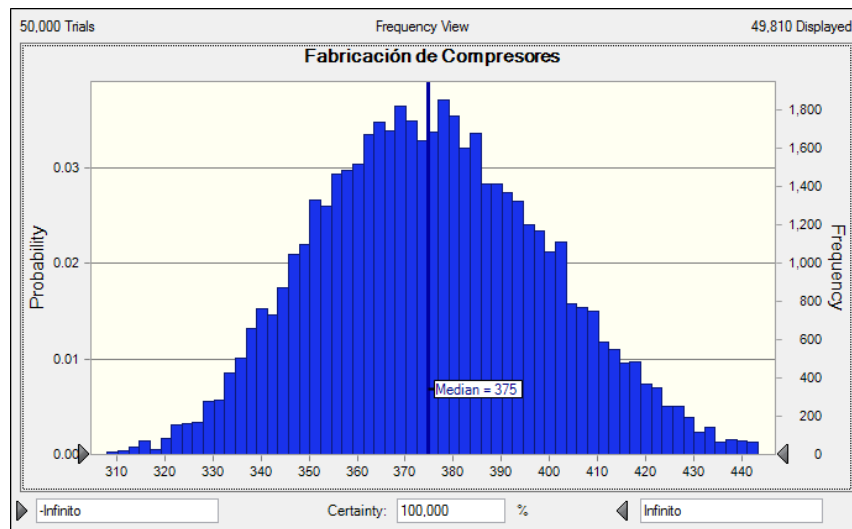
El análisis mostró que en general todos los contratos de fabricación de equipos no entran en el ranking de las actividades con índices de crucialidad o significancia relevantes. En otras palabras son actividades no críticas con el modelo determinista de desarrollo de cronogramas.

Estos contratos no críticos sin la adecuada supervisión del equipo de proyectos pueden llegar a convertirse en críticos cuando ya no existe mucha acción por tomar. En general los talleres que fabrican equipos tienen recursos escasos y segmentan a sus clientes según criterios de valor y frecuencia de compra. En ese escenario el cumplimiento del plazo de entrega de nuestros equipos puede no depender de la variabilidad de las actividades sino de una decisión de negocio del fabricante.

El uso de Monte Carlo para simular el cronograma de proyecto permite valorizar el impacto de entregas tardías de ciertos elementos del proyecto y como impacta en la fecha esperada de finalización del proyecto. A partir de este análisis es posible valorizar los días de atraso en el inicio de la producción, definir esquemas de penalidades y evaluar acciones que

recuperen parcialmente la fecha de finalización esperada y sean de mayor valor para la compañía.

A continuación incluimos el ejemplo de la fabricación de los turbocompresores. Simulamos un escenario de WHCP21 donde el equipo de proyecto había identificado la necesidad de compra anticipada y con menor plazo de licitación de estos equipos para poder entrar dentro de la ventana de navegación. Sin embargo ambas actividades E02 y S01 se cumplieron en el escenario pesimista revisado (45 días y 130 días). Con ese contexto previo se inicia la fabricación de los compresores que tiene la siguiente curva de distribución de duración:

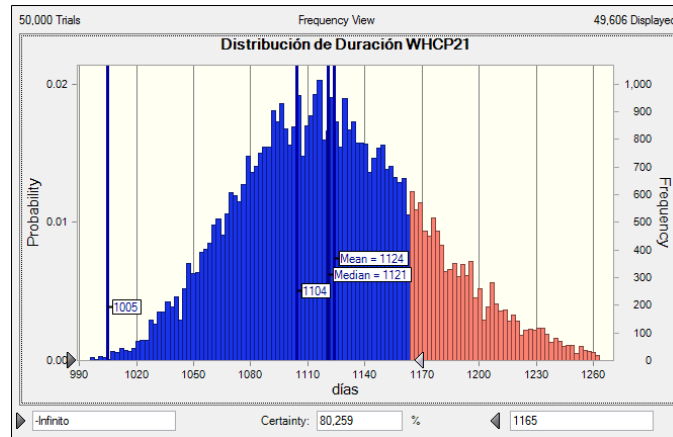


Dado que el proyecto trae un atraso considerable podemos modelar diferentes tiempos de fabricación de los turbocompresores para determinar a partir de que duración el proyecto entra en serio riesgo de no cumplir con la ventana de navegación. Simulamos entonces la entrega en 360 días, 380 días, 390 días y 398 días, todos valores cercanos a la mediana y dentro de la distribución de duración del contrato de fabricación de los compresores.

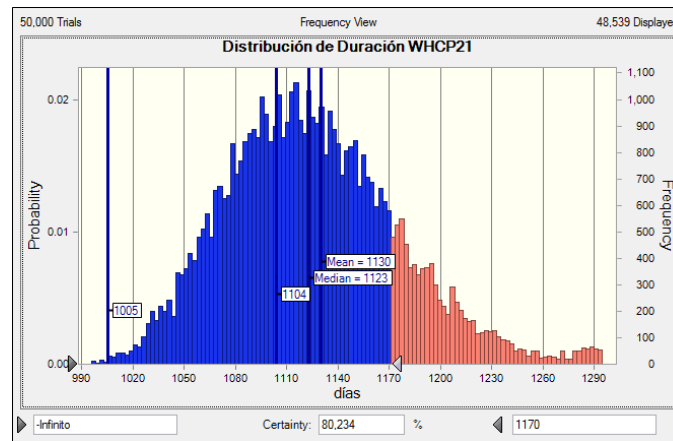
En la serie de gráficos que sigue se presenta la duración del proyecto para esas duraciones de fabricación. Las actividades ya desarrolladas tienen duración única y solo se mantienen con distribuciones la que restan realizarse, para simular el proyecto en ese momento donde se debe definir como se negocia el contrato de fabricación de los compresores.



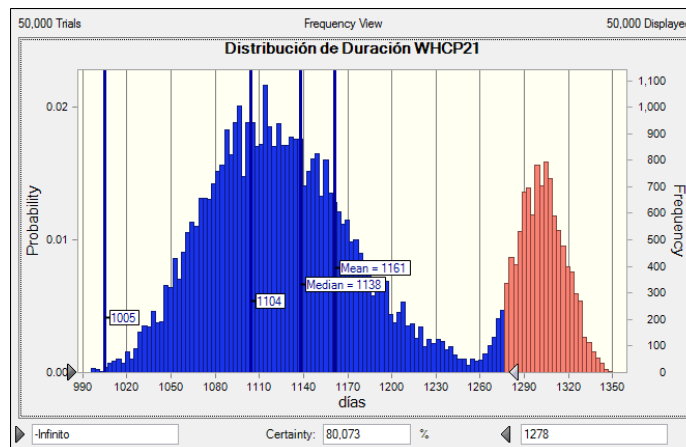
- Entrega hasta día 360 (Media 1124 días)



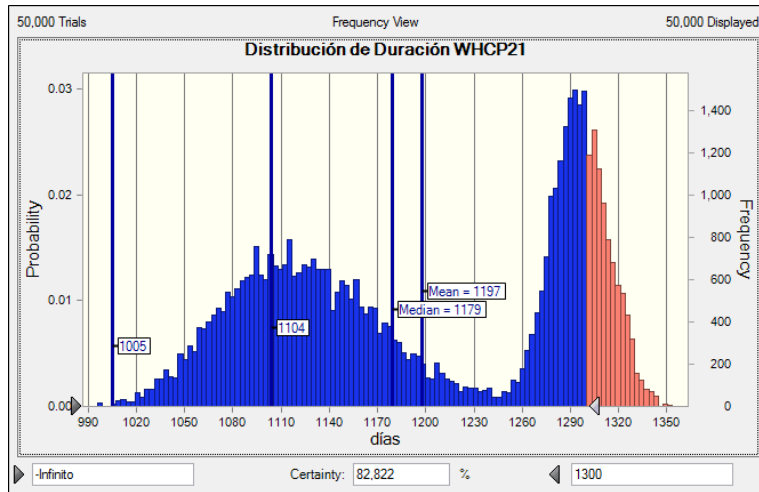
- Entrega en día 380 (Media 1130 días)



- Entrega en día 390 (Media 1161 días)



- Entrega en día 398 (Media 1197 días)



Evaluando mediante CPM o PERT el equipo de proyecto podría entender que incluso con una entrega de 398 días es factible llegar a transportar los compresores dentro de la ventana. Sin embargo por Monte Carlo se pueden determinar los siguientes atrasos esperados en función de la duración de la fabricación.

Duración fabricación Compresores	Duración Esperada de WHCP21	Atraso Esperado
hasta 360 días	1124	0
380 días	1130	6
390 días	1161	37
398 días	1197	73

Valorizar estos atrasos medidos en pérdida de producción por arranque tardío de la nueva instalación permite al equipo de proyecto eventualmente implementar esquemas de premios por entrega adelantada y penalidades por entrega atrasada. También permite evaluar transportes alternativos de mayor costo pero que reduzcan la duración esperada del proyecto y que tengan mayor valor esperado frente a otras alternativas.

### 3.2.2 Control de gestión y excelencia

Dos preguntas nos hemos realizado durante el desarrollo de esta tesis que ameritan ensayar una respuesta:

- ¿En qué grado puede el uso de Monte Carlo para el desarrollo de cronogramas mejorar la gestión de proyectos?
- ¿Qué percentil de duración de proyecto debería comunicarse dentro de la organización y definirse como objetivo de proyecto?

En esta tesis pudimos concluir que CPM sistemáticamente subestima la duración del proyecto. Cuanto más complejo y más actividades existen en el proyecto es factible que la estimación por CPM tenga menor probabilidad de cumplirse. En este contexto hemos recomendado no usar la estimación de CPM para definir la fecha target de finalización del proyecto.

Los objetivos que se plantean para un proyecto deben ser ante todo cumplibles. Creemos que no hay peor incentivo para un equipo de proyecto que entender que tienen como target de cumplimiento una fecha que es altamente improbable.

En ese sentido Monte Carlo aplicado al desarrollo de cronogramas provee a la organización de un elemento de medición. Vale la pena recordar la frase de James Harrington vista en Control Global “la medición es el primer paso para el control y la mejora. Si no se puede medir algo, no se puede entender. Si no se entiende, no se puede controlar. Si no se puede controlar no se puede mejorar”

Por medio de Monte Carlo podemos determinar el rango de duración de posibles proyectos análogos al que debemos realizar. Resta determinar cuál de esos posibles proyectos será el nuestro. En este sentido creemos que la gestión del proyecto toma un rol central en facilitar las condiciones para que nuestro proyecto se ubique en la zona que mas beneficio le da a nuestro negocio.

Hulett indica en su libro “Integrated Cost – Schedule Risk Analysis” que el P80 suele ser un valor comúnmente utilizado en organizaciones conservativas. Si se parte de la base que los cronogramas se desarrollan a partir de riesgos que sabemos que conocemos y riesgos

que sabemos que no conocemos (Known Knowns y Known Unknowns) pero que no contienen aquellos riesgos que no sabemos que no conocemos (unknown unknowns) ni aquellos que no sabemos que conocemos (Unknown knowns), en este escenario la elección del P80 asegura proveer una posición de fortaleza al equipo de proyecto para enfrentar los riesgos no contemplados en el desarrollo del cronograma.

Por otra parte Hulett indica que un análisis realizado por ellos muestra que las empresas de ingeniería y construcciones suelen licitar sus proyectos utilizando el P50. Esta elección no se deriva del hecho que dichas empresas realizan Monte Carlo y toman ese valor, sino como producto de su experiencia en pasados proyectos. Si ellas toman un gran margen de seguridad cuando licitan plazos de obras difícilmente logren ser competitivas en el mercado.

Nuestra postura es, en línea también con lo que indica Vanhoucke, que el uso de Monte Carlo permite entender mejor el espectro de lo posible y en ese sentido es una excelente herramienta de medición. Luego de definido el rango de tiempos posibles para nuestro proyecto es recomendable que se definan tiempos agresivos como duración total del proyecto.

Tampoco creemos que sea recomendable socializar con todo el equipo de proyecto, y toda la compañía, un análisis de Monte Carlo del proyecto. El hecho de tomar conocimiento que nuestro proyecto puede terminar en fechas tan amplias como finales de enero o mediados de Julio (como es el caso de WHCP21 en la estimación CPM y P80) puede no resultar en un incentivo adecuado ni transmitir la sensación de urgencia que debe imperar durante el desarrollo de los proyectos donde cada día de demora en la puesta en marcha es un día de pérdida de producción.

En resumen, nos permitimos recomendar que Monte Carlo lo realice el Project Manager con el programador y sea comunicado a la alta gerencia. Esta herramienta servirá para la toma de decisión asociada a compromisos que derivan del proyecto, por ejemplo primer venta de producto o esquema de penalidades a aplicar si entregamos con demora.

Es importante que la alta gerencia comprenda los rangos de tiempo en los cuales puede desarrollarse el proyecto. Los objetivos de performance que se fijan al equipo de proyecto

deben definirse a partir del conocimiento de dichos rangos. Un valor razonable de target para definir objetivos del equipo de proyecto en una organización que busca la excelencia operacional podría ser el P50. Esto asegura reconocer adecuadamente a quienes gestionan proyectos y preforman mejor.

Para comunicar a toda la organización fechas y objetivos del proyecto creemos debe definirse una duración agresiva del tipo P30. De esta forma nos aseguramos una duración que puede cumplirse y mantener a toda la organización lejos de caer en el síndrome del estudiante.

## CONCLUSIONES

Iniciamos esta tesis preguntándonos en qué medida la metodología de estimación utilizada para definir cronogramas puede constituirse en una de las causas centrales del atraso de los proyectos. A partir de ese interrogante nos pusimos como objetivo establecer los requerimientos mínimos que deben cumplirse para asegurar la calidad del cronograma y realizar un análisis comparativo de tres metodologías para el desarrollo de cronogramas: Critical Path Method (CPM), Project Evaluation and Review Technique (PERT) y Simulación de Monte Carlo, que cubren el espectro desde una visión determinista hasta una visión totalmente probabilística de la estimación de duración del proyecto.

Con esa pregunta y esos objetivos en mente, y luego de una descripción teórica en los tres primeros capítulos de esta tesis, en el capítulo IV desarrollamos, en primer lugar, los procesos que propone el PMBOK para la gestión de tiempos en un proyecto de la industria del Oil and Gas de compresión de gas natural en la selva peruana. Como señalamos, la guía PMBOK presenta una serie de procesos secuenciales que permiten al equipo de proyecto desarrollar un cronograma partiendo de una determinación de alcance de proyecto y continuando con la definición de actividades, asignación de secuencias lógicas entre actividades y la estimación de sus duraciones. Una primera conclusión de nuestra tesis aparece justamente durante la aplicación de estos procesos y la podemos resumir como: **“La cadena es tan débil como su eslabón más débil”**.

Dicho de otro modo, consideramos que es central enfocarse en el desarrollo formal y el debido registro de cada uno de los procesos previos que hacen al desarrollo del cronograma. La definición de la WBS, la determinación de las actividades, su secuencia y estimación de duración son la verdadera complejidad y donde residen las chances reales de contar con un buen cronograma de proyecto. Independizar el desarrollo de cada proceso permite eliminar algunos sesgos, en especial los vinculados a estimaciones optimistas y los de interacción de grupo. La situación que debe evitarse está asociada al desarrollo de todos estos procesos en simultáneo y en formatos de taller o actividades grupales. Creemos que el desarrollo de cronogramas es una disciplina que se ve potenciada por el “trabajo en equipo” pero no particularmente por el “trabajo en grupo”.

En segundo lugar, en el capítulo analítico aplicamos para nuestro proyecto las metodologías CPM, PERT y Monte Carlo, tal como nos lo habíamos propuesto en los objetivos de la tesis. De la comparación de resultados de los tres métodos surge la segunda conclusión importante de nuestro trabajo que resumimos como: **“Duraciones más probables de actividades producen duraciones poco probables de proyectos”**.

En efecto, pudimos constatar que aplicando una visión determinista y utilizando solo un valor de duración para cada actividad, como indica la metodología CPM, se producen estimaciones de duración de proyecto que de ninguna manera reflejan la realidad. Si consideramos que para cada actividad se pueden definir tres duraciones que responden a tres posibles escenarios de ejecución de la misma, uno optimista, uno pesimista y uno más probable, al desarrollar un cronograma utilizando solo las duraciones optimistas de las actividades se obtiene una estimación de duración de proyecto excesivamente optimista que la ubica a la izquierda de la curva de distribución de duración del proyecto, es decir con una probabilidad de cumplimiento del 0%. Al realizar un cronograma utilizando solo las duraciones pesimistas de las actividades se obtiene una estimación de duración de proyecto sumamente pesimista que la ubica a la derecha de la curva de distribución de duración, es decir con probabilidad 100%. Finalmente, al realizar un cronograma utilizando solo las duraciones más probables de las actividades produce una estimación de duración de proyecto dentro de la curva de distribución de duración pero muy optimista y consecuentemente con bajísima probabilidad de cumplimiento.

Creemos entonces que en buena medida los atrasos y las fenomenales pérdidas de valor presente de muchos proyectos pueden estar vinculados con el excesivo optimismo que se vuelca en etapas tempranas de los proyectos cuando se suelen realizar cronogramas de muy pocas actividades y con duraciones más probables usando CPM. Esas etapas en las que se busca hacer atractivo el proyecto para la organización pueden ser las mismas que a la postre lo condenan.

Sobre la aplicación de la metodología PERT pudimos constatar que el solo hecho de utilizar simultáneamente esos tres escenarios para modelar una distribución de duración por actividad mejora notablemente la estimación de duración del proyecto. También pudimos constatar las ventajas de este método en cuanto permite generar una curva de distribución

de duración para todo el proyecto que habilita a las organizaciones a conocer rangos de duración y probabilidades de cumplimiento. Sin embargo los aspectos deterministas de la metodología PERT que la llevan a enfocarse en solo una secuencia de actividades, al igual que CPM, y a no cuantificar el impacto que tienen otras secuencias de actividades en paralelo en la duración esperada, conocido como sesgo de convergencia, nos llevan a recomendar solo el uso de esta metodología para estimaciones preliminares de duración de proyecto.

Respecto a la aplicación de Monte Carlo procedimos a modelar cada actividad con una distribución de duración, evaluando las comúnmente usadas betaPert y triangular, para luego modelar todo el proyecto como la combinación de actividades en serie y paralelo de distribuciones de duración. Luego analizamos los índices de criticidad, significancia, crucialidad y sensibilidad de cronograma, que pueden generarse por medio de Monte Carlo y permiten ampliar el concepto determinista de actividad crítica hacia un concepto más general y cuantificable de correlación entre duración de actividades y duración de proyecto y hacia una visión de criticidad probabilística de actividades.

El uso de Monte Carlo nos permitió también dar un paso adicional y reconocer que la variabilidad no está en las actividades sino en los riesgos presentes vinculados a dichas actividades que pueden materializarse y producir cambios de duración en las mismas. Pudimos entonces modelar, dentro de los cronogramas, riesgos con probabilidad de ocurrencia del 100% donde lo incierto reside únicamente en la consecuencia de dicho riesgo, como el ejemplo de la productividad de la mano de obra. También modelamos los más generalizados riesgos con probabilidad de ocurrencia menor al 100% donde la magnitud de los mismos viene dada simultáneamente por la probabilidad y la consecuencia, como por ejemplo riesgos logísticos asociados a la construcción. Modelamos también ramificaciones probabilísticas, es decir, riesgos que de materializarse generan ramas de actividades en el cronograma que en caso de no materializarse no serian necesarias. Todos estos elementos son centrales para poder realizar análisis de riesgo de proyecto y trabajar en la gestión y mitigación de los mismos.

Finalmente mediante la aplicación de Monte Carlo pudimos modelar la eficacia de las decisiones que puede tomar el Project Manager. Específicamente analizamos cómo es



posible simular decisiones gerenciales por medio de ramificaciones condicionadas en el cronograma de proyecto. Esta herramienta nos permite optimizar la estrategia de proyecto ya que posibilita cuantificar el impacto de las decisiones en la duración esperada del proyecto y/o en la reducción de ciertos riesgos presentes.

En lo que respecta a las herramientas utilizadas durante nuestro trabajo, y con el objetivo de analizar la complejidad de la aplicación, desarrollamos el cronograma de proyecto utilizando productos de software comerciales como lo son MS Project, RiskyProject de Intaver Institute y Polaris de Booz Alen y Hamilton. En simultáneo verificamos la mecánica de cálculo con una aproximación más académica modelando manualmente el mismo cronograma con Excel y con Crystal Ball de Oracle.

Sobre las preguntas que nos realizamos en la introducción de esta tesis podemos concluir que habiendo realizado los procesos previos y teniendo algún producto de software de los muchos disponibles para realizar simulación de Monte Carlo, la tarea específica de simular cronogramas de proyecto con Monte Carlo es considerablemente simple. Existe una gran cantidad de productos de software, con precios muy razonables de licencia, por lo que cualquier compañía que desarrolla proyectos, en particular las de la industria del Oil and Gas, debería desarrollar cronogramas y evaluar sensibilidades y riesgos con Monte Carlo.

En lo que respecta a las preguntas sobre la aplicabilidad de Monte Carlo como herramienta de medición y control de gestión creemos que contar con una distribución de duración de los proyectos permite a la organización definir metas igualmente exigentes para todo el portafolio de proyectos por medio de la definición de un percentil objetivo. En ese sentido, resulta una herramienta más adecuada para la medición de performance y cumplimiento de objetivos.

Sin embargo reconocemos que la información que se genera por medio del desarrollo de cronogramas usando Monte Carlo debe manejarse cuidadosamente dentro de la organización para evitar efectos no deseados. Por ejemplo, la difusión generalizada de la curva de distribución de duración de nuestro proyecto puede ser entendida por el equipo encargado de su ejecución como el rango de tiempos que naturalmente puede tomar y no fomentar el sentido de urgencia que debe imperar en el grupo de proyecto. En este sentido

hemos recomendado que, aparte del Project Manager, la curva de distribución de duración deba darse a conocer solamente con la alta gerencia para asegurar que la compañía tome compromisos maximizando el valor esperado. Sin embargo hacia adentro de la organización creemos que solo debe darse a conocer una fecha target de finalización del proyecto que sea probable pero exigente, de forma de asegurar la continua búsqueda de la excelencia.

Sobre la aplicabilidad de Monte Carlo para la toma de decisiones nuestra conclusión es que a partir del análisis probabilístico de cronogramas se abren posibilidades de evaluar alternativas y estrategias de ejecución de proyecto utilizando herramientas como árboles de decisión para la evaluación del valor esperado. En el ejemplo que ilustramos en esta tesis dejamos planteadas posibles decisiones de acelerar ciertos hitos, como la entrega de compresores, con herramientas como premios por entrega temprana para adelantar la fecha esperada de llegada a destino final y la consecuente reducción del riesgo de perder la ventana de navegabilidad.

En resumen, el uso de Monte Carlo para el desarrollo del cronograma es una herramienta central para ajustar la estrategia de ejecución del proyecto. La metodología permite evaluar distribuciones de duración para todo el proyecto y parciales, hasta cierto grado de avance, para así entender en qué marco probabilístico se van a desarrollar dichas actividades y revisar la planificación en consecuencia.

Como planteamos en la introducción, existe evidencia estadística que indica que los proyectos con cronogramas muy agresivos correlacionan con aquellos que sufren mayores pérdidas de NPV. Sobre este punto hemos identificado la conveniencia del uso de herramientas como Monte Carlo y en menor medida PERT por sobre la más difundida CPM. Sin embargo la mera mejora en la estimación de duraciones no garantiza la reducción del riesgo de potenciales pérdidas de valor.

En efecto, la mejor estimación de duración de proyecto con Monte Carlo puede contribuir a la reducción del riesgo de incurrir en sobrecostos por la implementación de planes de aceleración o pérdidas de producción presupuestada y luego no realizada, sin embargo poco contribuye a mejorar la certidumbre sobre el potencial del reservorio y producción. En

proyectos de compresión, como es el caso presentado, la pérdida de NPV puede venir no solo por un atraso en la fecha de puesta en marcha sino también por un innecesario adelantamiento de la inversión en un reservorio que continuaba con potencial de producción sin la misma. Para reducir este último riesgo la organización debe focalizarse específicamente en esas primeras actividades y potencialmente asumir tiempos buffer y demoras derivadas del SAISS en pos de dar certidumbre sobre el NPV del proyecto.

Una línea de trabajo que puede continuarse está relacionada con vincular el NPV del proyecto con la distribución de duración de las actividades y del proyecto entero. Específicamente nos referimos a las posibilidades de aplicar los conceptos de revenue management analizados durante el MBA. Podría entonces definirse la duración a comprometer del proyecto en base a herramientas de maximización de NPV o la reducción del desvío estándar (riesgo) del NPV.

## BIBLIOGRAFIA

- AACE. (2010). *Schedule Clasification System*. AACE.
- Davis, R. (2008). *Teaching Project Simulation in Excel using Pert-Beta Distributions*. San Jose: Informs.
- Hillson, D., & Murray-Webster, R. (2005). *Understanding and Managing Risk Attitude*. GOWER.
- Hulett, D. (2009). *Practical Schedule Risk Analysis*. Routledge.
- Hulett, D. (2011). *Integrated Cost-Schedule Risk Analisis*. Routledge.
- Hulett, D. (2015). What Should We do with Unknowns in Schedule Risk Analysis. *PM world Journal*.
- Hullet, D., & Nosbisch, M. (2012). Integrated Cost and Schedule using Monte Carlo Simulation of a CPM Model. *WM*. Phoenix.
- Intaver Institute. (n.d.). *Intaver Institute*. Retrieved from Monte Carlo Schedule Risk Analysis: <http://intaver.com/>
- Johnson, J. (1990). *Expediting Projects in PERT with Stochastic Time Estimates*.
- Kahneman, D. (2011). *Thinking fast and slow*. Farrar, Straus and Giroux.
- Leach, P. (2005). Modeling Uncertainly in Project Scheduling. *Crystal Ball Users Conference*.
- Montibeller, G. (2016). *Cognitive and Motivational Biases in Risk and Decision Analysis*. Helsinky: Behavioral Operational Research.
- Nandurdikar, N., & Kirkham, P. (2012). The economic folly of chasing schedules in oil developments and the unintended consequences of such strategies. *SPE Hydrocarbon, economics and evaluation symposium*.
- National Aeronautics and Space Administration. (2013). *Analytic Method for Probabilistic Cost and Schedule Risk Analysis*.
- Nepal, B. (2014). *Time management in projects: tools, techniques and methods*. Tesis NTNU.
- Pérez, I. (2007). *Sistema de Planificación Estocastico de Proyectos: Implicaciones en la Gestión de Riesgos*. La Rioja.
- Project management institute. (2009). *Practice standard for project risk management*. Project management institute.
- Project management institute. (2010). *Practice standard for project estimating*. Project management institute.

Project Management Institute. (2013). *Project management body of knowledge*. Project management institute.

Rad, P. (2002). *Project estimating and cost management*. Management Concepts.

Rand Corporation. (1962). *An Analytical Study of the PERT Assumptions*. Rand Corporation.

Rand Corporation. (1962). *Expected Critical Path Length in PERT Networks*. Retrieved from Expected Critical Path Length in PERT Networks.

Rodriguez, S. (2012). *Metodología para la Gestión del Riesgo en Proyectos*. Madrid.

Vanhoucke, M. (2013). *Project management with dynamic scheduling*. Springer.

Wysocky, R. (2013). *Effective project management: Traditional, Agile, Extreme*. Wiley.

## GLOSARIO

**ANSI:** American National Standards Institute (Instituto Americano de Normalización)

**BCF:** Billion of Cubic Feet (mil millones de pies cúbicos)

**CLT:** Central Limit Theorem (Teorema central del límite)

**CPM:** Critical Path Method (Método de Camino Crítico)

**COCOMO:** Constructive Cost Model (modelo de costo constructivo)

**EPC:** Engineering, Procurement and Construction (Ingeniería, Suministro y Construcción)

**FAT:** Factory Acceptance Test (Prueba de aceptación en fábrica)

**FEED:** Front End Engineering Design. (Mejor traducción es Ingeniería básica ampliada)

**FPM:** Function Point Model (modelo de puntos de función)

**HAZOP:** Hazard and Operability Study (Estudio de operabilidad y peligros)

**GIGO:** Garbage In Gospel Out (entra basura sale evangelio) o Garbage In Garbage Out (entra basura sale basura)

**LLI:** Long Lead Items (Elementos de largo plazo de entrega)

**LPG:** Liquefied Petroleum Gas (Gas licuado de petróleo)

**MAIMS:** Money allocated is money spent (dinero asignado es dinero gastado)

**MDBS:** Middle Distillate Blending Stock (destilado medio de mezcla)

**NPV:** Net Present Value (Valor presente neto)

**PERT:** Project Evaluation and Review Technique (Técnica de evaluación y revisión de proyecto)

**PMBOK:** Project Management Body of Knowledge (Cuerpo de conocimiento de gestión de proyecto)

**PMI:** Project Management Institute (Instituto de gestión de Proyecto)

**PSIG:** Pounds per square inch gauge (libras por pulgada cuadrada manométrica)

**PTM:** Project Time Management (Manejo de tiempos de proyecto)

**P&Id:** Piping and Instrumentation Diagrams (Diagramas de Instrumentos y Tuberías)

**SAISS:** Schedule Allocated is Schedule Spent (Duración asignada es duración gastada)

**SAT:** Site Acceptance Test (Prueba de aceptación en fabrica)

**SME:** Subject Mater Expert (Experto en la asignatura)

**SLOC:** Source Line of Code (Líneas de código fuente)

**UCP:** Use Case Points (Puntos de caso de uso)

**WBS:** Work Breakdown Structure (Estructura de descomposición de trabajo)

**WHCP:** Well Head Compression Project (Proyecto de compression de cabeza de pozo)