



***TESIS DE GRADO EN
INGENIERIA INDUSTRIAL***

***GESTION DE REDES PERT: UN ENFOQUE DE
SIMULACION SOBRE LA CRITICIDAD DE LAS
TAREAS***

Autor: Agustín Pablo COSTA
agustincosta@gmail.com

Director de tesis: Ingeniero Pedro SIRI
fsiri@utenet.com.ar

2005

Dedicatoria

**A mis padres,
Por regalarme la libertad más grande de todas: la educación**

Resumen Ejecutivo

La Gestión de proyectos consiste en la planificación, diseño e implementación de un conjunto de actividades para alcanzar un cierto objetivo. Hoy en día, el entorno en el cuál desarrollar proyectos, se ha vuelto cada vez más exigente y demandante. Esto ha convertido al tiempo de desarrollo en un aspecto esencialmente estratégico, que supera las tradicionales consideraciones o condicionamientos económicos.

Resulta familiar, en el ámbito del *Gerenciamiento de Proyectos*, el uso de softwares de planificación y control estandarizados. Originados por diferentes empresas productoras de software, significan una herramienta útil a los fines del análisis y control de actividades en función del transcurrir del tiempo, pero no incursionan en análisis profundos de los diferentes matices de su gestión, como la incertidumbre, asignación de recursos escasos y duraciones objetivo entre otras.

Estos softwares se apoyan en la definición de redes de tareas vinculadas o condicionadas por otras, la aplicación de algoritmos de solución de redes y fundamentalmente en la expresión gráfica de la distribución de las tareas en el tiempo y los recursos utilizados.

El uso de simulación y técnicas analíticas avanzadas, proporcionan herramientas que profundizan el conocimiento de la red. La propuesta de este documento es analizar, ejemplificar y validar el uso de dichas herramientas para hallar los puntos de apalancamiento que permitan la mejor gestión de la red.

Se recorrerán tanto las consideraciones de *Gerenciamiento de Riesgos* como la optimización de la asignación de recursos frente a los objetivos de tiempo, los parámetros para optimizar los esfuerzos del seguimiento o control operativo, la envergadura de acciones preventivas oportunas, o las consecuentes reacciones ante desvíos al programa original, siempre desde la óptica de analizar la aplicación de técnicas analíticas y validarlas mediante simulación.

Para esto se enunciarán las características de la red de actividades y las de las diferentes técnicas, aplicándose a un par de casos ejemplificadores, comparando la correlación de los resultados de aplicar dichas técnicas analíticas con los obtenidos por simulación de los proyectos, y consecuentemente la validez de su aplicación en diferentes circunstancias,

para finalmente expresar una propuesta de gestión a través de las conclusiones.

Éstas, enfatizan la aplicación de la *gestión de enfoque*, que propone un método para alcanzar fechas objetivo con mayor precisión. La ventaja de esta técnica radica en su alcance y flexibilidad, haciendo uso de índices de criticidad, índices de contribución a la varianza y análisis probabilidades de inversión.

La *gestión de enfoque se aplica durante la planificación* (identificando las tareas que deben ser aseguradas, y definiendo las acciones que permitan reducir su varianza), *en la programación del proyecto* (asignando las fechas de ejecución de estas tareas y las que la red sugiera en paralelo de manera de minimizar competencias por recursos, sin afectar el proyecto en su conjunto) y *sobre su ejecución y control* (accionando las contingencias ya planificadas para asegurar las fechas previstas). Su empleo en proyectos donde el tiempo de finalización es una variable clave, puede maximizar los beneficios y mejorar el rendimiento de los recursos de *management* empleados, en particular en ambientes de múltiples proyectos.

Executive Brief

Project Management involves planning, designing and implementing a set of activities in order to achieve a certain goal. Nowadays, the environment in which to execute projects has become more and more demanding. Such phenomenon turns time into a strategic aspect that suppresses traditional considerations and budget constraints.

Planning and standardized control software is commonly used among project managers. These systems, developed by different software producers, are a useful tool to analyze and control activities as a project evolves, still, they do not deepen their analysis into further aspects of management, such as uncertainty, scarce resources' allocation and project durations' achievement.

These software rely on the definition of network dependencies, the application of graphs' algorithms and mainly on the graphical display of activities and resources distribution in time.

The use of simulation and advanced analytical techniques, provide tools that enlarges a manager's knowledge over the network. This document suggests a management technique through analysis, use of examples and validation, which should find points of leverage over the activities network in order to improve its execution.

Several management considerations shall be reviewed: Project Risk Management, optimizing resource allocation over time, determining which parameters should be considered to improve management attention upon follow-up and operative control steps, determining the convenience of preventive actions and reacting upon schedule deviation.

In order to do this, several techniques will be presented, that shall be applied on a set of exemplifying networks. The results will then be contrasted against project simulation to obtain its validation in different circumstances. Finally, a management technique is suggested, drawn from this paper's conclusions.

These, encourages the use of *Focus Management*, which provides a method that will help managers to reach completion dates precisely. The advantage of this technique lies in its scope and flexibility, through the use of criticality indices, variance contribution indicators and swapping probabilities analysis.

Focus Management is applied during the planning of the project (through identification of tasks that should secure and the definition of actions that

reduces its variance), *during project's programming* (through the assignment of start dates that minimize resources competition, without affecting overall due date) and *in execution and controlling steps* (through the triggering of contingency plans that prevent projects from being late). Its employment in projects where time is of the essence, this technique can maximize benefits and improve management resources usage, especially in multi projects environments.

Referencia bibliografica

Este documento propone el análisis de redes de actividades PERT, a través de técnicas analíticas validadas mediante simulación de Monte Carlo. Mediante el uso de índices de criticidad, índices de contribución a la varianza y análisis probabilidades de inversión se profundiza el conocimiento de la red y se descubren puntos de apalancamiento para definir una nueva técnica de gestión, la *Gestión de Enfoque*.

La *Gestión de Enfoque*, propone un método para alcanzar fechas objetivo con mayor precisión. Su empleo en proyectos donde el tiempo de finalización es una variable clave, puede maximizar los beneficios y mejorar el rendimiento de los recursos de *management* empleados, en particular en ambientes de múltiples proyectos.

Palabras clave: PERT, simulación, Monte Carlo, índices de criticidad, probabilidades de inversión, contribución a la varianza, gestión de riesgos, *Gestión de Enfoque*.

Abstract

This paper describes the analysis of a PERT activities network through analytical techniques validated with Monte Carlo simulation. The use of criticality indices, variance contribution indicators and swapping probabilities analysis, deepens the network knowledge and allocates points of leverage over the project to designate a new management technique, *Focus Management*.

Focus Management provides a method that will help managers to reach completion dates precisely. Its employment in projects where time is of the essence, this technique can maximize benefits and improve management resources usage, especially in multi projects environments.

Keywords: PERT, simulation, Monte Carlo, criticality indices, swapping probabilities, variance contribution, risk management, *Focus Management*.

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer a mi tutor, el Ingeniero Pedro Siri. Sin su ayuda y su disponibilidad para reunirnos incontables veces en su oficina, nada de este trabajo hubiera sido posible. Su aporte fue esencial para poder bajar a la realidad las ideas que he deseado plasmar en este trabajo.

En segundo lugar, a mi familia (Ana Costoya, Carlos Costa, Tomás Costa y Manuel Costa) y a mi pareja, Rocio Biaiñ, que han soportado innumerables charlas sobre la tesis, pero sobre todo, agradezco su cariño incondicional y su aliento permanente a mi búsqueda de la excelencia en cualquier actividad que emprenda.

Por último, deseo agradecer al Ing. Martín Alonso, Ing. Valeria Mosconi, Arq. Bernardo Korochinsky e Ing. Federico Nocella por compartir mi entusiasmo en el desarrollo de este trabajo. Para ellos, mi más profundo agradecimiento, tanto por su compromiso voluntario, como por su amistad y por ser referentes para mí como personas de bien.

Agustín Pablo Costa

Indice

1. MARCO CONCEPTUAL	1
1.1. Introducción	1
1.2. El impacto de las restricciones.....	2
1.3. Gestión de proyectos sobre redes PERT.....	4
1.3.1. Redes de proyecto	4
1.3.2. La incertidumbre en la gestión del proyecto	5
1.3.3. Simulación de redes PERT	7
1.3.4. Enfoque sobre la gestión integrada de proyectos	9
2. EXPERIMENTACION SOBRE UNA RED DE OBRA PÚBLICA	11
2.1. La aplicación de PERT al montaje de viviendas económicas	11
2.2. Incorporación de incertidumbre en la duración de las tareas	13
2.3. Análisis del proyecto por simulación	14
2.3.1. Ajuste de la aproximación Beta-PERT a Beta estándar.....	15
2.3.2. Distribución de probabilidad de duración del proyecto.....	15
2.3.3. Índices de criticidad de tareas	17
2.3.4. Caminos en competencia (<i>contending paths</i>)	20
2.3.5. La contribución a la varianza	21
2.4. Errores en el cálculo de las holguras y riesgo de inversión.....	22
2.4.1. Análisis de holguras reales	22
2.4.2. Impacto de inversión de caminos sobre retrasos en el proyecto	34
2.5. Una aproximación analítica a los índices de criticidad	37
3. EXPERIMENTACION SOBRE UN PROYECTO DE LANZAMIENTO DE PRODUCTO LACTEO	43
3.1. La aplicación de PERT al desarrollo de producto.....	43
3.2. Incorporación de incertidumbre en la duración de las tareas.....	45
3.3. Análisis del proyecto por simulación	46
3.3.1. Distribución de probabilidad de duración del proyecto.....	46
3.3.2. PNET: Una técnica analítica para el mejor ajuste de la duración del proyecto.....	48
3.3.3. Cálculo de índices de criticidad	52
3.3.4. Caminos en competencia (<i>contending paths</i>)	54
3.3.5. La contribución a la varianza	57
4. LA GESTION DE ENFOQUE.....	59
4.1. Introducción a la Gestión de Enfoque	59
4.2. Identificando las actividades de enfoque	59
4.3. Resultados de la Gestión de Enfoque.....	64
5. EJECUCION Y CONTROL	69
5.1. Sincronización	69
5.2. Seguimiento con estimación continua.....	70
5.3. Planes de contingencia	72
6. CONCLUSIONES	75
7. BIBLIOGRAFIA	79

GESTION DE REDES PERT: Un enfoque de simulación sobre la criticidad de las tareas

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Introducción

La Gestión de proyectos consiste en la planificación, diseño e implementación de un conjunto de actividades para alcanzar un cierto objetivo.

La buena administración de proyectos a gran escala requiere planeación, programación y coordinación cuidadosa de muchas actividades interrelacionadas. Al principiar la década de 1950 se desarrollaron procedimientos formales basados en el uso de redes y técnicas de grafos para ayudar en estas tareas. Dos enfoques analíticos han tratado la gestión de proyectos: El Método del Camino Crítico (CPM) y la Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos (PERT). J.E. Nelly de Remington-Rand y M.B. Walter de Dupont desarrollaron CPM en los años 50 con el objeto de asistir al planeamiento de paradas por mantenimiento de plantas de proceso químicas. PERT fue desarrollado casi paralelamente por la U.S. Navy para gestionar el desarrollo de los misiles nucleares Polaris. Aunque originalmente los sistemas tipo PERT se aplicaron para evaluar la programación de un proyecto de investigación y desarrollo, también se usan para controlar el avance de otros tipos de proyecto especiales. Entre ellos se pueden citar programas de construcción, la programación del desarrollo de sistemas para computadoras, la preparación de propuestas y presupuestos, la planeación del mantenimiento y la instalación de sistemas de cómputo, este tipo de técnica se ha venido aplicando aun a la producción de películas, a las campañas políticas y a operaciones quirúrgicas complejas.

El objetivo de los sistemas tipo PERT es asistir en la planeación y el control, por lo que no implica necesariamente optimización directa. En algunas oportunidades, el objetivo primario es determinar la probabilidad de cumplir con fechas de entrega específicas. En referencia a los costos, permite determinar el valor esperado de un sistema de premios y castigos por entregas adelantadas o retrasadas de proyectos. Con respecto a tareas de control, identifica aquellas actividades que son más probables a convertirse en cuellos de botella y señala, por ende, en que puntos debe hacerse el mayor esfuerzo para no tener retrasos. Una red PERT hace posible evaluar el efecto de los cambios del programa, valorando el efecto de un posible cambio en la asignación de recursos de las actividades menos críticas a aquellas que se identificaron con cuellos de botella.

Otra aplicación importante es la evaluación del efecto de desviarse de lo programado. En este sentido, la planificación a través de redes PERT, asiste

en la evaluación de planes de contingencia para enfrentar con el menor impacto económico el efecto del azar en la duración y costo de las tareas.

Tanto PERT como CPM se basan en el uso de grafos o redes. La diferencia fundamental entre ambas técnicas radica en el tratamiento de los tiempos para cada actividad. Mientras CPM asume valores determinísticos para los tiempos de concreción de las tareas, PERT asume la distribución de probabilidades Beta generalizada. Si bien esto hace de PERT un enfoque estocástico, la red se reduce con frecuencia a un modelo cuasi-determinístico, utilizando la media de la duración de las actividades y su desvío estándar para facilitar el cálculo. Esta aproximación permite realizar especulaciones acerca de la duración del proyecto basándose en su camino crítico. Es precisamente este último enfoque, el que se utiliza tanto para hacer *crashing*¹ de actividades como para evaluar el avance del proyecto y la gestión sobre la marcha.

La aproximación simplificada reduce el alcance y la profundidad de análisis que permite la técnica PERT. El análisis por simulación de Monte Carlo amplía el conocimiento de la red. Este aspecto fue observado por primera vez por Van Slyke [1] quien en 1963 fue el primero de varios investigadores en aplicar la simulación de Monte Carlo al estudio de redes PERT.

1.2. El impacto de las restricciones

Cuando un *project manager* se propone la ejecución de un proyecto, sea este el desarrollo de un nuevo producto o la construcción de un nuevo depósito para una nave industrial, suele encontrarse con ciertos tipos de restricciones. Estas restricciones suelen ser:

- De Tiempo: Se refiere al tiempo límite en el cuál se requiere que el proyecto se finalice.
- De Costo: Es el límite de dinero destinado a la ejecución de un proyecto. En general se asocia al uso de recursos disponibles para un proyecto dado.
- De Alcance: Se refiere a la definición del proyecto en cuanto a los objetivos que cumplirá.
- De Calidad: es la adecuación y ajuste a las expectativas del “cliente del proyecto”.

En el análisis que propone este documento, se hará referencia a proyectos de carácter económico, es decir cuyo único propósito será el de lograr ganar

¹ La técnica de *crashing* evalúa la alternativa de invertir más recursos sobre ciertas actividades para alcanzar fechas más tempranas en la finalización del proyecto.

dinero, meta de cualquier empresa económica [2]. Desde este punto de vista, podría considerarse cual de todas estas restricciones resultan más significativas a la hora de llevar adelante un proyecto, si es que acaso existe alguna de ellas que deba ser ponderada con mayor intensidad.

Para evaluar el impacto de las restricciones, resulta conveniente mirar a la técnica PERT como una herramienta de simplificación y enfoque. Más allá de permitir el cálculo de la fecha de finalización de un proyecto, la red PERT permite enfocar esfuerzos de gestión sobre las actividades en el camino crítico. Desde este punto de vista, la herramienta proporciona una mirada aplicando el Principio de Pareto, concentrando la atención sobre algunas pocas actividades significativas respecto de muchas otras necesarias pero de poco compromiso para la gestión. Haciendo uso de este mismo principio, se eleva el interrogante sobre que aspecto de las limitaciones podemos enfocar la gestión.

Desde la aparición de los 14 principios de Deming de la calidad, hasta la definición de calidad de Taguchi, resulta evidente que la calidad no es un factor que pueda sacrificarse. Por otra parte, el alcance del proyecto es algo que resulta conveniente definir en la etapa de planificación como el mínimo para alcanzar los objetivos propuestos y como tal tampoco podrá ser acotado durante la gestión del proyecto.

Esto deja dos restricciones sobre las cuáles enfocarse, tiempo y costo. Estas pueden ser generalmente sacrificadas una a expensas de la otra, pero incluso sabiendo esto, ¿Sobre cuál de ellas resulta apropiado concentrarse? Un estudio realizado en 1990 por McKinsey & Co. [3] publicado en la revista Business Week, elevaba el mismo interrogante, enfocándose particularmente en proyectos de desarrollo de productos nuevos. El mismo concluye, como puede observarse en la figura 1.2-1, que un proyecto que finaliza a tiempo pero con un 50% de sobre costo respecto al presupuesto inicial reduciría los beneficios en 4%.

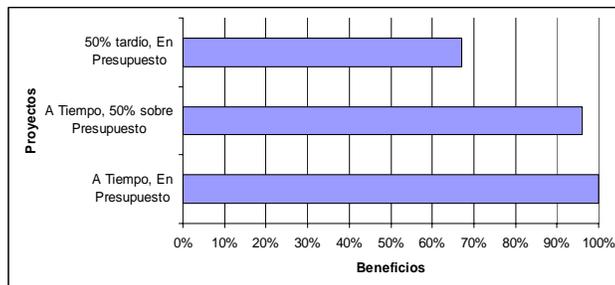


Figura 1.2-1. Comparación entre proyectos con variación de fecha de finalización y variación de presupuesto.

Sin embargo, el análisis anticipa que un proyecto ajustado al presupuesto pero con un 50% de retraso sobre la fecha propuesta inicial, reduciría los beneficios en un 33%.

El análisis que propone la revista Newsweek resulta cierto siempre y cuando la rentabilidad del proyecto sea

elevada, dado que es bajo esa condición que los incrementos en la duración del proyecto afectan al lucro cesante.

Asimismo, Orion Kopelman, presidente de Global Brain, afirma que "...Cada vez más, las compañías de hoy en día deben lograr este tipo de milagros, a medida que la introducción de nuevas tecnologías y la competencia global se aceleran. Actualmente se estima que el know-how que tenemos debe duplicarse cada 12-18 meses, creando un ambiente impadioso en el cual ejecutar proyectos..." [4].

La afirmación de Kopelman no resulta un concepto nuevo en cuanto a mercadeo de productos se refiere. Al Ries y Jack Trout lo exponen brillantemente en su libro *Las 22 Leyes inmutables del Marketing* [5], en dónde la ley número 1 o "Ley del liderazgo" propone que es mejor ser el primero que ser el mejor. Luego de varios estudios, aseguran, que no sólo la primera marca suele convertirse en líder, sino que también el nivel de ventas de las que le siguen a menudo coincide con el orden de su lanzamiento.

Este concepto es reafirmado en 1997 por Eliyahu Goldratt en su libro *Cadena Crítica* [6] en dónde razona que el tiempo debe ser una variable de mayor importancia que el costo para los líderes de proyectos. Goldratt se refiere esencialmente a MEGA proyectos, entendiendo por MEGA proyectos a aquellos en los que suele estar involucrado el Estado en alguna medida y dónde el tiempo de finalización toma un atributo político más allá del costo.

Un análisis de los argumentos expuestos, permiten concluir que en aquellos proyectos dónde el lucro cesante es mucho mayor respecto de la tasa incremental de la inversión (introducción de nuevos productos con altas rentabilidades) o dónde la concreción del proyecto conlleva una carga política, el tiempo es un factor de mayor impacto sobre los beneficios del proyecto que los costos. El resto de este informe dedicará su atención sobre el mejor manejo de los tiempos de proyecto con el propósito de alcanzar mejores resultados, analizando proyectos en el que el tiempo es superior en importancia que el costo.

1.3. Gestión de proyectos sobre redes PERT

1.3.1. Redes de proyecto

Una red consiste en cierto número de nodos (mostrados como pequeños círculos o rectángulos) y arcos (mostrados como flechas) que van de un nodo a otro. Se requieren tres tipos de datos para describir una red de proyecto.

1. Información de la actividad: se desglosa el proyecto en sus actividades individuales (al nivel de detalle deseado).
2. Relaciones de precedencia: se identifican los predecesores inmediatos de cada actividad y aquellas actividades que esta condiciona.
3. Datos de tiempo: se estima la duración de cada actividad.

La red de proyecto debe contener toda esta información. Se dispone de dos tipos alternativos de construcción de redes de proyecto para hacer esto. Un tipo es la red basada en *actividades en los arcos*, donde cada actividad es representada por un arco. Un nodo se usa para establecer un evento, final o inicio de una actividad, que separa una actividad de cada una de sus predecesoras inmediatas. La secuencia de arcos muestra las relaciones de precedencia entre las actividades. Las versiones originales de PERT y CPM usaban redes de proyectos de actividad en arcos, por lo que se convirtieron en el tipo convencional durante algunos años. El segundo tipo es la red de proyecto de *actividades en los nodos*, donde cada actividad está representada por un nodo. Los arcos se usan solo para mostrar las relaciones de precedencia entre las actividades. Este tipo de red posee algunas ventajas importantes respecto a las redes de actividad en arcos para comunicar la misma información. Por este motivo fueron desplazando lentamente al uso de actividades en arcos. Para resolver este tipo de redes, con los cuáles se encuentran desarrollados los proyectos en este documento, se utiliza el método ROY, o método de los potenciales. Sin embargo, estas tres técnicas que tienen mucho en común, se han ido fusionando de modo gradual al pasar los años y por lo tanto es común que quienes la aplican usen sus nombres en forma indistinta.

Una vez diseñada la red de actividades del proyecto, se procede a realizar un análisis de la misma mediante técnicas de grafos que permiten estimar, esencialmente, la duración total para el proyecto. El tiempo de concreción queda determinado por el camino de mayor duración entre el inicio del proyecto y la finalización del mismo, por lo que puede ser empleado para su cálculo, el algoritmo de resolución de grafos de Ford, que cuando resuelve la red, determina las holguras de las tareas o caminos.

1.3.2. La incertidumbre en la gestión del proyecto

La incorporación de incertidumbre sobre la duración de las tareas aporta un mayor realismo sobre los plazos de ejecución. El método PERT asume que las actividades poseen una distribución de probabilidad Beta. Para ello estima la distribución a partir de 3 puntos clave:

- Una estimación más probable de la duración (t_m). Este valor se conoce estadísticamente como *moda*.
- Una estimación optimista, duración para las condiciones más favorables en la ejecución de la actividad (t_{min}).
- Una estimación pesimista, representativa de la máxima duración que pueda tomar una actividad (t_{max}).

La localización de estas tres estimaciones respecto a la distribución de probabilidad se muestra en la figura 2.2-1.

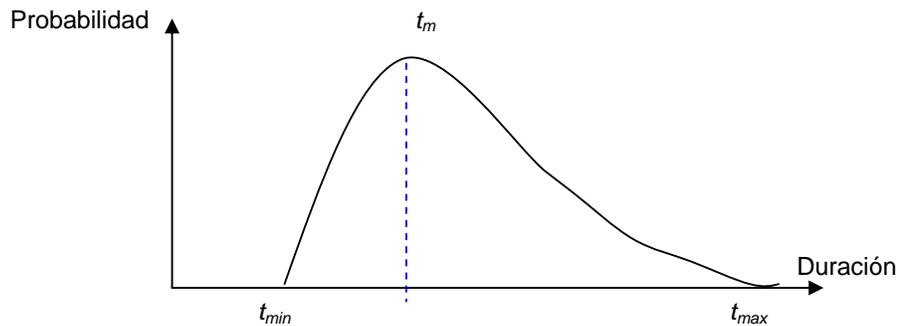


Figura 1.3.2-1. Modelo de la distribución de probabilidad de la duración de una actividad para el enfoque de tres estimaciones de PERT.

La distribución supone que las estimaciones optimista y pesimista están en los extremos de lo que es posible, mientras que la estimación más probable proporciona el punto más alto de la distribución de probabilidad. PERT supone la distribución beta con el propósito de calcular la media y la varianza para cada actividad. Para ello, emplea las fórmulas aproximadas (1) y (2).

$$\sigma^2 = \left(\frac{t_{max} - t_{min}}{6} \right)^2 \quad (1)$$

$$\mu = \frac{t_{min} + 4t_m + t_{max}}{6} \quad (2)$$

Donde σ^2 representa la varianza de la tarea y μ su duración media.

El método PERT se basa tradicionalmente en tres aproximaciones simplificadas que permite a partir de la nueva información disponible respecto de la incertidumbre para cada actividad, asignar una distribución de probabilidad para la fecha de finalización del proyecto.

- *Aproximación simplificada 1:* Asume que la ruta crítica media resultará la trayectoria más larga a través de la red de proyecto.

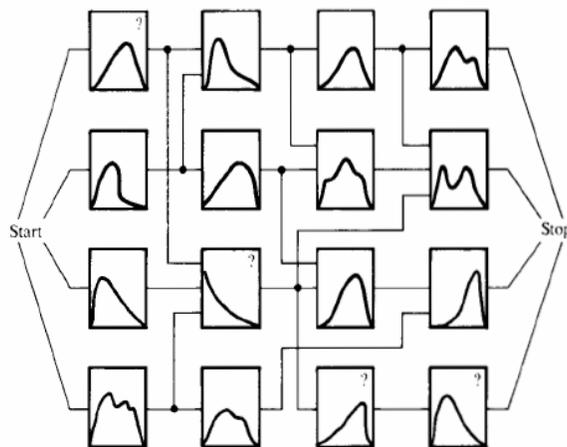
- *Aproximación simplificada 2*: Asume que las duraciones de las actividades en la ruta crítica media son estadísticamente independientes.
- *Aproximación simplificada 3*: Asume que la forma de distribución de probabilidad de la duración del proyecto es una distribución normal, a partir del uso de las aproximaciones simplificadas 1, 2 y el uso del teorema central del límite.

En resumen, la duración esperada del proyecto será la suma de las duraciones medias de las actividades en el camino crítico, la varianza de la duración será la suma de las varianzas de las actividades en el camino crítico y su distribución será Normal.

El buen ajuste de dicha simplificación a la verdadera distribución de probabilidad de tiempos del proyecto dependerá en gran medida de la estructura de red del proyecto, las varianzas de las actividades y principalmente de si existe o no un camino crítico dominante.

1.3.3. Simulación de redes PERT

Una alternativa que permite resultados más exactos es la simulación de Monte Carlo sobre la red del proyecto. La simulación de Monte Carlo es una



simulación estática mediante la cuál, se asignan distribuciones de probabilidad para las variables que influyen sobre la duración total del proyecto (en este caso, la duración de cada una de las actividades independientes) para evaluar el impacto sobre esa variable resultante (la duración total del proyecto, ver Figura 1.3.3-1).

Figura 1.3.3-1. Aplicación de Simulación de Monte Carlo sobre una red PERT [7].

El supuesto de independencia estadística entre duración de actividades ha sido objeto de estudio durante varios años. Resulta razonable suponer que los factores (meteorológicos, gestionales, de fuerza laboral) que contribuyen a la finalización de una actividad actúan en forma independiente. Robillard y Trahan

muestran como la duración de una red de actividades puede ser aproximada eficientemente a través de este supuesto [8].

El problema con el supuesto de independencia es que la duración de diferentes actividades no siempre es independiente. Por ejemplo, ciertas tareas pueden compartir factores que afectan la duración de las mismas de formas similares. La construcción de barcos es un ejemplo en donde las correlaciones son de importancia [9]. Las distribuciones de tiempo pueden encontrarse correlacionadas positivamente, cuando ambas dependen, por ejemplo, de la calidad de management o se efectúan bajo un mismo ambiente (físico y de gestión). Eventualmente, pueden encontrarse negativamente correlacionadas como cuando comparten un recurso en el cuál la concreción más veloz de una actividad implica la demora en otra. Berleant, Zhang y Sheblé, proponen una solución al problema de redes PERT cuando la relación de dependencia es desconocida entre actividades, así como también las distribuciones de duración de las mismas [10].

Este informe mantendrá el supuesto de independencia entre actividades, asumiéndolo como supuesto fundamental pero advirtiendo a los lectores que el mismo debe ser verificado en cierta medida (o asumidos los riesgos de la simplificación) antes de aplicarse las técnicas aquí descritas sobre una red de proyectos.

La incorporación de la simulación de Monte Carlo a las redes PERT incluso con los supuestos establecidos, iluminó sobre un aspecto de la gestión de proyectos: el manejo de riesgos (*Project Risk Management*). La simulación permitió estimar en 1963 la probabilidad de que una actividad o rama de la red se convierta en crítica. Esta probabilidad se dio a conocer como *índices de criticidad* y desde entonces, estos han resultado una herramienta útil para el enfoque sobre las actividades dentro de la red que mayor probabilidad tienen de convertirse en críticas. Estos índices han permitido a su vez establecer los denominados *camino en competencia* que resultan de las ramas de la red paralelas que tienen probabilidades similares de tornarse críticas. La división de aviones comerciales de Boeing lo utiliza para aplicar el criterio de Pareto sobre cuáles actividades deben enfocarse los recursos gestionales de control [11].

Este documento se centra sobre el concepto de enfoque, estableciendo otros indicadores para la *gestión de enfoque* y una forma de utilizar cálculos sin simulación para establecer criterios ordinales similares a los obtenidos simulando.

1.3.4. Enfoque sobre la gestión integrada de proyectos

Resumiendo lo expuesto hasta el momento, puede identificarse la aplicación de redes PERT sobre cuatro funciones elementales de la gestión integrada de proyectos: planificación, programación, ejecución y control (Figura 1.3.4-1).

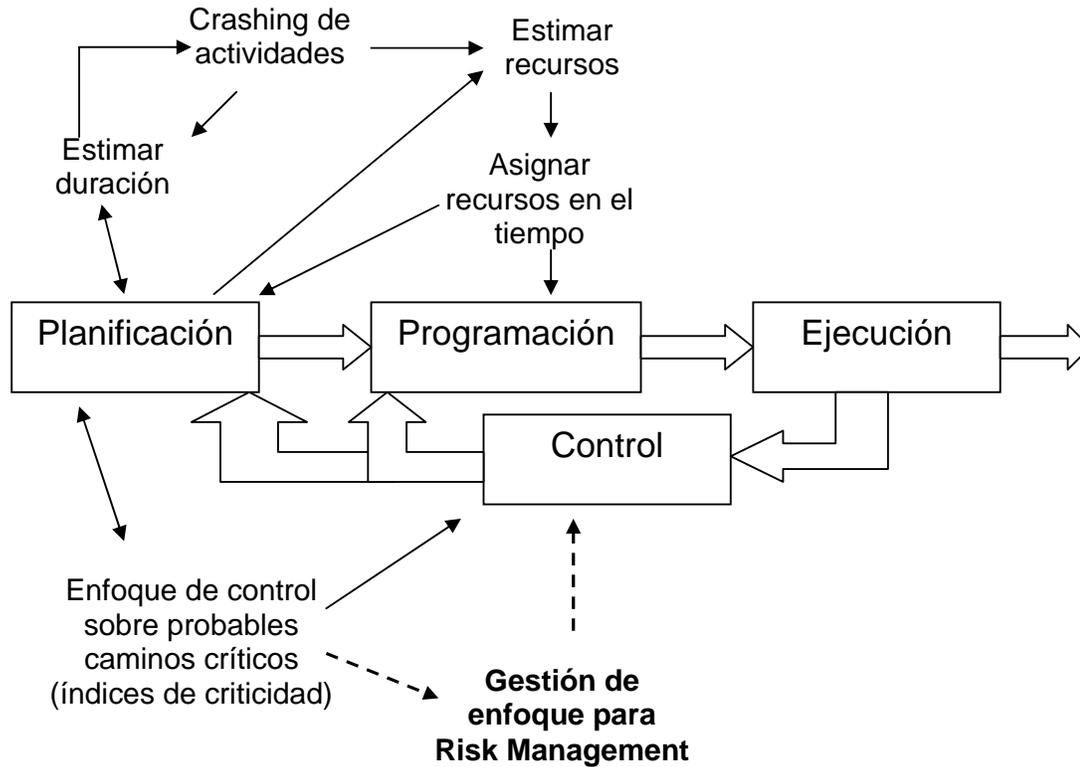


Figura 1.3.4-1. Aplicación de herramientas de redes PERT sobre fases del proyecto.

Las herramientas desarrolladas hasta el momento permiten un enfoque de control, es decir, concentrar el seguimiento de la evolución del proyecto sobre aquellas actividades que por ser críticas, demorarían la fecha de finalización del proyecto al verse las mismas retrasadas. La gestión de enfoque sugiere un reducido número de actividades las cuáles representan mayores oportunidades / riesgos. Sobre las mismas podrán enfocarse los esfuerzos de gestión para reducir la incertidumbre en cuanto a la finalización del proyecto o disponer de recursos adicionales (balanceando el riesgo en favor de la concreción de dichas actividades) con el objetivo de planificar la contingencia de eventuales retrasos.



2. EXPERIMENTACION SOBRE UNA RED DE OBRA PÚBLICA

2.1. La aplicación de PERT al montaje de viviendas económicas

Se propone una red de ejemplo de montaje de viviendas económicas [12] para exponer la metodología y posteriormente experimentar en la misma con el objetivo de hallar herramientas que a través de la simulación de la red PERT, brinden un mayor conocimiento de la dinámica con la cuál se desarrolla un proyecto.

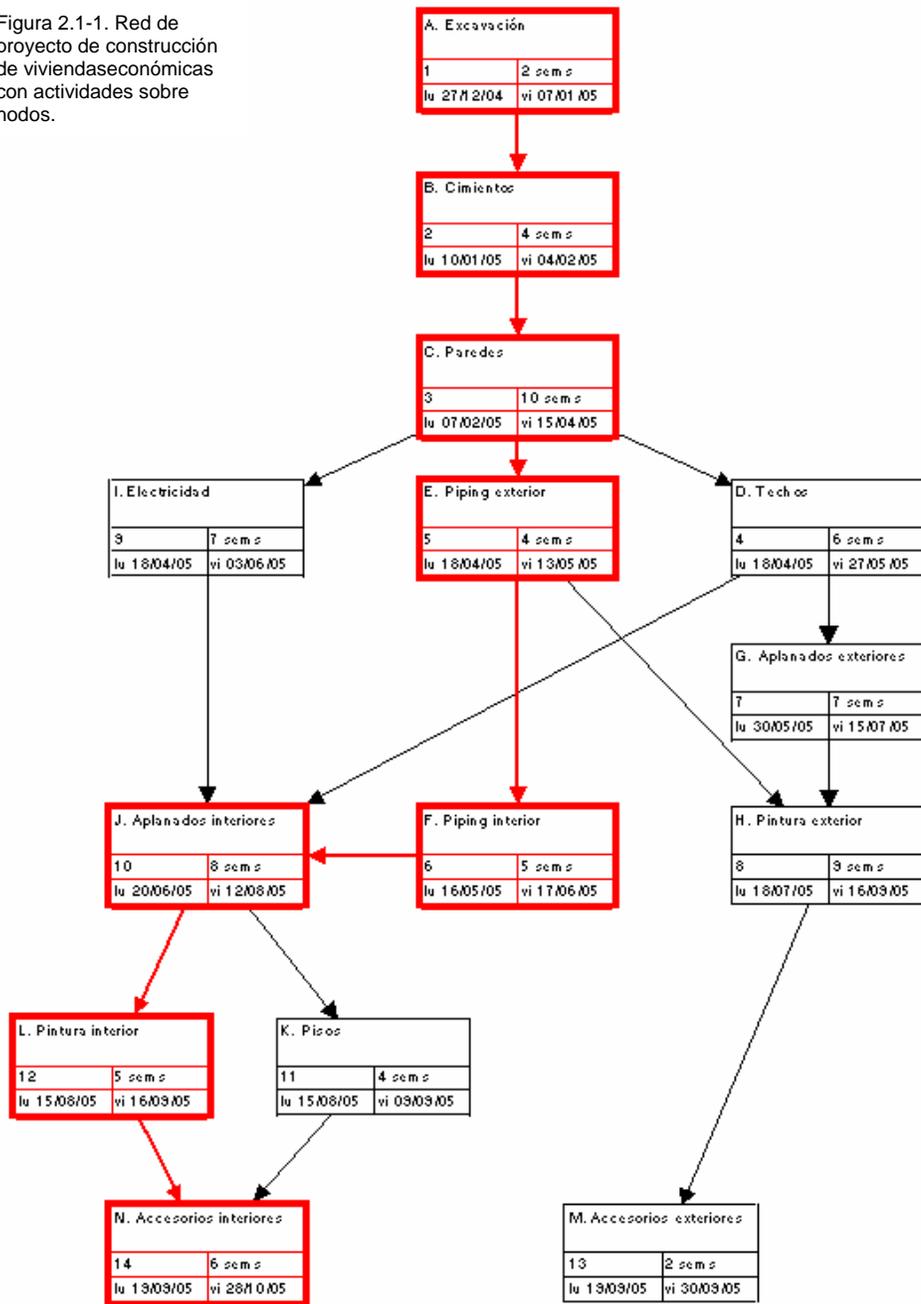
La tabla 2.1-1 presenta los datos necesarios para la elaboración de la red del proyecto y la figura 2.1-1 la red de actividades, en donde se han señalado con color rojo las actividades correspondientes al camino crítico, determinado con los datos hasta aquí proporcionados.

ACTIVIDADES	Descripción	Actividades Precedentes	Duración Esperada
A	Excavación		2
B	Cimientos	A	4
C	Paredes	B	10
D	Techos	C	6
E	Piping exterior	C	4
F	Piping interior	E	5
G	Aplanados exteriores	D	7
H	Pintura exterior	E, G	9
I	Electricidad	C	7
J	Aplanados interiores	F, I, D	8
K	Pisos	J	4
L	Pintura interior	J	5
M	Accesorios exteriores	H	2
N	Accesorios interiores	K, L	6

Tabla 2.1-1. Actividades para construcción de viviendas económicas.

Como puede apreciarse en la figura 2.1-1, 8 de las 14 actividades pertenecen al camino crítico. Recurriendo a un modelo construido a partir de MS Excel (para la posterior simulación) se concluye mediante la duración esperada para cada actividad que el proyecto podrá ser completado en 44 semanas. Asimismo, deberá prestarse especial atención sobre las actividades A, B, C, E, F, J, L y N dado que un retraso en las mismas de un día, retrasará la fecha de finalización para todo el proyecto en la misma medida.

Figura 2.1-1. Red de proyecto de construcción de viviendas económicas con actividades sobre nodos.



La representación gráfica de la figura 2.1-1 corresponde específicamente a un diagrama de ROY (con actividades en nodos). Este tipo de representación facilita la visualización de la red, sin embargo, se referirá a *técnica PERT* genéricamente como método de resolución de la red de proyectos debido a los argumentos expresados en la sección 1.3.1. Otro tipo de gráfica también empleada frecuentemente se presenta en la figura 2.1-2. Este tipo de gráfico se denomina Diagrama de Gantt. Su principal ventaja consiste en la visualización

calendario que permite además, la identificación visual de las holguras de las actividades.

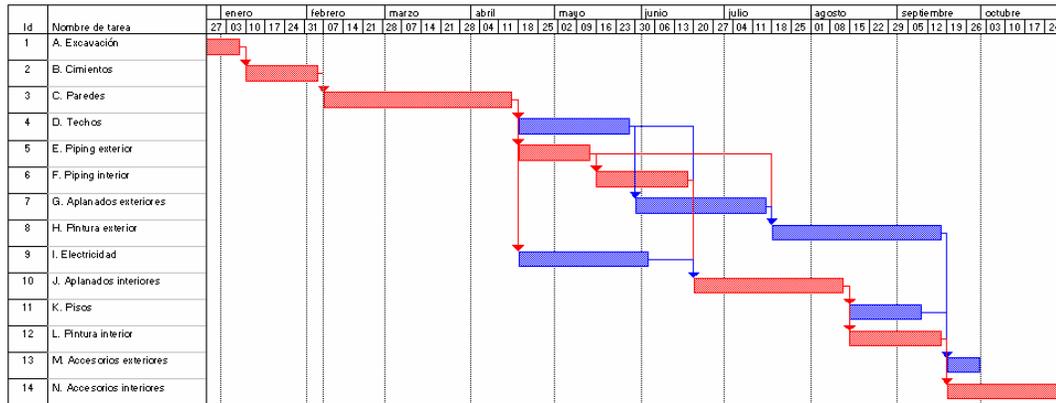


Figura 2.1-2. Diagrama de Gantt para construcción de viviendas económicas.

Esta aplicación de la técnica PERT al proyecto de montaje de viviendas económicas, es un tanto limitada, si bien adecuada para la magnitud de la red (en cuanto a cantidad de actividades y complejidad). Sin embargo, manteniendo el ejemplo de este simple proyecto, se desarrollarán algunas herramientas sobre el mismo, verificando que incluso sobre proyectos de poca cantidad de actividades e interacciones es posible obtener mayor información que facilite la gestión del mismo.

2.2. Incorporación de incertidumbre en la duración de las tareas

Incorporando la información adicional requerida para cada una de las actividades y calculando mediante (1) y (2) se obtiene los valores medios y varianzas indicados en la tabla 2.2-1.

ACTIVIDADES	Descripción	Actividades Precedentes	DURACION			Duración Esperada	Varianza
			Estimación Optimista	Moda	Estimación Pesimista		
A	Excavación		1	2,0	3	2	0,11
B	Cimientos	A	2	3,5	8	4	1,00
C	Paredes	B	6	9,0	18	10	4,00
D	Techos	C	4	5,5	10	6	1,00
E	Piping exterior	C	1	4,5	5	4	0,44
F	Piping interior	E	4	4,0	10	5	1,00
G	Aplanados exteriores	D	5	6,5	11	7	1,00
H	Pintura exterior	E, G	5	8,0	17	9	4,00
I	Electricidad	C	3	7,5	9	7	1,00
J	Aplanados interiores	F, I, D	3	9,0	9	8	1,00
K	Pisos	J	3	4,0	5	4	0,11
L	Pintura interior	J	1	5,5	7	5	1,00
M	Accesorios exteriores	H	1	2,0	3	2	0,11
N	Accesorios interiores	K, L	5	5,5	9	6	0,44

Tabla 2.2-1. Incorporación de estimación por tres puntos y cálculo de varianzas y medias para las actividades del proyecto.

Un aspecto notable de los datos respecto de la incertidumbre responde a los diferentes sesgos de las actividades. Las actividades E, J y L tienen sesgos a la izquierda mientras que el resto de las actividades poseen sesgo a la derecha (a excepción de la actividad M, con distribución simétrica). Esto se hace posible debido a la versatilidad de la distribución de probabilidad Beta. Los parámetros de forma de dicha distribución permiten crear simetrías, sesgos y curtosis de diferentes tipos. Es natural suponer que ciertas duraciones de actividades responderán a un tipo de forma y otras a una distinta.

En el caso del ejemplo para la construcción de viviendas económicas, las 3 aproximaciones indican que la distribución de probabilidad para la fecha de finalización del proyecto tendrá distribución Normal con media de 44 semanas y un desvío estándar de 3 semanas. Es a través de esta simplificación que pueden extraerse conclusiones sobre la volatilidad en la fecha de finalización estimada, las probabilidades de finalización de proyecto para una fecha dada e intervalos de confianza.

Cabe mencionar que los proyectos reales a gerenciar son mucho más complejos que este ejemplo y por lo tanto, los caminos críticos más numerosos en cuanto a actividades. La simplificación de PERT para asumir distribución Normal para la duración del camino crítico se basa en el *Teorema Central del Límite (TCL)*, que demuestra que la suma de variables aleatorias (en este caso duración de las actividades), sin importar su distribución de probabilidad, tienden a una distribución Normal. El TCL sugiere para su cumplimiento, la presencia de 30 o más variables aleatorias en la sumatoria. En este caso no se alcanza dicho número, aún así, la aproximación resulta apropiada. Para el caso de proyectos reales, el TCL brinda un mayor soporte y rigor estadístico a la aproximación.

2.3. Análisis del proyecto por simulación

Como ha sido mencionado en la introducción, la simulación de Monte Carlo permite resultados más aproximados a la realidad manteniendo como supuesto la independencia entre la duración de las tareas. Existe una amplia gama de software que permite la aplicación de Simulación de Monte Carlo, entre ellos el @RISK de Pallisade y el Cristal Ball de Decisioneering, son las más conocidos. El posterior ha sido la elección para la evaluación de alternativas en este caso, junto con una plantilla de MS Excel diseñada a los efectos de simular una red de proyectos.

2.3.1. Ajuste de la aproximación Beta-PERT a Beta estándar

La aproximación de la distribución Beta para la duración de actividades se realiza en una red PERT mediante la estimación de dichos puntos característicos. Sin embargo, estos no son los parámetros utilizados para la descripción generalizada de la distribución beta estándar. La misma es descrita en función de los parámetros de forma a y b tal como se observa en las fórmulas (3) y (4).

$$\mu = \frac{a}{a+b} \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{\mu(1-\mu)}{a+b+1} \quad (4)$$

En este caso, los parámetros a y b describen la forma de la distribución, dado que la varianza se encuentra fijada en la distribución Beta estándar (el rango de la distribución va desde 0 hasta 1). Para poder calcular los parámetros análogos de la distribución aproximada Beta utilizada por PERT a la distribución Beta estándar (que es la distribución admitida por el programa empleado para la simulación), se debe en primer lugar estandarizar la media, aplicando la fórmula (5).

$$\mu_{std} = \frac{4 \cdot \left(\frac{t_m - t_{min}}{t_{max} - t_{min}} \right) + 1}{6} \quad (5)$$

$$\sigma_{std}^2 = \frac{1}{6} \quad (6)$$

Luego, despejando de las fórmulas (3) y (4), es posible obtener los parámetros equivalentes para la distribución Beta estándar.

$$a = \frac{\mu_{std}^2(1-\mu_{std})}{\sigma_{std}} - \mu_{std} \quad (7)$$

$$b = \frac{a}{\mu_{std}} - a \quad (8)$$

Con este inconveniente superado se procede a la simulación de la red de actividades.

2.3.2. Distribución de probabilidad de duración del proyecto

El análisis por simulación permite, en primer lugar, una descripción detallada de la distribución de probabilidad de duración del proyecto. La tabla 2.3.2-1 expone los resultados obtenidos a través de una simulación de 10.000 corridas, proporcionando datos sobre la media, el desvío estándar, varianza, curtosis, rango y sesgo.

Resumen:

Ranto total desde 34,8 a 55,6 semanas
 Luego de 10.000 corridas, el error estándar de la media es 0,0

Estadísticas:	Valores
Corridas	10000
Media	44,3
Mediana	44,2
Moda	44,5
Desvío estándar	2,9
Varianza	8,2
Sesgo	0,15
Curtosis	2,83

Tabla 2.3.2-1. Resultados de la simulación de Monte Carlo a la red de proyecto de construcción de viviendas.

Los resultados obtenidos de esta forma, pueden ser luego comparados con aquellos obtenidos a partir de las tres aproximaciones simplificadas. En la figura 2.3.2-1 puede observarse que para este proyecto la aproximación a la distribución simulada para el tiempo de concreción resulta adecuada. Aunque las aproximaciones simplificadas del método PERT sugieren una distribución un tanto más optimista (la media se encuentra un poco desplazada a la izquierda respecto de la media real), el buen ajuste de la curva normal de media 44 semanas y desvío estándar de 3 semanas resulta evidente.

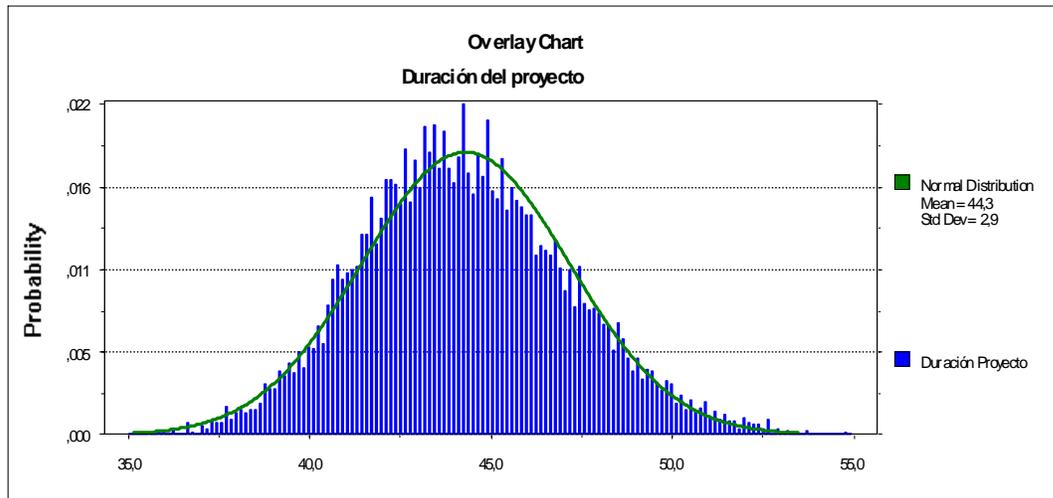


Figura 2.3.2-1. Ajuste de la aproximación simplificada a la verdadera distribución de probabilidad del proyecto.

Un análisis en mayor profundidad mediante el test de Normalidad y bondad del ajuste de Kolmogrov-Smirnov, demuestra que la curva Normal que mejor se ajusta a la distribución posee una media de 44,3 semanas y un desvío estándar de 2,9 semanas, con un nivel de significación del 97,85 %. El buen ajuste de la aproximación Normal, también se debe en este caso a la compensación de sesgos entre actividades sobre el camino crítico, las cuáles hacen coincidir prácticamente la moda y la media.

Si bien la simulación de la red ha brindado una información más precisa sobre la misma, este proyecto en particular podría haber sido resuelto mediante la aproximación simplificada. Aún siendo esto cierto, en la siguiente sección se demostrará que existe más información que será posible extraer de la red simulada, la cuál será útil para la gestión del proyecto que la misma planifica.

2.3.3. Índices de criticidad de tareas

Los índices de criticidad, extraídos a partir de la simulación de la red de actividades, indican la probabilidad de que una actividad cualquiera forme parte del camino crítico. Esta propiedad revela una importante característica de las actividades, ya que la misma se vincula, no sólo con características propias, sino también con su interrelación con otras actividades y su posición dentro de la red.

Desde su desarrollo por Van Slyke [1] en 1963, los índices de criticidad han sido una de las incorporaciones de mayor importancia que ha tenido la técnica de redes PERT.

En primer término, sirve para identificar aquellas actividades que, sin encontrarse en el camino crítico preponderante, tienen una alta probabilidad de convertirse en críticas. Cuando existe una inversión en el camino crítico (cambio en las actividades que lo componen), se genera un problema para el seguimiento y el control del proyecto dado que causa un efecto de cambio en el *cuello de botella*. Identificar las actividades con alta probabilidad de formar parte del camino crítico, amplía el espectro de actividades a controlar (generalmente se denomina *semicríticas* a aquellas actividades con alta índice de criticidad que no componen el camino crítico original) y brinda un indicador para anticiparse a la inversión de los caminos críticos.

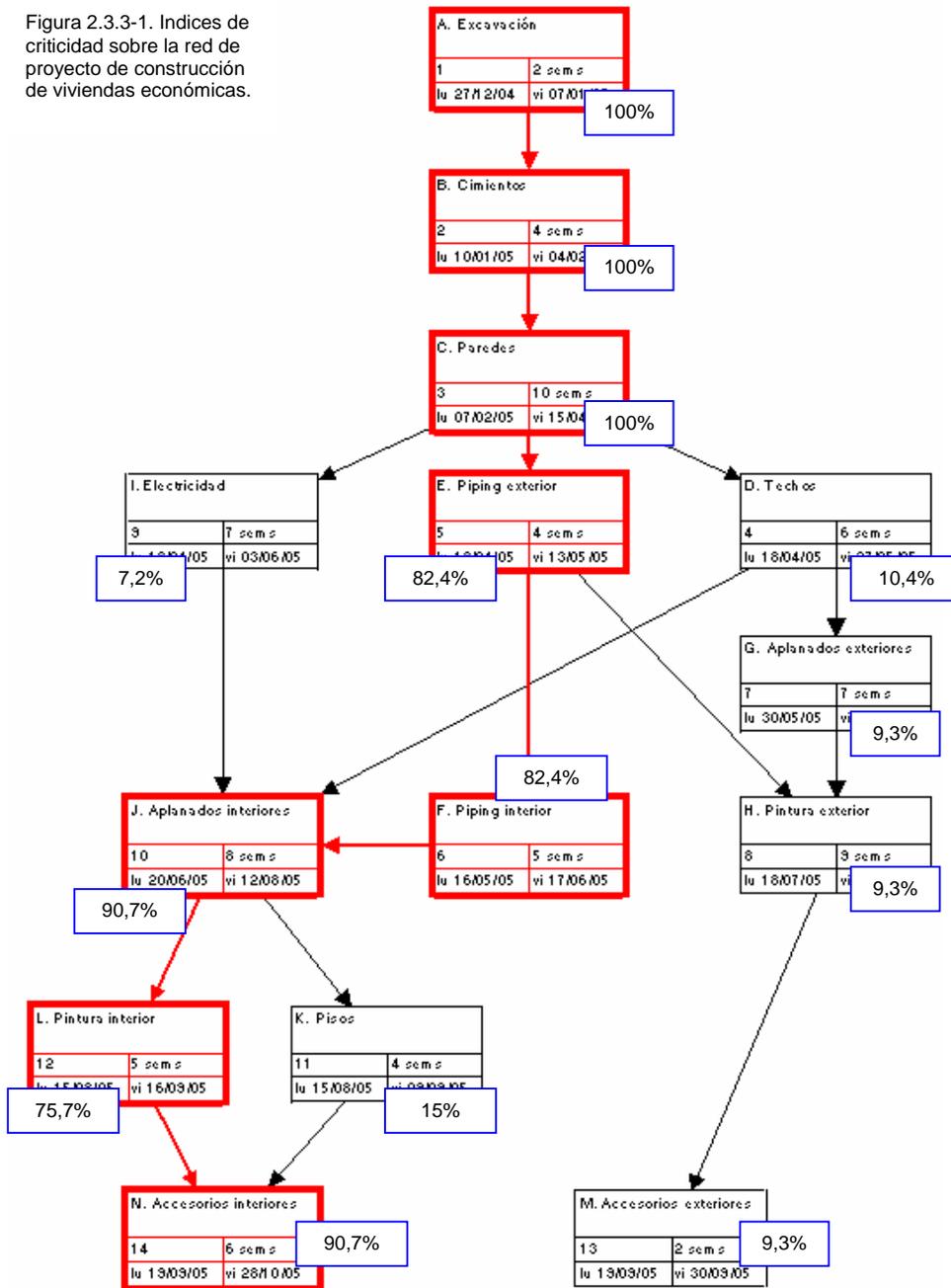
En segundo término, se ha utilizado para establecer un criterio ordinal respecto a la prioridad de las actividades y su influencia sobre la duración total del proyecto. Esto ha resultado de utilidad para identificar actividades sobre las cuáles hacer *crashing* primero. El *crashing*, una técnica que reduce la media esperada para la duración de actividades mediante la asignación de mayores recursos (a expensas de cierto costo), hace valer más su costo cuando impacta sobre actividades con mayor probabilidad de ser críticas.

El *crashing* analiza la relación *reducción de duración de la tarea/incremento de costo para lograrlo* para establecer un orden de prioridades en el mecanismo de reducción de las tareas (normalmente, las críticas) y su reflejo en el tiempo total del proyecto. Mientras mayor sea el índice de criticidad, más probable será

que una reducción en los tiempos de duración de dicha tarea, impacte sobre el resultado final.

En la figura 2.3.3-1 se observa nuevamente la red del proyecto, en donde a un lado de cada actividad se ha incorporado su índice de criticidad.

Figura 2.3.3-1. Índices de criticidad sobre la red de proyecto de construcción de viviendas económicas.



La información que los índices de criticidad presentan es de gran ayuda en la gestión de la red. Desafortunadamente, sólo existen formas precisas de obtenerlas a través de la simulación, lo cuál puede resultar un grave problema para redes muy extensas. Por ello, se presenta en la sección 2.5, una forma alternativa de aproximarse a los índices de criticidad a través de cálculos analíticos de baja complejidad.

El líder del proyecto tiene ahora una representación cuantificada sobre cuáles actividades presentan mayor riesgo de formar el camino crítico. Este criterio empleado por el *Futron Risk Management Center of Excellence* indica sobre que actividades invertir para mitigar riesgos. La instalación eléctrica, en este caso, incluso a pesar de ser una actividad con alto riesgo (tiene un rango de 6 semanas), con un índice de criticidad de sólo 7,5%, debe ser prácticamente ignorada ya que no alcanza al camino crítico, el cual se ve conducido por las actividades de piping.

Si bien este criterio resulta adecuado para comparar caminos en competencia (cómo es el caso de la actividad K contra la actividad L, no resulta apropiado para establecer prioridades en cuanto a *riesgo* entre actividades que no están en competencia por convertirse en el camino crítico. Este argumento demuestra que los índices de criticidad no establecen un criterio ordinal completo (Tabla 2.3.3-1) para la prioridad de las actividades. Es desde este punto de vista, que este índice falla como indicador para la mitigación de riesgos (reducción en la variabilidad de los tiempos de concreción de la tarea).

Actividades	Indice de Criticidad
A	100,0%
B	100,0%
C	100,0%
J	90,7%
N	90,7%
E	82,4%
F	82,4%
L	75,7%
K	15,0%
D	10,4%
G	9,3%
H	9,3%
M	9,3%
I	7,2%

Tabla 2.3.3-1. Actividades del proyecto de viviendas ordenadas por su índice de criticidad.

El orden establecido por el índice de criticidad debe ser aplicado apropiadamente. El indicador resulta excelente para priorizar las actividades de *crashing* y en control o gerenciamiento (permite determinar las actividades *semicríticas*). Sin embargo, el indicador no es tan bueno para ordenar las

tareas con el objetivo de reducir riesgos cuando las actividades no compiten entre sí.

2.3.4. Caminos en competencia (*contending paths*)

A partir del concepto de los índices de criticidad puede extraerse un concepto más *global* en lo que a proyecto se refiere. Este concepto es la probabilidad de un camino de ser crítico, lo cuál permite establecer cuáles serán los caminos predominantes a lo largo del proyecto, pero más importante aún, permite saber si es que existirá algún camino dominante.

La probabilidad de ser crítico se estima a partir de la simulación de la red, evitándose su cálculo analítico, dado su complejidad. El resultado en este caso de la simulación puede observarse en la tabla 2.3.4-1 en dónde se han ordenado los posibles caminos de acuerdo a su probabilidad de ser críticos. Una observación importante en este caso es que el orden (en cuanto a criticidad) de los caminos, no coincide con el orden de la media de duración y el desvío estándar en sentido decreciente. El camino 6 a pesar de tener una duración media baja respecto de otros caminos, se posiciona con casi 10% de probabilidad de ser crítico debido a su elevado desvío estándar (el más alto de todos).

Camino	Actividades en el camino	Media	Desv. Std.	Probabilidad de ser crítico
1	A-B-C-E-F-J-L-N	44	3,0	68,30%
2	A-B-C-E-F-J-K-N	43	2,8	13,80%
6	A-B-C-D-G-H-M	40	3,3	9,60%
3	A-B-C-I-J-L-N	42	2,9	5,70%
4	A-B-C-D-J-L-N	41	2,9	1,20%
5	A-B-C-I-J-K-N	41	2,8	1,20%
7	A-B-C-D-J-K-N	40	2,8	0,20%
8	A-B-C-E-H-M	31	3,1	0,00%

Tabla 2.3.4-1. Criticidad de los caminos en un proyecto de construcción de viviendas públicas.

Se observa que el camino 1 resulta dominante por sobre los demás. Sin embargo, la observación realizada respecto del camino 6 permite razonar acerca de la importancia de las variaciones en los caminos críticos. En este caso el resultado dominante del camino 1 hace que la evolución del proyecto sea relativamente predecible, esto ha sido verificado mediante el buen ajuste de la distribución de probabilidad de duración real con la aproximación simplificada de PERT. Más adelante, la experimentación con una red de proyecto de lanzamiento de un producto lácteo permitirá ahondar más en este concepto.

2.3.5. La contribución a la varianza

Un nuevo indicador adicional a los índices de criticidad, es el porcentaje de contribución a la varianza. La contribución a la varianza describe en que forma la volatilidad (riesgo) de cada tarea influye sobre la variabilidad del resultado final. Es una descripción cuantificada de la sensibilidad en la duración del proyecto respecto de las tareas. Esta sensibilidad, no sólo se debe a la volatilidad propia de cada tarea sino también a su duración en magnitud respecto de la duración total del proyecto y su posición dentro de la red. La contribución a la varianza puede ser vista como un coeficiente de correlación dinámico. El informe resultante de la simulación de Monte Carlo para hallarla puede observarse en la figura 2.3.5-1.

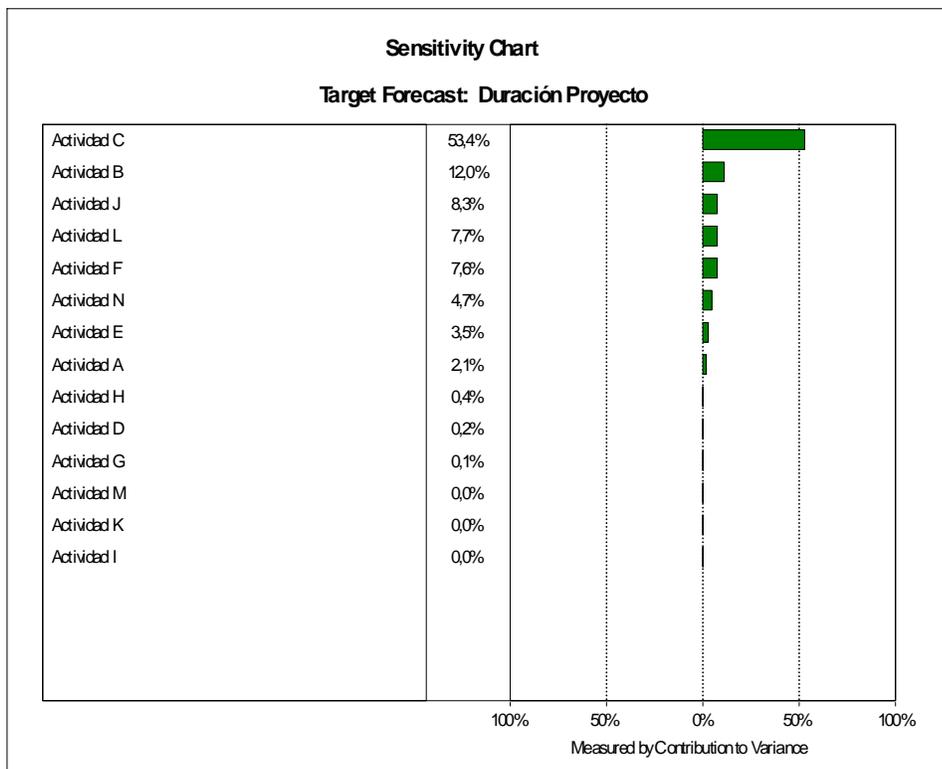


Figura 2.3.5-1. Sensibilidad de la duración del proyecto a la volatilidad de los tiempos de las actividades.

La contribución a la varianza indica actividades de oportunidad / riesgos. Cómo puede observarse en la figura 2.3.5-1, la actividad C impacta en más del 50% de la variabilidad de duración del proyecto. Si la misma pudiera ser gestionada mediante un mejor control, proceso de management o técnicas de mitigación de riesgos, la precisión en la estimación de los resultados podría incrementarse considerablemente y sólo a través de esta única actividad. Más aún, en proyectos de gran envergadura, el enfoque y apalancamiento sobre actividades riesgosas ha permitido a líderes de proyecto de la NASA, mejorar

considerablemente sus ajustes a fechas de lanzamiento de programas espaciales [13]. Este concepto de gestión que prioriza actividades de alto impacto en el riesgo se ha denominado *Gestión de Enfoque* y se profundizará sobre otra red de proyectos de mayor complejidad, para indagar más aún sobre sus ventajas en la sección 4.

2.4. Errores en el cálculo de las holguras y riesgo de inversión

2.4.1. Análisis de holguras reales

Esta sección propone el análisis de los errores en el cálculo de holguras y riesgo de inversión sobre un trabajo inédito de A. Muir desarrollado en el Apéndice II del libro PERT-CPM-ROY del Ing. Figuera Andú [14].

El estudio argumenta una alternativa interesante al análisis por simulación. Aunque desarrollado únicamente como propuesta en el libro de Figuera Andú, el propósito de esta sección es comprobar el ajuste de sus conclusiones, con aquel obtenido por simulación de Monte Carlo y desarrollar los cálculos necesarios.

La holgura de una tarea es el margen del que dispone la misma en cuanto a su duración. Se refiere al retraso que puede tener una actividad sin afectar el desarrollo de otras. Particularmente, se denomina holgura libre al retraso que puede tener una actividad sin afectar el comienzo de una tarea que le sigue. Se denomina holgura total al retraso que puede tener una actividad sin afectar el comienzo de una tarea que pertenece al camino crítico. El cálculo de holguras se realiza en función de los valores medios de duración de las actividades y se presenta para esta red en la tabla 2.4.1-1.

ACTIVIDADES	Holgura libre	Holgura Total
A	0	0
B	0	0
C	0	0
D	0	4
E	0	0
F	0	0
G	0	4
H	0	4
I	2	2
J	0	0
K	1	1
L	0	0
M	4	4
N	0	0

Tabla 2.4.1-1. Holguras libres y totales para las actividades del proyecto de construcción de viviendas públicas.

Si bien estos valores ayudan a describir mejor el comportamiento de la red, la holgura real será distinta a la calculada, ya que la duración de las actividades no son determinísticas. Si la diferencia entre los tiempos probables calculados mediante el PERT es pequeña, comparada con su desviación típica, puede haber bastante error y puede incluso producirse una inversión, es decir que la rama con tiempo probable de terminación mayor se termine antes que la de tiempo probable menor. Esto se comprende mejor a través de la figura 2.4.1-1, extraída del libro de Figuera Andú.

El concepto de inversión, si bien no resulta ser el mismo que los índices de criticidad, aportan información similar. La probabilidad de inversión corresponde a la probabilidad que una rama prevista como crítica, no lo sea en realidad. Mientras más alta sea esta probabilidad, menos dominancia tendrá ese tramo del camino crítico y por lo tanto el camino alternativo resulta más competitivo.

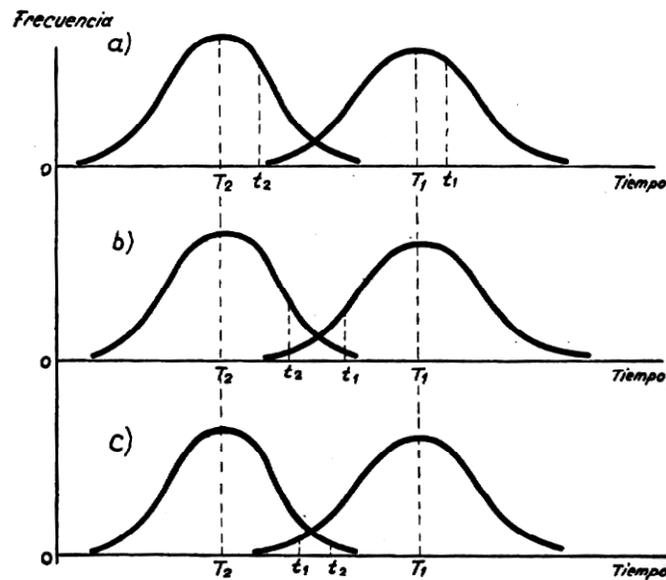


Figura 2.4.1-1. Superposición en distribuciones de probabilidad de duración de ramas con probabilidades de inversión. [14]

Sean T_1 y T_2 los tiempos probables de terminación de las dos ramas 1 y 2, con distribuciones de tiempo indicadas por la figura 2.4.1-1. Podría darse el caso de que los tiempos reales de terminación hubieran sido los indicados por t_1 y t_2 de la figura b) o los de la figura c). Si hubiera ocurrido c), habría terminado la rama 1 antes que la 2. Un líder de proyecto, con sus esfuerzos de gestión de control enfocados sobre la rama 1 (por ser crítica a causa de su mayor duración media) comete un error al desestimar la rama 2. Sin embargo tampoco puede enfocarse en todas y cada una de las ramas. Para evaluar sobre que rama enfocarse, basta estimar la probabilidad de inversión:

$$P[t_2 > t_1] = P[(t_2 - t_1) > 0] \quad (9)$$

Es decir que la probabilidad de inversión es igual a la probabilidad de tener una holgura real menor a cero. Figuera Andú sugiere que si esta probabilidad fuera mayor que 0,05, el camino que la forma debería incluirse en el nivel de atención o enfoque del camino crítico. Sin embargo, al final de esta sección se justificará porque este valor resulta incompleto al determinar si una rama debe ser considerada o no tan crítica como la establecida a partir de las duraciones medias.

Si se suponen normales e independientes las distribuciones t_1 y t_2 con medias μ_1 y μ_2 y desviaciones típicas σ_1 y σ_2 , respectivamente, la diferencia $t_1 - t_2$ tendría distribución normal de media

$$\mu = \mu_1 - \mu_2 \quad (10)$$

y desviación típica

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (11)$$

La estadística inferencial asume distribuciones normales en este caso. Sin embargo, el estadístico David Lane [15] argumenta que los test estadísticos con estos supuestos funcionan bien incluso cuando el supuesto de normalidad para las distribuciones de T_1 y T_2 es violado, como suele ser el caso cuando las actividades poseen duración con distribuciones de probabilidad beta. Aún así, desviaciones extremas pueden distorsionar los resultados obtenidos. Existe una colección de test, pertenecientes a lo que se conocen como *tests no paramétricos* que no realizan supuestos sobre la distribución de probabilidad de las muestras.

En este caso, se verifica que el supuesto de normalidad para la diferencia entre distribuciones no genera grandes distorsiones. Esto en general se debe a que las ramas en competencia poseen más de una actividad, tendiendo su duración a una muestra normalizada por el teorema central del límite y, además, las distribuciones de duración de las actividades no poseen grandes sesgos.

En primer lugar se evalúan las ramas en competencia predecesoras a la actividad H (Figura 2.4.1-2). La rama 1 (R1) está formada por la actividad D y G y la rama 2 por la actividad E (R2). Nótese que los caminos a comparar deben partir de algún instante en común, en este caso, la finalización de la actividad C.

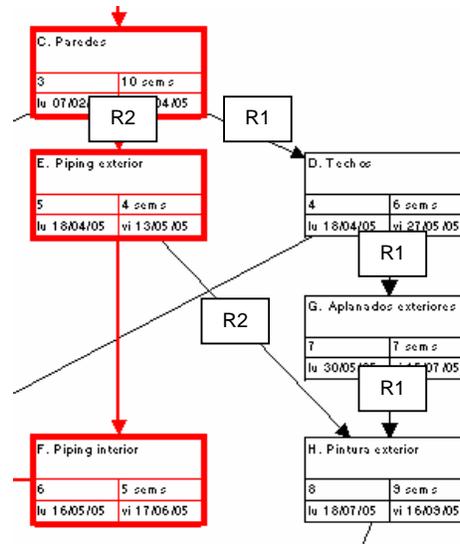


Figura 2.4.1-2. Ramas de tareas predecesoras a la actividad H.

Las duraciones de cada una de las ramas se han simulado como se observa en la figura 2.4.1-3. En la misma puede apreciarse que las distribuciones de probabilidad de duración para cada una de las actividades no se superponen por lo que no amerita un análisis más profundo de su diferencia. En este caso, no hay riesgo de inversión.

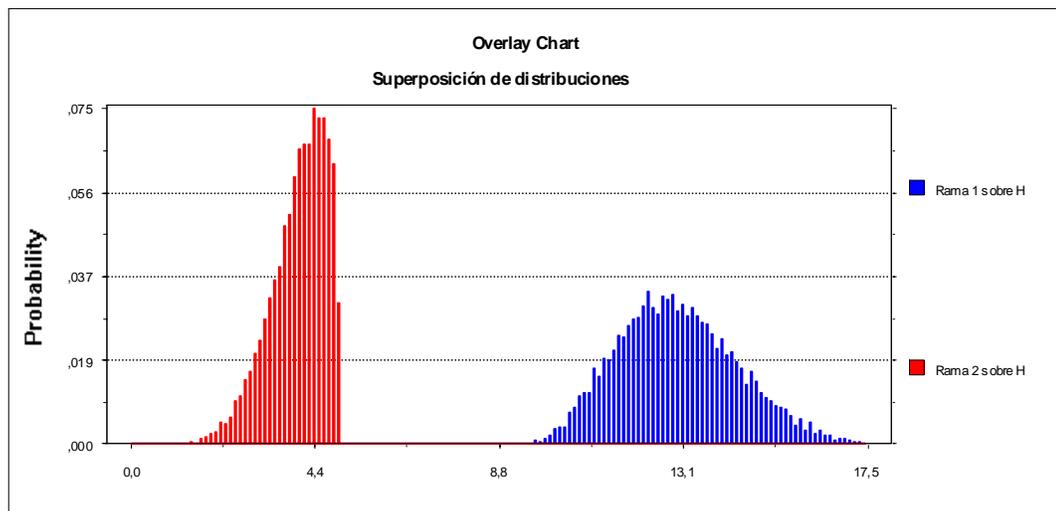


Figura 2.4.1-3. Duración simulada de ramas en competencia predecesoras a la actividad H.

En segundo término se evalúan las ramas en competencia predecesoras a la actividad J (Figura 2.4.1-4). La rama 1 (R1) formada por la actividad I, la rama 2 (R2) formada por las actividades E y F, y la rama 3 formada por la actividad D. En este caso, una inversión de caminos implicaría un cambio imprevisto en la ruta crítica, resultando el análisis de estas tres ramas, de mayor interés que en el caso anterior.

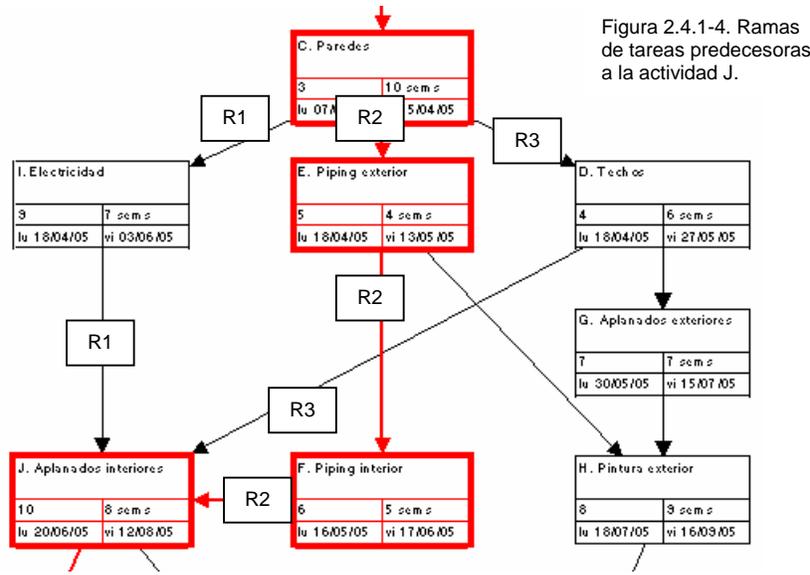


Figura 2.4.1-4. Ramas de tareas predecesoras a la actividad J.

El caso de este ejemplo propone tres ramas en competencia. El análisis consistirá en la comparación entre pares de las mismas para luego calcular la probabilidad de inversión de la rama 2 contra la rama 1 y la rama 3.

La Figura 2.4.1-5 muestra la distribución de probabilidad de cada una de las tres ramas, apreciándose una considerable superposición entre ellas. En la figura 2.4.1-6, 2.4.1-7 y 2.4.1-8 se observa la resultante de la simulación de diferencia entre la duración de los caminos.

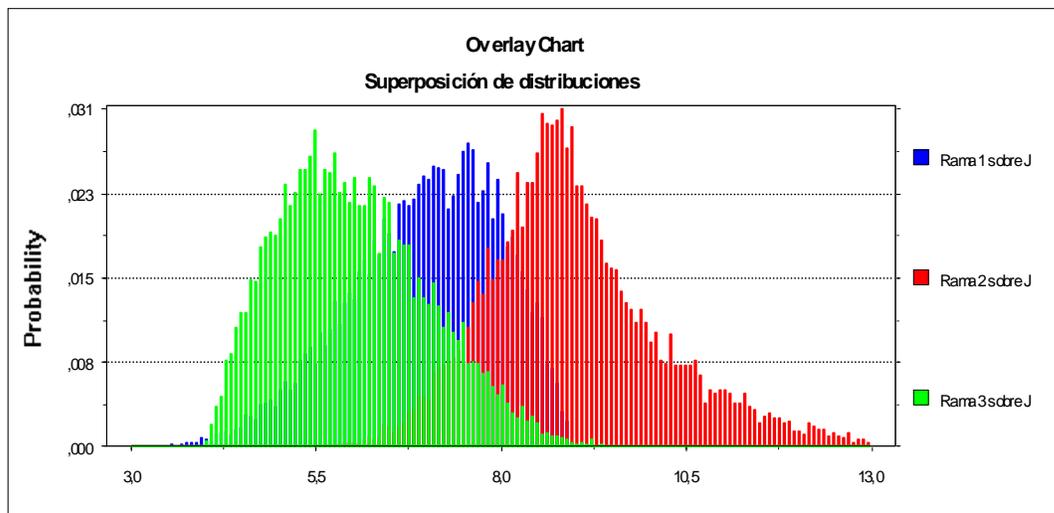


Figura 2.4.1-5. Duración simulada de ramas en competencia predecesoras a la actividad J.

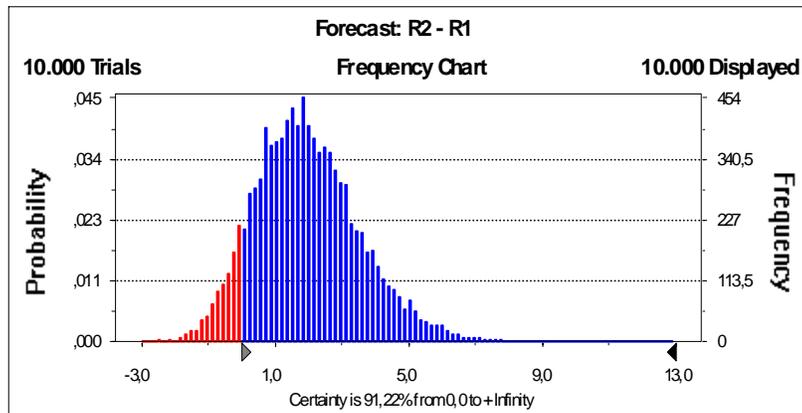


Figura 2.4.1-6. Distribución de probabilidad simulada para la diferencia entre las ramas 1 y 2, predecesoras a la actividad J. La zona señalada con rojo representa la probabilidad de una diferencia menor que cero y por lo tanto, igual a la *probabilidad de inversión entre estas dos ramas*: 8,78%.

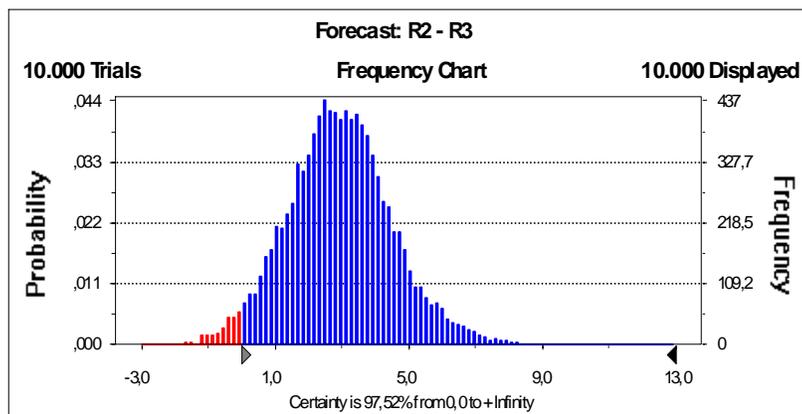


Figura 2.4.1-7. Distribución de probabilidad simulada para la diferencia entre las ramas 2 y 3, predecesoras a la actividad J. La zona señalada con rojo representa la probabilidad de una diferencia menor que cero y por lo tanto, igual a la *probabilidad de inversión entre estas dos ramas*: 2,48%.

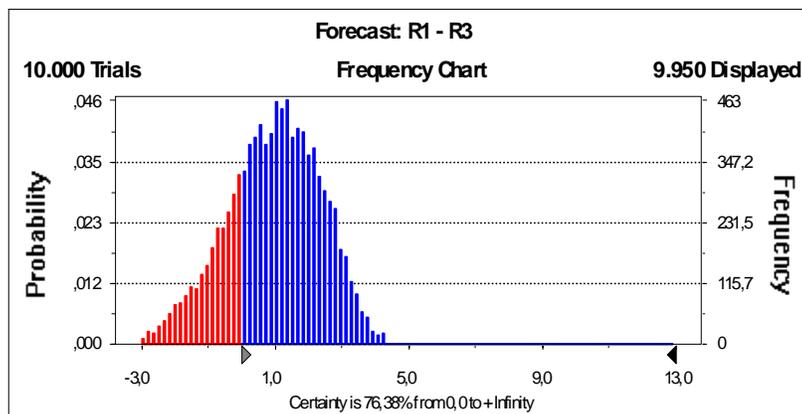


Figura 2.4.1-8. Distribución de probabilidad simulada para la diferencia entre las ramas 1 y 3, predecesoras a la actividad J. La zona señalada con rojo representa la probabilidad de una diferencia menor que cero y por lo tanto, igual a la *probabilidad de inversión entre estas dos ramas*: 33,62%.

La zona señalada con rojo en las figuras 2.4.1-6, 2.4.1-7 y 2.4.1-8 representa la probabilidad de obtener una diferencia menor a cero. En este caso, para obtener la probabilidad de que una determinada rama resulte crítica, debe ejecutarse un paso adicional.

En primer lugar, se aproxima mediante una distribución Normal, las tres diferencias de duraciones simuladas. Para la diferencia entre las ramas 1 y 2, aplicando las expresiones (10) y (11), con los datos de la tabla 2.2.1, se obtiene

$$\mu = (4+5) - 7 = 2$$

$$\sigma = \sqrt{(0,44+1)+1} = 1,56$$

y por lo tanto, la probabilidad aproximada de inversión entre ramas aproximada es

$$P[X \geq 0/X \approx N(\mu = 2; \sigma = 1,56)] = 10\% \text{ (Valor simulado 8,78\%)}$$

Para la diferencia entre las ramas 2 y 3, se obtiene

$$\mu = (4+5) - 6 = 3$$

$$\sigma = \sqrt{(0,44+1)+1} = 1,56$$

y la probabilidad de inversión aproximada entre las ramas 2 y 3 resulta

$$P[X \geq 0/X \approx N(\mu = 3; \sigma = 1,56)] = 2,8\% \text{ (Valor simulado 2,48\%)}$$

Las probabilidades de que las ramas 1 o 3 resulten críticas no están completa s aún, debido a que las anteriores sólo contemplan cada rama contra la rama 2. Para conocer la probabilidad de criticidad de caminos *hacia la rama 1* o *hacia la rama 3* es necesario contemplar cuando la rama 1 es mayor que la 3 y viceversa. Aplicando la aproximación Normal a la diferencia entre las ramas 1 y 3, se obtiene

$$\mu = 7 - 6 = 1$$

$$\sigma = \sqrt{1+1} = 1,41$$

$$P[X \geq 0/X \approx N(\mu = 1; \sigma = 1,41)] = 24\% \text{ (Valor simulado 33,62\%)}$$

Incurriéndose en este último caso en un mayor error de aproximación, debido a que se compara dos ramas con una única tarea (por lo cuál su distribución es menos cercana a una Normal).

Para que ocurra una inversión *hacia la rama 1* (es decir, que la rama 1 sea la condicionante en el comienzo de la actividad J), no sólo debe ocurrir una inversión entre la rama 1 y la rama 2, sino que además la rama 1 debe superar en duración a la rama 3. Para que ocurra una inversión hacia la rama 3 (que la rama 3 condicione el comienzo de la actividad J) sucede algo análogo. Dado que los caminos son independientes, la probabilidad conjunta de los sucesos se obtiene a partir del producto de la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos, por lo tanto

$$P[\text{Inversión hacia la rama 1}] = 0,10 \cdot (1 - 0,24) = 0,076 \quad (7,6\%)$$

$$P[\text{Inversión hacia la rama 3}] = 0,028 \cdot 0,24 = 0,00672 \quad (0,67\%)$$

Esto da como resultado, incorporar al conjunto de tareas bajo el foco de control a la actividad I como posible precedente de la actividad J, pero no así a la actividad D. Esta conclusión escapa al análisis de los índices de criticidad, cuyo significado no debe ser confundido con las probabilidades de inversión.

Otros caminos en competencia más reducidos los componen las actividades L (R2) y K (R1) presentados en la figura 2.4.1-9. Al igual que en el caso anterior, una inversión de caminos implicaría un cambio imprevisto en la ruta crítica. La distribución de probabilidad para las duraciones de las actividades y su diferencia (holgura real) se presentan respectivamente en las figuras 2.4.1-10 y 2.4.1-11.

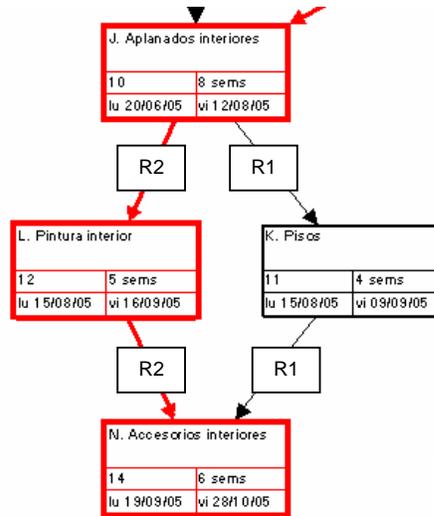


Figura 2.4.1-9. Ramas de tareas predecesoras a la actividad N.

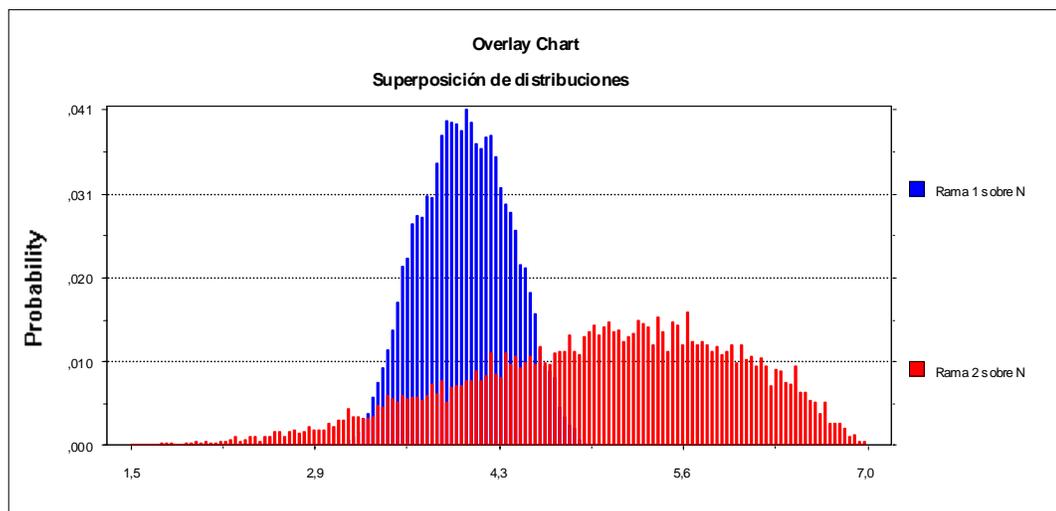


Figura 2.4.1-10. Duración simulada de actividades en competencia predecesoras a la actividad N.

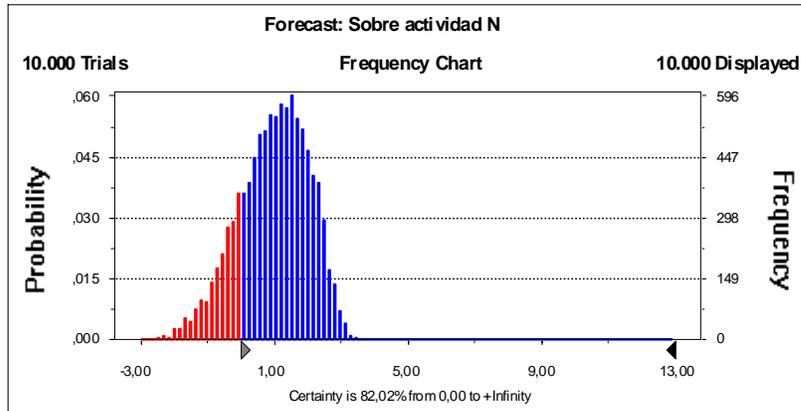


Figura 2.4.1-11. Distribución de probabilidad simulada para la holgura real entre las ramas predecesoras a la actividad N. La zona señalada con rojo representa la probabilidad de una holgura real menor que cero y por lo tanto, iguala a la probabilidad de inversión: 17,98%.

En este caso, como ya puede deducirse de la figura 2.4.1-10, el solape completo de distribuciones de probabilidad entre las duraciones de la rama 1 y la rama 2, permite anticipar mayores riesgos de inversión. La probabilidad de que la holgura real entre caminos sea menor a cero (probabilidad de inversión) es en este caso 17,98%. Esto indicaría que con alta frecuencia, la actividad K durará más que la L a pesar de estimarse lo contrario a través de sus valores de duración esperados.

La aproximación Normal a la curva presentada en la figura 2.4.1-11, surge aplicando la fórmula (10) y (11), con los datos de la tabla 2.2-1.

$$\mu = 5 - 4 = 1$$

$$\sigma = \sqrt{0,11 + 1} = 1,06$$

En la figura 2.4.1-12 se comprueba el ajuste de la curva Normal a la distribución de probabilidad de holgura real. El test de Kolmogrov-Smirnov asegura el buen ajuste de la aproximación con 95% de nivel de significación

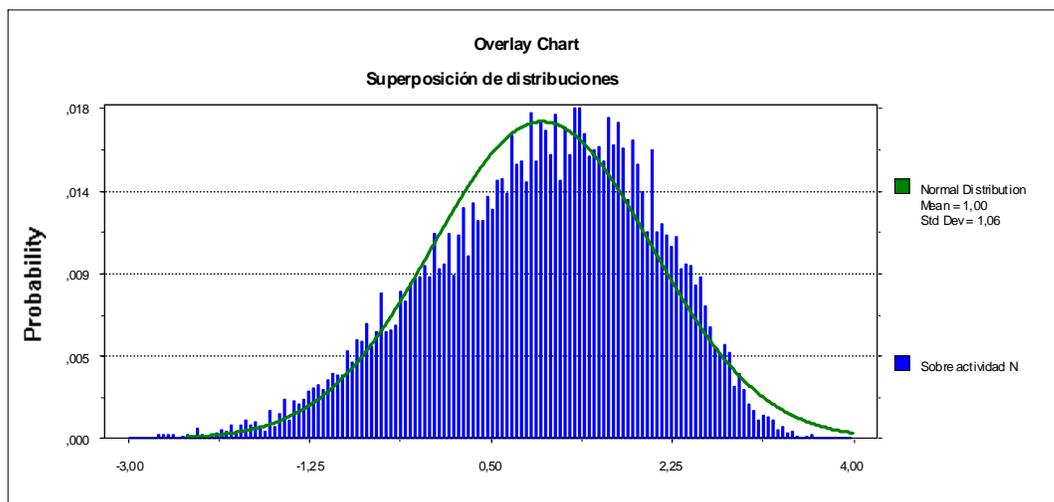


Figura 2.4.1-12. Ajuste de la aproximación Normal a la distribución de probabilidad de holgura real sobre la actividad

El uso de la aproximación Normal propone una probabilidad de inversión de 17,1%. Si bien en este caso se extraen las mismas conclusiones que de la simulación, es un tanto arriesgado, desde el punto de vista estadístico, formular conclusiones a partir de la comparación entre dos ramas con una sola actividad (cuyas duraciones son menos cercanas a la Normal). En particular este caso se ve favorecido en su aproximación debido a la ínfima dispersión de una actividad respecto a la otra, dado que con una tarea por rama con sólo una semana de holgura, es de esperarse una inversión mucho mayor.

Por último, existe la posibilidad de evaluar los errores en holgura y probabilidades de inversión sobre los caminos precedentes al final del proyecto. En el caso de esta red, esto es más sutil dado que no existe una actividad común para finalizar el proyecto, sino que el mismo se da por completado cuando la última entre las actividades M o N hayan sido finalizadas. Generalmente este inconveniente se ve superado mediante la creación de una actividad *dummy* de duración cero sobre el final del proyecto. La creación de dicha actividad debe realizarse formalmente para resolver la red en caso de aplicar el algoritmo de Ford.

Adicionalmente, este caso presenta otra dificultad. Al no existir dos caminos separados e independientes que partan desde una actividad en común y finalicen sobre el fin del proyecto se complica la identificación de las ramas. Para ello, se ha simulado la situación real con los potenciales caminos a presentarse y llevándolos hasta la actividad en común de partida, la tarea C. De tal forma, se asignan las ramas 1 y la rama 2 como se observa en la figura 2.4.1-13. En cada muestreo de la simulación, sólo se toma en cuenta la más larga de cada una de las ramas y se las compara. Las duraciones simuladas para cada rama se presentan en la figura 2.4.1-14.

La complejidad que estas ramas en competencia presentan se traslada a la simplificación propuesta por Figuera Andú, en la cuál sólo eran consideradas ramas claramente delimitadas e independientes (sin actividades en común). En este caso no es tan grave, dado que se tiene sólo una actividad en común. Adicionalmente se omite la incidencia de la actividad D en la rama 2 debido a su bajo riesgo de inversión sobre la actividad J. Aplicando la aproximación PERT a las ramas en competencia se supera esta dificultad, logrando un resultado satisfactorio.

Figura 2.4.1-13. Ramas de tareas predecesoras a la finalización del

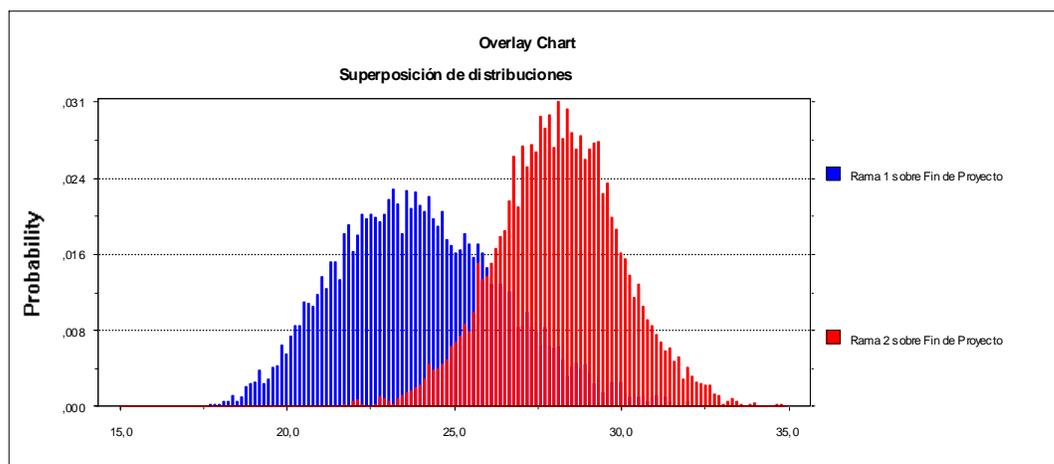
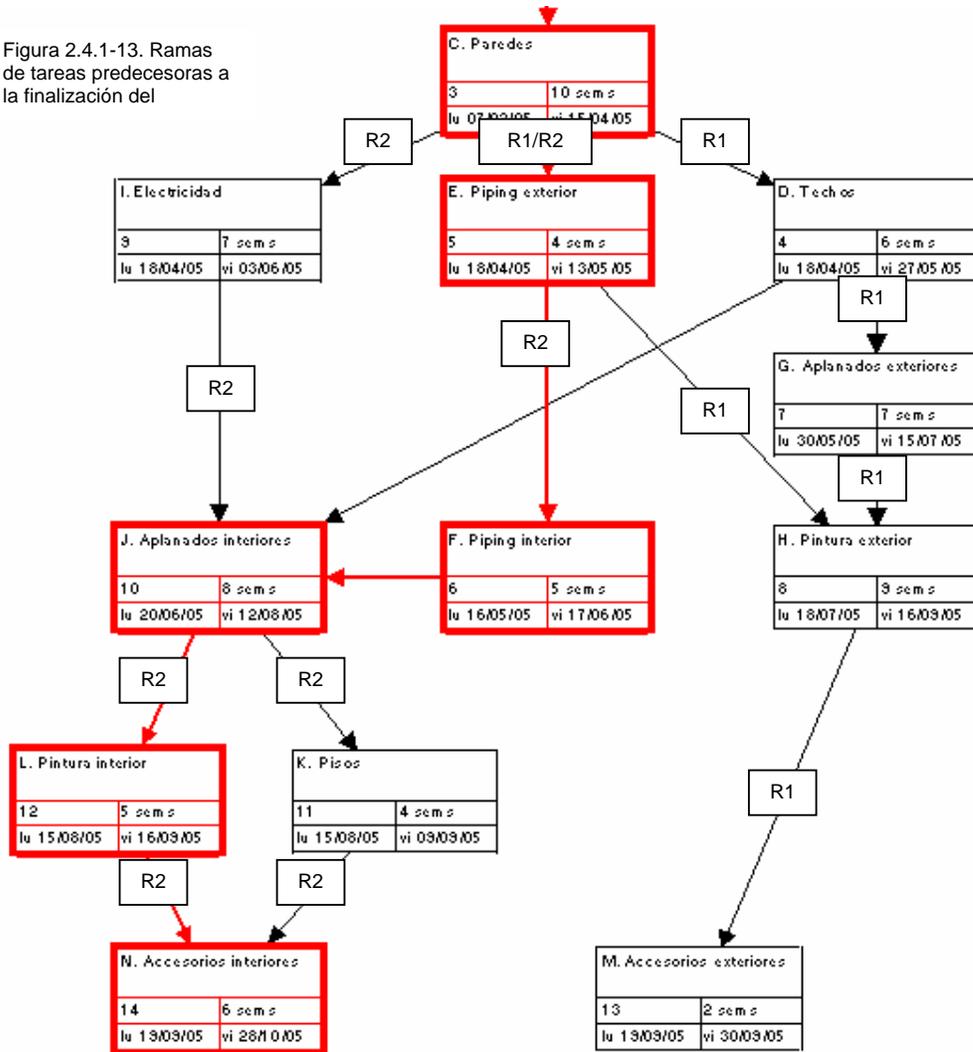


Figura 2.4.1-14. Duración simulada de actividades en competencia predecesoras al fin del proyecto.

El resultado de la simulación se presenta en la figura 2.4.1-15. Una característica notoria del gráfico obtenido es su dispersión. Esta se debe claramente a la cantidad de tareas que incorpora en su análisis, obteniéndose un rango más amplio en el cuál puede ubicarse la holgura real entre ramas. La probabilidad de que la holgura real entre caminos sea menor a cero (probabilidad de inversión) es en este caso 8,94%.

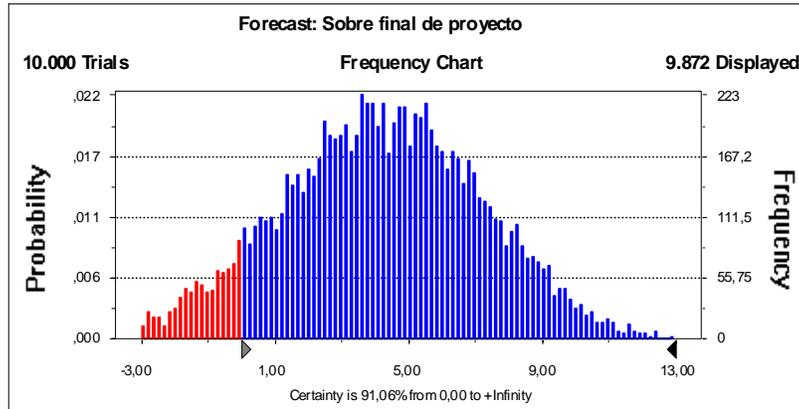


Figura 2.4.1-15. Distribución de probabilidad simulada para la holgura real entre las ramas predecesoras al fin del proyecto. La zona señalada con rojo representa la probabilidad de una holgura real menor que cero y por lo tanto, iguala a la probabilidad de inversión: 8,94%.

El ajuste de la aproximación Normal no se aplica con tanta facilidad como en los casos anteriores. En su lugar se recurre a las aproximaciones simplificadas de PERT y se asume que para cada variante de la rama 1 y la rama 2 sólo ocurrirán aquellas de mayor duración media. Por lo tanto, para la rama 1, se consideran las medias y las varianzas de las actividades D, G, H y M, mientras que para la rama 2, aquellas de las tareas E, F, J, L y N. Aplicando la fórmula (10) y (11), con los datos de la tabla 2.2-1 se obtienen

$$\mu = (4+5+8+5+6) - (6+7+9+2) = 4$$

$$\sigma = \sqrt{(1+1+4+0,11) + (0,44+1+1+1+0,44)} = 3,16$$

En la figura 2.4.1-16 se comprueba el ajuste de la curva Normal a la distribución de probabilidad de holgura real. El ajuste no es el mejor que pueda lograrse, ya que la curva Normal que mejor ajusta, posee una media de 4,13 semanas y un desvío estándar de 3,08 semanas. Al hacer uso parcial de las aproximaciones simplificadas, se reduce la calidad del ajuste, estimando una media de 4 semanas y desvío estándar de 3,16 semanas. Sin embargo, el ajuste no es malo. La probabilidad de inversión calculada mediante la aproximación Normal es de 10,3 %. El test de Kolmogrov-Smirnov garantiza la distribución de tiempos para la holgura real a partir de esta aproximación con un nivel de significación superior al 90%.

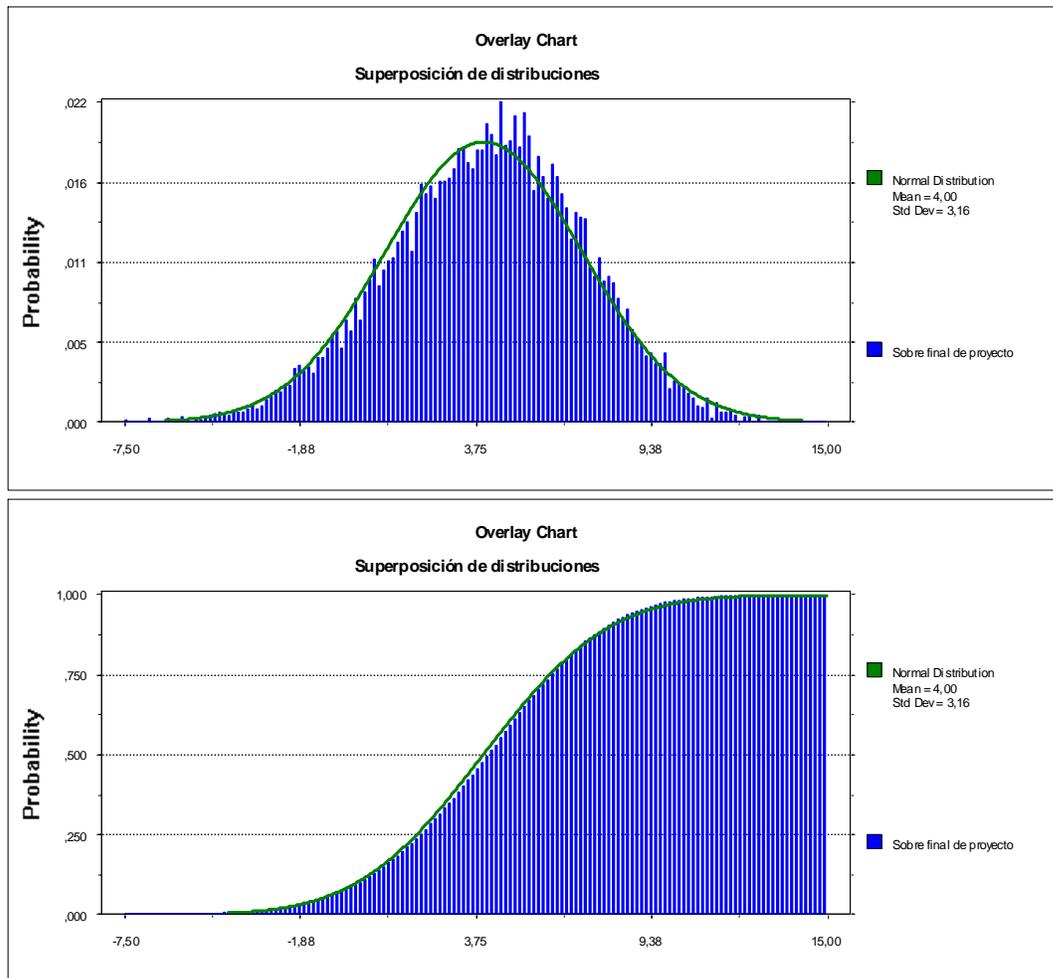


Figura 2.4.1-15. Ajuste de la aproximación Normal a la distribución de probabilidad y densidad de probabilidad de holgura real sobre el fin del proyecto.

2.4.2. Impacto de inversión de caminos sobre retrasos en el proyecto

Una vez analizadas las holguras reales mediante este método, corresponde su clasificación para incorporar nuevas ramas al enfoque de control y no perder la atención sobre conjuntos de actividades que puedan tornarse críticos. Figuera Andú sugiere que si la probabilidad de inversión fuera mayor que 0,05 (5%), el camino que la forma debería incluirse en el concepto de relevancia similar al camino crítico. Sin embargo, este concepto puede resultar incompleto.

En primer lugar debe definirse que es lo que se espera de este indicador. Puede buscarse que el mismo sea un indicador de atención para anticiparse a las inversiones de ramas y lograr una mejor articulación de las actividades a comenzar con las actividades precedentes. En este sentido, el índice de inversión proporciona información suficiente tanto para aprovechar

finalizaciones tempranas como para anticiparse a inversiones indeseadas, la probabilidad sugerida por Figuera Andú resulta apropiada para este fin.

Por otra parte, el índice de inversión puede emplearse para poner actividades en el nivel de atención o enfoque de camino crítico. En este sentido, las inversiones entre ramas en competencia no siempre implican un retraso en la fecha programada de finalización de proyecto, hecho que motiva el seguimiento y control en el desarrollo de un proyecto.

Analizando las actividades en competencia L y K, precedentes de la actividad N (Figura 2.4.1-8), la probabilidad de inversión es de aproximadamente 18%, con lo cuál se hubiera deseado incluir la actividad K entre las críticas. Sin embargo, de acuerdo a la tabla 2.2-1, la máxima duración que puede tomar la actividad K es de 5 semanas, que es la duración media de la actividad L. Esto implica que si ocurre la inversión, en el peor de los casos, no se supera el valor medio previsto para la actividad L. Este hecho sugiere que si bien las probabilidades de inversión (en este caso) proporcionan un indicador de atención para aprovechar duraciones cortas de la actividad L, no manifiestan ninguna posibilidad de atraso en la ejecución del proyecto.

En el caso de las actividades en competencia precedentes a la actividad J (Figura 2.4.1-4), ocurre algo similar. La máxima duración de la rama 1 (actividad I) es igual a la duración media de la rama 2 (actividades E y F), con lo cuál la inversión de tareas no representa un riesgo de retraso. La rama 1, a pesar de tener una probabilidad de inversión 8,43%, no debería considerarse crítica por no representar un riesgo de retraso en el proyecto, pero sí para aprovechar el eventual adelantamiento de las tareas E y F.

Los caminos en competencia precedentes a la finalización del proyecto presentan un caso diferente para el análisis. En este caso, la rama 1 podría durar 41 semanas (máximas duraciones de las actividades D, G, H y M sumadas) cuando la media de la rama 2 es de sólo 28 semanas. Para analizar el impacto de la inversión sobre un posible retraso en el proyecto, debe estudiarse cual es la probabilidad de obtener una duración superior a 28 semanas para la rama 1.

El cálculo de la probabilidad de inversión con retraso recurre a una aproximación Normal en la duración de la rama 1. Aplicando las simplificaciones aproximadas de PERT, descritas en la sección 1.3.2, se obtiene una duración para R1 con distribución Normal, valor medio 24 semanas y desvío estándar 2,47 semanas. La probabilidad de que esta rama supere las 28 semanas, es de 5,28% utilizando la solución aproximada. La figura 2.4.2-1

presenta el resultado obtenido por simulación para la rama 1, con 6,4% de probabilidad de superar las 28 semanas de duración, es decir, retrasar el proyecto.

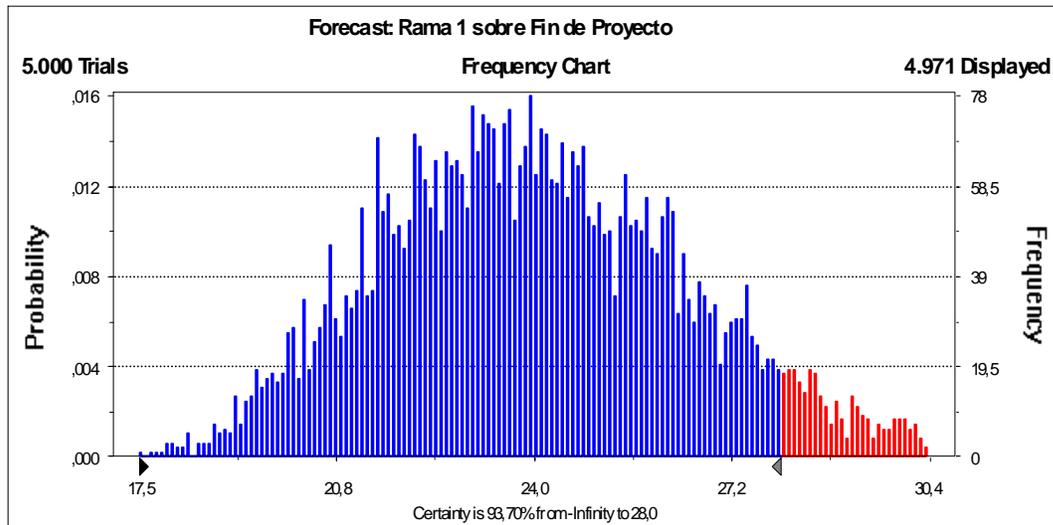


Figura 2.4.2-1. Duración simulada para la rama 1 precedente a la finalización de proyecto. La zona marcada con rojo indica la probabilidad de superar una duración de 28 semanas, duración media de la rama 2.

Sin embargo, 5,28% (0,0528) no es la probabilidad de que la rama 1 (exclusivamente) retrase el proyecto, ya que además de durar más de 28 semanas, la rama 2 deberá durar 28 o menos semanas para que el retraso se deba a la rama 1. Siendo 28 semanas la duración de la suma de medias en la rama dominante 2, se asume que su probabilidad acumulada de durar 28 o menos semanas es del 50% (probabilidad igual a $0,5^2$). Tomando como cierto el supuesto de ramas independientes, la probabilidad de ocurrencia simultánea de ambos sucesos, será su producto.

Como resultado, se obtiene que los retrasos en la duración del proyecto respecto de su media esperada, sean efecto de la inversión de la rama 1 con la rama 2 con una probabilidad de sólo 2,64%, por lo que esta rama no amerita un control adicional (como deben llevar las actividades críticas). Este concepto respecto a la probabilidad de inversión y la probabilidad de retraso puede observarse en la figura 2.4.2-2.

La Probabilidad de inversión de la rama 1, caso en que la misma condiciona la finalización del proyecto es 8,43%. Esta probabilidad puede ser utilizada tanto para aprovechar eventuales adelantamientos de la rama 2 como para estar atento a extensas duraciones de la rama 1. En cambio, la probabilidad de

² Esta probabilidad se estima en base a la aproximación PERT, mediante la cuál, la distribución de probabilidad de la rama 2 será Normal y por lo tanto su mediana (probabilidad acumulada 50%) será igual a su media.

inversión con retraso, caso en que la rama 2 no sólo condiciona la finalización del proyecto sino que además retrasa el mismo por sobre la duración esperada para la rama 2, que es la crítica. Esta probabilidad de 2,64% es un indicador más apropiado para decidir si establecer o no, controles al nivel de las actividades críticas para esta rama.

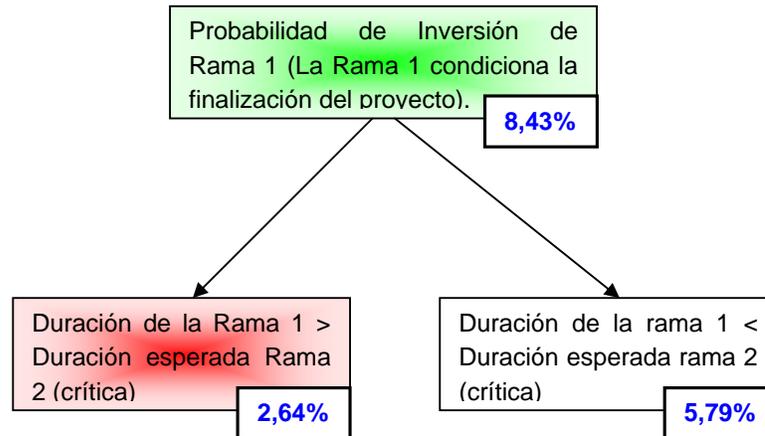


Figura 2.4.2-2. Diferencia entre probabilidad de inversión simple y probabilidad de inversión con retraso sobre valor esperado.

El análisis de impacto de inversión sobre retrasos en el proyecto presenta una mejor información sobre la criticidad de las tareas que los índices críticos. Esto se debe a que no sólo magnifica la probabilidad de convertirse en el camino crítico, sino que además considera que dicha inversión en la criticidad ocasione un retraso respecto de la duración media.

2.5. Una aproximación analítica a los índices de criticidad

Considérese nuevamente a todos los caminos posibles desde el inicio hasta el final de proyecto. En la tabla 2.3.4-1 (Que aquí se expone nuevamente) se presentan los valores medios, desvíos estándar y probabilidades de convertirse en críticos para los caminos)porcentaje de veces que resultó crítico ese camino=, según surge de la simulación.

Camino	Actividades en el camino	Media	Desv. Std.	Probabilidad de ser crítico
1	A-B-C-E-F-J-L-N	44	3,0	68,30%
2	A-B-C-E-F-J-K-N	43	2,8	13,80%
6	A-B-C-D-G-H-M	40	3,3	9,60%
3	A-B-C-I-J-L-N	42	2,9	5,70%
4	A-B-C-D-J-L-N	41	2,9	1,20%
5	A-B-C-I-J-K-N	41	2,8	1,20%
7	A-B-C-D-J-K-N	40	2,8	0,20%
8	A-B-C-E-H-M	31	3,1	0,00%

Tabla 2.3.4-1. Criticidad de los caminos en un proyecto de construcción de viviendas públicas.

La suma de probabilidad de todos los caminos es del 100%. Si se toma una tarea cualquiera, sumando las probabilidades de ser críticos de cada camino que la contiene, se obtiene el índice de criticidad de dicha tarea. A través de este criterio, se propone a continuación, una aproximación a las probabilidades de los caminos para convertirse en críticos y luego a través de ellos, la obtención de los índices de criticidad de las tareas.

Cuando la duración real de un camino supera a la duración de otro es efecto de las actividades que los diferencian. En el caso de dos caminos que se diferencian en una única actividad (por ejemplo, los caminos 1 y 2), son las duraciones medias y los desvíos estándar de esas actividades que los diferencian, las que determinan cual es el camino más largo.

Aplicando el criterio de probabilidades de inversión y errores en los cálculos de holguras para los caminos completos de inicio a fin, es posible aproximar la diferencia entre ellos mediante una distribución Normal. Las expresiones (12) y (13) estiman la media y el desvío estándar de dicha distribución

$$\mu_{ij} = \mu_i - \mu_j \quad (12)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{k \in (i \cap j)} \sigma_k^2} \quad (13)$$

En donde las medias μ_i y μ_j son las duraciones medias de los caminos que se comparan y la varianza es la suma de las varianzas de las actividades que los caminos i y j no tienen en común.

Mediante esta distribución Normal y haciendo comparación de dos caminos, se estima la probabilidad de los caminos para superar al camino crítico inicial (camino 1). La tabla 2.5 presenta dicha información. En la misma se ha omitido el camino 8 por su excesivamente baja probabilidad para superar al camino 1.

Camino	μ	σ	Probabilidad de superar al CC
1			
2	1,00	1,05	17,1%
3	2,00	1,56	10,0%
4	3,00	1,56	2,8%
5	3,00	1,89	5,6%
6	4,00	3,16	10,3%
7	4,00	2,13	3,0%

Tabla 2.5-1. Probabilidad de los caminos en competencia de superar al camino 1.

Las probabilidades expresadas en la tabla 2.5-1 sólo comparan cada camino contra el camino 1. Sin embargo, no contempla las correlaciones (dependencias, en el sentido en que los caminos posean las mismas

actividades) entre caminos. Por lo tanto, se propone una simplificación para considerar correlaciones entre los otros caminos.

La propuesta consiste en considerar, adicionalmente a la probabilidad para superar el camino 1, la probabilidad de superar aquellos caminos suficientemente independientes del 1. Para ello, deben considerarse las correlaciones entre actividades.

Para estimar cuantitativamente si un camino en competencia es independiente de otro se recurre al coeficiente de correlación entre caminos. El coeficiente de correlación entre dos caminos, i y j que comparten actividades puede ser hallado mediante

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{k \in (i \cap j)} \sigma_k^2}{\sigma_i \cdot \sigma_j} \quad (14)$$

El numerador en esta expresión es la suma de las varianzas de las actividades k que pertenecen tanto al camino i como al camino j . El denominador es el producto de los desvíos estándar de los caminos i y j . Si el coeficiente de correlación entre actividades es menor que 0,7, entonces se considera que los caminos son suficientemente independientes.

La idea de la aproximación es comparar un camino contra el camino crítico (como se realizó en la Tabla 2.5-1) pero también, con todos aquellos que sean lo suficientemente independientes de este. En la tabla 2.5-2 se presentan los coeficientes de correlación entre caminos para la red.

	1	2	3	4	5	6	7
1	1,00						
2	0,94	1,00					
3	0,86	0,79	1,00				
4	0,86	0,75	0,88	1,00			
5	0,79	0,85	0,81	0,93	1,00		
6	0,51	0,51	0,62	0,52	0,55	1,00	
7	0,79	0,85	0,93	0,81	0,87	0,66	1,00

Tabla 2.5-2. Matriz de coeficientes de correlación entre caminos.

La tabla 2.5-2 permite concluir que el único camino suficientemente independiente con el camino 1, es el camino 6 compuesto por las actividades A, B, C, D, G, H, M.

La idea de la aproximación es comparar un camino contra el camino crítico (como se realizó en la Tabla 2.5-1) pero también, con todos aquellos que sean lo suficientemente independientes de este. Por lo tanto, debe calcularse la

probabilidad de superar en duración al camino 6 para los caminos restantes (exceptuando el camino 1), mediante las expresiones (12) y (13).

Camino	μ	σ	Probabilidad de superar al Camino 6
1			
2	-3,00	3,02	84,0%
3	-2,00	3,09	74,1%
4	-1,00	2,75	64,2%
5	-1,00	2,94	63,3%
6			
7	0,00	2,58	50,0%

Tabla 2.5-3. Probabilidad de los caminos en competencia de superar al camino 6.

Comprobada la independencia entre los caminos 1 y 6, la probabilidad de cada camino para convertirse en crítico se calcula con el producto de la probabilidad para superar al camino 1, el crítico (tabla 2.5-1) y la probabilidad para superar al camino 6 (tabla 2.5-3). El resultado se expone en la tabla 2.5-4 donde se lo compara con las probabilidades simuladas de convertirse en críticos. La probabilidad del camino 6 es el valor de la tabla 2.5-1, y la del camino 1 surge por diferencia a 100 de la suma de probabilidades de los otros caminos en esta tabla 2.5-4.

Camino	Actividades en el camino	Media	Desv. Std.	Prob. De ser crítico (simulada)	Prob. De ser crítico (aproximada)
1	A-B-C-E-F-J-L-N	44	3,0	68,3%	61,0%
2	A-B-C-E-F-J-K-N	43	2,8	13,8%	14,4%
3	A-B-C-I-J-L-N	42	2,9	5,7%	7,4%
4	A-B-C-D-J-L-N	41	2,9	1,2%	1,8%
5	A-B-C-I-J-K-N	41	2,8	1,2%	3,5%
6	A-B-C-D-G-H-M	40	3,3	9,6%	10,3%
7	A-B-C-D-J-K-N	40	2,8	0,2%	1,5%
8	A-B-C-E-H-M	31	3,1	0,0%	0,0%

Tabla 2.5-4. Comparación entre probabilidades de criticidad para los caminos (cálculo aproximado vs. simulación).

Luego, para cada actividad, se suman las probabilidades de ser críticos de los diferentes caminos que la misma compone. Dicha sumatoria es una aproximación al índice de criticidad de la tarea, el cuál se compara con los índices de criticidad simulados en la tabla 2.5-5.

Actividades	IC simulado	IC Calculo aproximado
A	100,0%	100,0%
B	100,0%	100,0%
C	100,0%	100,0%
D	10,4%	13,6%
E	82,4%	75,4%
F	82,4%	75,4%
G	9,3%	10,3%
H	9,3%	10,3%
I	7,2%	11,0%
J	90,7%	89,7%
K	15,0%	19,4%
L	75,7%	70,3%
M	9,3%	10,3%
N	90,7%	89,7%

Tabla 2.5-5. Comparación entre índices de criticidad obtenidos por simulación y por cálculo aproximado.

El resultado obtenido resulta una buena aproximación a los índices de criticidad simulados. Cabe aclarar, que este método de aproximación a los índices de criticidad también se basa en el *Teorema Central del Límite*. Al realizar la aproximación Normal para la diferencia entre los posibles caminos, la cantidad de actividades que diferencian una rama de la otra debería ser lo suficientemente grande. Aún así, la aproximación devuelve resultados satisfactorios incluso en este caso en que se han considerado algunos caminos que se ven diferenciados por sólo dos actividades.



3. EXPERIMENTACION SOBRE UN PROYECTO DE LANZAMIENTO DE PRODUCTO LACTEO

3.1. La aplicación de PERT al desarrollo de producto

Se propone una red de desarrollo de producto desde la concepción de oportunidades de mercado hasta la puesta en marcha de un producto lácteo nuevo. Se utilizará la misma metodología aplicada sobre el proyecto de construcción de viviendas públicas. A través de esta experimentación se profundizará sobre el empleo de técnicas analíticas y de simulación para la mejor gestión de proyecto, en particular, la *Gestión de Enfoque* para alcanzar fechas programadas de lanzamiento con mayor precisión.

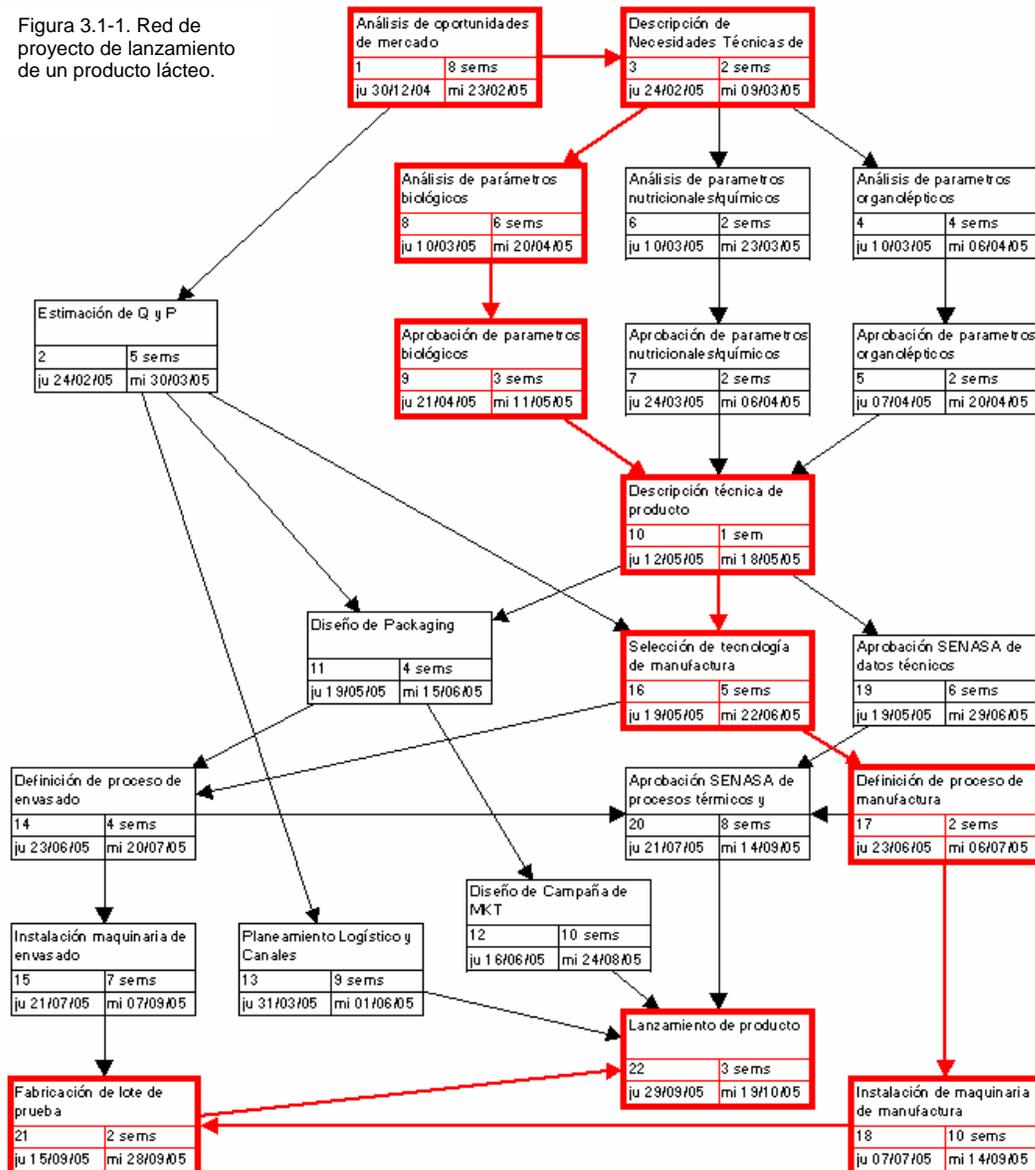
La tabla 3.1-1 presenta los datos necesarios para la elaboración de la red del proyecto y la figura 3.1-1 la red de actividades, en donde se han señalado con color rojo las actividades correspondientes al camino crítico, determinado con los datos hasta aquí proporcionados.

ACTIVIDADES	Descripción	Actividades Precedentes	Duración Esperada
1	Análisis de oportunidades de Mercado		8
2	Estimación de Q y P	1	5
3	Descripción de necesidades técnicas de producto	1	2
4	Análisis de parametros organolépticos	3	4
5	Aprobación de parametros organolépticos	4	2
6	Análisis de parametros nutricionales/químicos	3	2
7	Aprobación de parametros nutricionales/químicos	6	2
8	Análisis de parametros biológicos	3	6
9	Aprobación de parametros biológicos	8	3
10	Descripción técnica de producto	9, 7, 5	1
11	Diseño de Packaging	2, 10	4
12	Diseño de campaña de MKT	11	10
13	Planeamiento logístico y Canales	11	9
14	Definición de proceso de envasado	11	4
15	Instalación maquinaria de envasado	14	7
16	Selección de tecnología de manufactura	2, 10	5
17	Definición de proceso de manufactura	16	2
18	Instalación de maquinaria de manufactura	17	10
19	Aprobación SENASA de datos técnicos	10	6
20	Aprobación SENASA de procesos térmicos y envasados	14, 19, 17	8
21	Fabricación de lote de prueba	15, 18	2
22	Lanzamiento de producto	21, 13, 20, 12	3

Tabla 3.1-1.
Actividades para lanzamiento de un nuevo producto lácteo

El proyecto posee 22 actividades, de las cuáles 10 son críticas. Recurriendo a un modelo construido a partir de MS Excel se concluye, mediante la duración esperada para cada actividad, que el proyecto podrá ser completado en 42 semanas. Un retraso respecto de su duración esperada en cualquiera de las actividades señaladas con color rojo, implicarán inmediatamente un retraso en la misma medida sobre la duración esperada del proyecto.

Figura 3.1-1. Red de proyecto de lanzamiento de un producto lácteo.



El análisis de los riesgos a los que están expuestas cada una de las actividades genera la incorporación de incertidumbre sobre la duración de las tareas, añadiendo una nueva dimensión (la volatilidad) que acentúa la dificultad de la red. Las técnicas que se evaluarán responden a un enfoque para

simplificar la misma dándole al manager del proyecto herramientas para mejorar su desempeño.

La figura 3.2-2 presenta la red en formato de Diagrama de Gantt, en el cuál se visualizan claramente las holguras y la distribución calendario de las tareas.

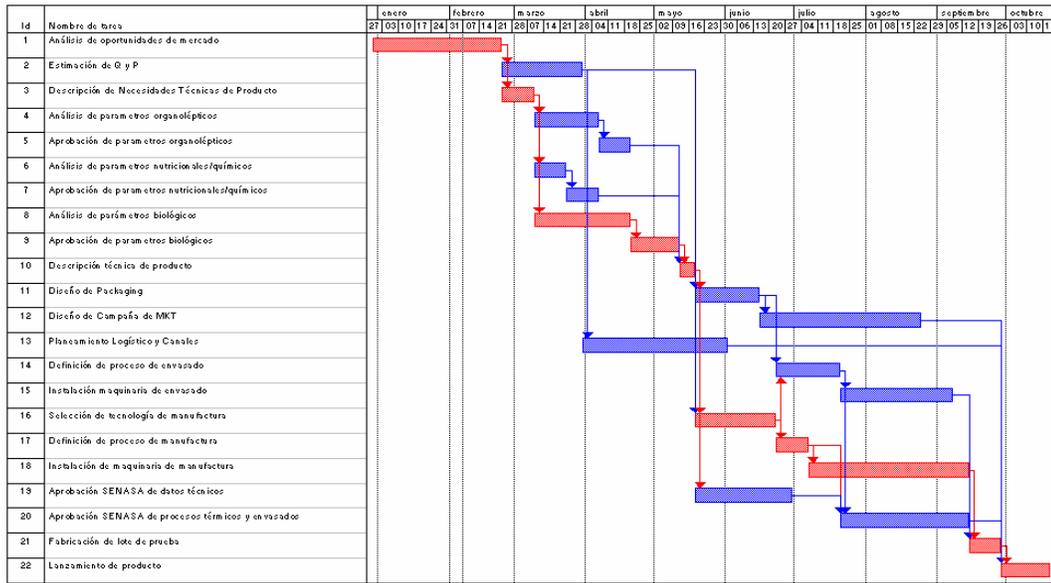


Figura 3.1-2. Diagrama de Gantt de proyecto de lanzamiento de un producto lácteo.

3.2. Incorporación de incertidumbre en la duración de las tareas

La consideración de sucesos favorables y desfavorables proporcionan la información adicional requerida para cada una de las actividades y calculando mediante (1) y (2) se obtiene los valores medios y varianzas indicados en la tabla 3.2-1.

En este caso a diferencia del ejemplo para la construcción de viviendas públicas, la interacción entre actividades es más densa y compleja. Esto supone que las 3 aproximaciones no serán tan precisas como es deseable. La aplicación de las mismas, indican que la distribución de probabilidad para la fecha de finalización del proyecto tendrá distribución Normal con media de 42 semanas y un desvío estándar de 3,09 semanas. A través del análisis por simulación de esta red, se evaluara el ajuste de esta aproximación y una técnica denominada PNET para llegar a un mejor ajuste analítico sin la necesidad de simular.

ACTIVIDADES	Descripción	Actividades Precedentes	DURACION			Duración Esperada	Varianza
			Estimación Optimista	Moda	Estimación Pesimista		
1	Análisis de oportunidades de Mercado		6,5	7,5	11,5	8	0,69
2	Estimación de Q y P	1	2	5	8	5	1,00
3	Descripción de necesidades técnicas de producto	1	1	1,5	5	2	0,44
4	Análisis de parámetros organolépticos	3	2	3	10	4	1,78
5	Aprobación de parámetros organolépticos	4	1,5	2	2,5	2	0,03
6	Análisis de parámetros nutricionales/químicos	3	1,5	2	2,5	2	0,03
7	Aprobación de parámetros nutricionales/químicos	6	1	1,5	5	2	0,44
8	Análisis de parámetros biológicos	3	4	5	12	6	1,78
9	Aprobación de parámetros biológicos	8	1,5	2	8,5	3	1,36
10	Descripción técnica de producto	9, 7, 5	0,5	0,5	3,5	1	0,25
11	Diseño de Packaging	2, 10	2	3	10	4	1,78
12	Diseño de campaña de MKT	11	7	9	17	10	2,78
13	Planeamiento logístico y Canales	11	7	8,5	13	9	1,00
14	Definición de proceso de envasado	11	3	3,5	7	4	0,44
15	Instalación maquinaria de envasado	14	5	6	13	7	1,78
16	Selección de tecnología de manufactura	2, 10	2	4,5	10	5	1,78
17	Definición de proceso de manufactura	16	1,5	1,75	3,5	2	0,11
18	Instalación de maquinaria de manufactura	17	8	8,5	18	10	2,78
19	Aprobación SENASA de datos técnicos	10	5	5	11	6	1,00
20	Aprobación SENASA de procesos térmicos y envasados	14, 19, 17	7	7	13	8	1,00
21	Fabricación de lote de prueba	15, 18	1,5	1,75	3,5	2	0,11
22	Lanzamiento de producto	21, 13, 20, 12	2,5	2,5	5,5	3	0,25

Tabla 3.2-1. Incorporación de estimación por tres puntos y cálculo de varianzas y medias para las actividades del proyecto.

3.3. Análisis del proyecto por simulación

3.3.1. Distribución de probabilidad de duración del proyecto

Resumen:

Rango total desde 33,1 a 55,09 semanas

Luego de 10.000 corridas, el error estándar de la media es 0,03

Estadísticas:

	Value
Corridas	10000
Media	42,83
Mediana	42,69
Moda	40,65
Desvío estándar	2,93
Varianza	8,56
Sesgo	0,25
Curtosis	2,92

Tabla 3.3.1-1. Resultados de la simulación de Monte Carlo a la red de proyecto de desarrollo de producto.

Realizando el ajuste de distribución Beta, mencionado en la sección 2.3.1, se procede al análisis de simulación. La tabla 3.3.1-1 expone los resultados obtenidos a través de una simulación de 10.000 corridas, proporcionando datos sobre la media, el desvío estándar, varianza, curtosis, rango y sesgo.

Los resultados obtenidos de esta forma, pueden ser luego comparados con el obtenido a partir de las tres aproximaciones simplificadas. En la figura 3.3.1-1 puede observarse que para este proyecto la aproximación a la distribución real para el tiempo de concreción no es tan fina. Las aproximaciones simplificadas del método PERT proporcionan una distribución más optimista (la media se encuentra un poco desplazada a la izquierda respecto de la media real), sin lograr un buen ajuste de la distribución.

En este caso la aproximación Normal no logra un ajuste tan importante como en el ejemplo anterior pero ello no implica que la aproximación no resulte efectiva (la curva real es evidentemente sesgada, dado que no coinciden los valores de la moda y la mediana con el valor de la media). La aproximación centra su valor medio entre la mediana y la moda. Estos dos valores son más ricos que la media para el gerenciamiento de la red. La moda es el valor más probable de duración mientras que la mediana acumula el 50% de probabilidad de finalización. La media en cambio, es un valor esperado que compensa (respecto de los otros parámetros estadísticos) aquellas duraciones bajas con alta probabilidad con las mayores duraciones de baja probabilidad en una distribución sesgada.

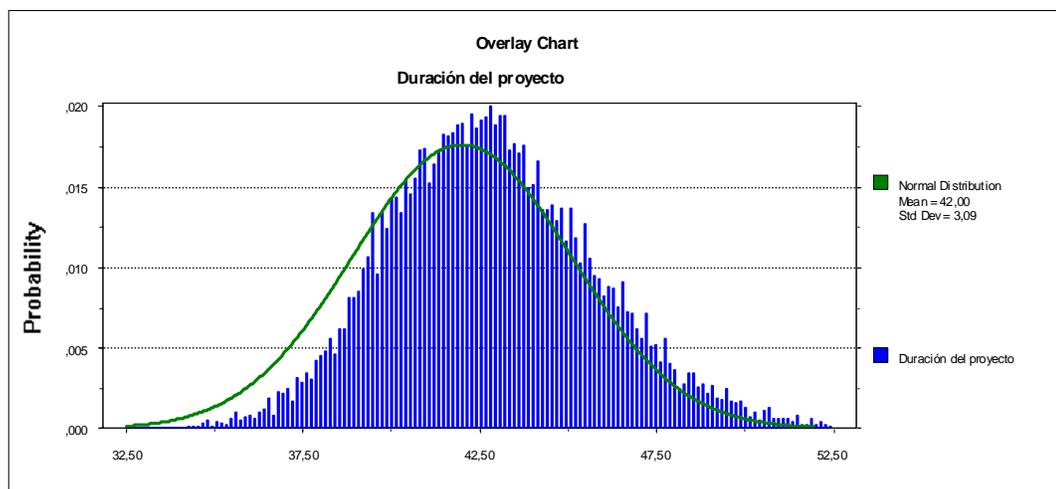


Figura 3.3.1-1. Ajuste de la aproximación simplificada a la verdadera distribución de probabilidad del proyecto.

En este sentido, cabe destacar una vez más que la aproximación de PERT para la duración del proyecto se fundamenta en el Teorema Central del Límite y

que por lo tanto es de esperar que mientras más actividades posea el camino crítico, mejor será el ajuste de la distribución Normal.

3.3.2. PNET: Una técnica analítica para el mejor ajuste de la duración del proyecto

La técnica denominada PNET [16] propone una forma analítica para lograr una mejor aproximación a la distribución de probabilidad simulada. Acorde a lo propuesto con esta técnica, la probabilidad de completar el proyecto para una fecha t dada puede ser aproximada mediante

$$P[T \leq t] = \prod_i P[T_i \leq t] \quad (15)$$

En donde todos los caminos en competencia i son suficientemente independientes entre sí. Se considera que un camino en competencia es suficientemente independiente de otro si no comparte un gran número de actividades con el mismo. Para estimar cuantitativamente si un camino en competencia es independiente de otro se recurre a la expresión (14), desarrollado previamente que estima los coeficientes de correlación entre caminos.

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{k \in (i \cap j)} \sigma_k^2}{\sigma_i \cdot \sigma_j} \quad (14)$$

El numerador en esta expresión es la suma de las varianzas de las actividades k que pertenecen tanto al camino i como al camino j . El denominador es el producto de los desvíos estándar de los caminos i y j . Si el coeficiente de correlación entre actividades es menor que 0,6, entonces se considera que los caminos son suficientemente independientes.

En primer lugar deben plantearse los posibles caminos, como se observa en la tabla 3.3.2-1.

Esta red cuenta con 30 posibles caminos posibles desde el inicio del proyecto hasta su finalización. Si bien todos ellos son caminos en competencia, no todos ellos son independientes. Además, habrá alguno de ellos que no valdrá la pena tener en cuenta debido a su baja duración media respecto de otros, por lo que en realidad no compiten.

Camino	Actividades en el camino	Media	Desv. Std.
1	1-3-8-9-10-16-17-18-21-22	42	3,09
2	1-3-8-9-10-16-14-15-21-22	41	2,98
3	1-3-8-9-10-11-14-15-21-22	40	2,98
4	1-3-8-9-10-16-14-20-22	40	2,83
5	1-3-4-5-10-16-17-18-21-22	39	2,87
6	1-3-8-9-10-11-14-20-22	39	2,83
7	1-3-8-9-10-16-17-20-22	38	2,77
8	1-3-4-5-10-16-14-15-21-22	38	2,75
9	1-3-8-9-10-11-12-22	37	3,06
10	1-3-4-5-10-11-14-15-21-22	37	2,75
11	1-3-6-7-10-16-17-18-21-22	37	2,62
12	1-3-8-9-10-19-20-22	37	2,60
13	1-3-4-5-10-16-14-20-22	37	2,58
14	1-3-4-5-10-11-14-20-22	36	2,58
15	1-3-6-7-10-16-14-15-21-22	36	2,49
16	1-2-16-17-18-21-22	35	2,59
17	1-3-4-5-10-16-17-20-22	35	2,52
18	1-3-6-7-10-11-14-15-21-22	35	2,49
19	1-3-6-7-10-16-14-20-22	35	2,31
20	1-3-4-5-10-11-12-22	34	2,83
21	1-2-16-14-15-21-22	34	2,46
22	1-3-4-5-10-19-20-22	34	2,33
23	1-3-6-7-10-11-14-20-22	34	2,31
24	1-2-16-14-20-22	33	2,27
25	1-3-6-7-10-16-17-20-22	33	2,24
26	1-3-6-7-10-11-12-22	32	2,58
27	1-3-6-7-10-19-20-22	32	2,03
28	1-2-16-17-20-22	31	2,20
29	1-2-11-12-22	30	2,55
30	1-2-13-22	25	1,72

Tabla 3.3.2-1.
Posibles caminos críticos para la finalización del proyecto.

Como medida de simplificación de cálculo, se procede a eliminar los caminos de menores duraciones medias. Por lo tanto se retienen sólo los primero 8 caminos críticos, en donde los mismos se han ordenado de mayor a menor duración media y de mayor a menor desvío como criterio de segundo orden. Un posible criterio para limitar los caminos consiste en dejar solo aquellos que superen con su valor medio a la duración del camino crítico menos un desvío estándar (llevado éste al número entero inmediato superior en caso que resulte un valor con decimales).

A continuación se calculan los coeficientes de correlación empleando la fórmula (14), primero con el camino 1. Los mismos arrojan los siguientes resultados.

$$\begin{aligned}
 \rho_{12} &= 0,72 & \rho_{16} &= 0,55 \\
 \rho_{13} &= 0,53 & \rho_{17} &= 0,78 \\
 \rho_{14} &= 0,75 & \rho_{18} &= 0,42 \\
 \rho_{15} &= 0,72 & &
 \end{aligned}$$

Se descartan por lo tanto, los caminos 2, 4, 5 y 7 por estar muy correlacionados con el primero. Este descarte asume que en el enfoque simplificado de PNET, el camino 1 será suficientemente representativo de estos 4 caminos que se descartan. Luego se continúa la verificación de las correlaciones con los caminos restantes.

$$\rho_{36} = 0,83 \quad \rho_{38} = 0,48$$

El alto coeficiente de correlación entre el camino 3 y el camino 6 genera el descarte del camino 6 mientras que el camino 8 se mantiene. Con el resultado de los caminos independientes, se aplica la expresión (15) a los caminos 1, 3 y 8 como una nueva aproximación analítica a la solución obtenida por simulación.

Sin embargo, esto no implica que los caminos 1, 3 y 8 deban ser considerados críticos o que sean los de mayor probabilidad de convertirse en críticos. Los caminos seleccionados nada tienen que ver con la probabilidad de ser críticos, simplemente son tres caminos con duración media suficientemente elevada como para convertirse en críticos e involucran actividades diferentes tal que puedan considerarse independientes entre sí. Es precisamente al considerarse independientes que se permite el cálculo de la expresión (15) por uno de los axiomas fundamentales de la probabilidad. La curva de la distribución acumulada calculada resulta

$$P[T \leq t] = P[T_1 \leq t/T_1 \approx N(\mu_1 = 42; \sigma_1 = 3,09)]. P[T_3 \leq t/T_3 \approx N(\mu_3 = 40; \sigma_3 = 2,98)]. P[T_8 \leq t/T_8 \approx N(\mu_8 = 38; \sigma_8 = 2,75)]$$

Los resultados de esta nueva aproximación, como puede observarse en la figura 3.3.2-1 son significativamente mejores que aquellos de la aproximación PERT, aunque un poco más pesimistas en cuanto a la duración del proyecto simulada para finalizaciones tempranas del mismo.

El mejor ajuste de la distribución PNET, sugiere además una importante consecuencia. El mejor ajuste de la curva propuesta por PNET se genera a partir del producto de distribuciones normales, proponiendo efectos proporcionales sobre una distribución normal. Cuando una variable con distribución Normal es afectada por factores o efectos proporcionales, su distribución tiende a ser Lognormal [17].

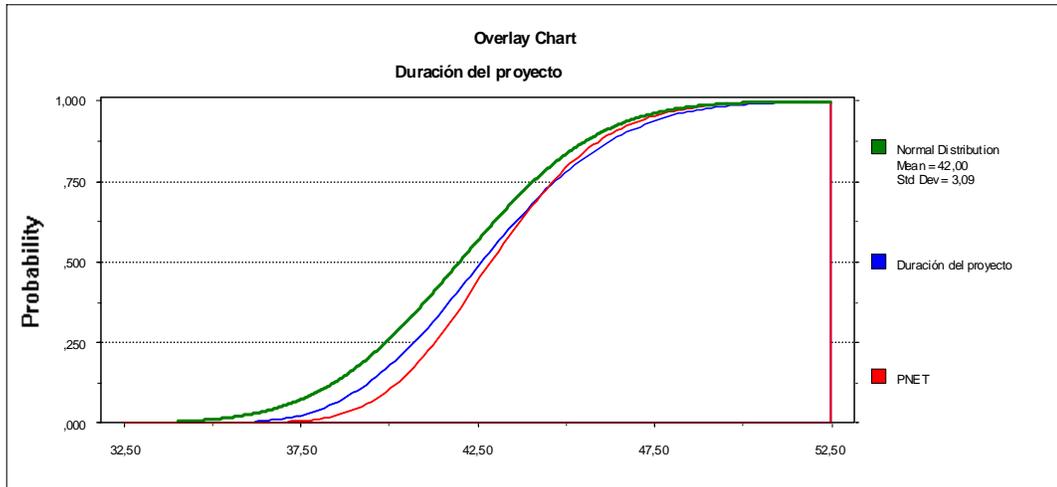


Figura 3.3.2-1. Comparación de ajuste entre la aproximación PERT y la aproximación PNET para la probabilidad acumulada de duración del proyecto.

Esta conclusión se comprueba con la distribución de probabilidad de duración del proyecto. En la figura 3.3.2-2 se observa el ajuste de una distribución Lognormal a la duración del proyecto. Con parámetros de media 42,88 semanas y desvío estándar de 2,94 semanas, el ajuste se verifica mediante el test de bondad del ajuste de Kolmogrov-Smirnov. Para este caso el test comprueba un ajuste con 99% de nivel de significación.

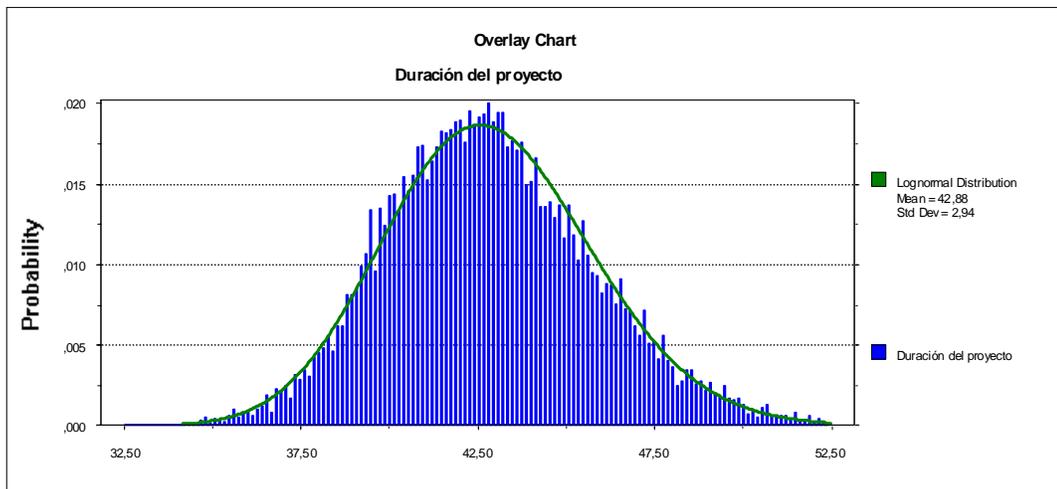


Figura 3.3.2-2. Ajuste de una distribución Lognormal a la duración del proyecto.

Este aspecto respecto de la forma de la distribución de probabilidad de duración del proyecto, revela una herramienta importante para quien debe llevarlo a cabo. La distribución Lognormal siempre posee su moda (valor más probable) menor a su valor medio. Las estadísticas obtenidas por simulación en la tabla 3.3.1-1 señalan una moda de 40,65 semanas cuando la media es de 42,83 semanas. Este desfase entre media y moda (que son coincidentes en una distribución Normal) implica un mayor sesgo hacia la derecha,

involucrando mayores probabilidades para las duraciones más largas que con la distribución Normal.

El conocimiento de la forma de la distribución de probabilidad sirve en este sentido para indicar que cuando no existe un camino crítico dominante y existe cierta independencia (diferentes actividades involucradas) entre los caminos de mayor duración, la moda se desplaza hacia valores menores respecto de la media. Este efecto se traduce en el incremento de probabilidad de duraciones más largas para el proyecto que las supuestas a partir de la aproximación Normal.

3.3.3. Cálculo de índices de criticidad

La figura 3.3.3-1 presenta la red del proyecto de lanzamiento de producto incorporando los índices de criticidad de las tareas.

Cómo fue descrito en la sección 2.3.3, el líder de proyecto posee un mayor conocimiento de la red a través del uso de los índices de criticidad. Si bien en este caso no existen claros caminos en competencia por la densidad de relaciones entre actividades, los índices de criticidad continúan siendo un indicador ordinal para las actividades sobre las que conviene reducir duraciones medias.

Adicionalmente, los índices críticos permiten establecer caminos alternativos al crítico (formados por actividades con índices de criticidad superior a un umbral de protección en cuanto a probabilidad de convertirse la tarea en crítica, por ejemplo, 12%) sobre los cuáles deberá prestarse atención para las actividades de control de ejecución y seguimiento. En este sentido se han resaltado (Con negrita sobre los índices de criticidad) aquellas actividades que sin aparecer inicialmente como críticas, poseen una probabilidad elevada de convertirse en tales. Estas son las actividades 14, 15 y 11 (también dentro de este grupo podría ubicarse la actividad 20 con 10,8% de probabilidad de convertirse en crítica). A tales efectos se presentan en la tabla 3.3.3-1 los índices de criticidad de las actividades, ordenados de mayor a menor. Resulta evidente que el primer grupo corresponde a las actividades críticas (determinadas a partir de las duraciones medias) y es el pequeño grupo inmediato a estas que debe ser considerado a los efectos de control.

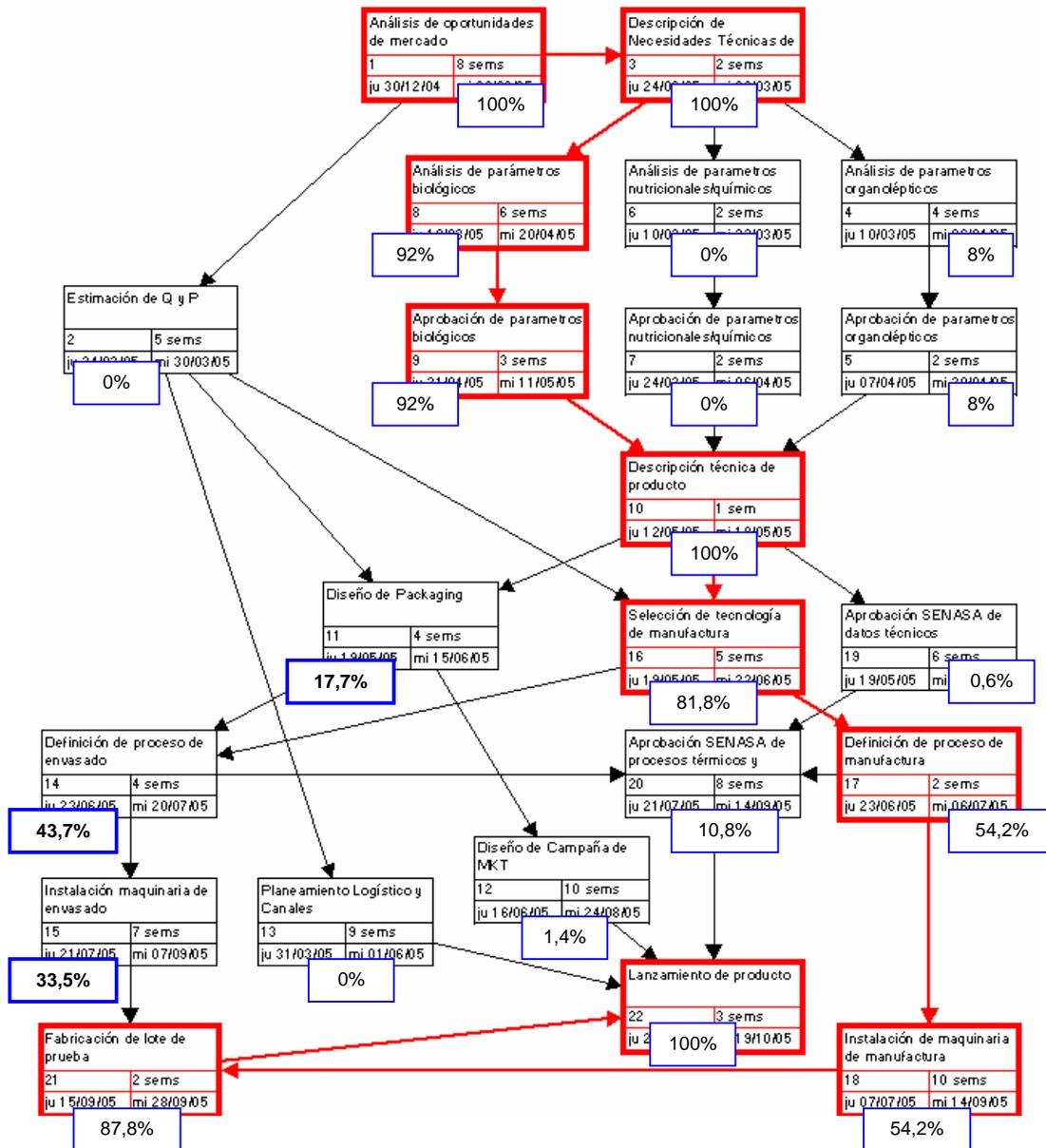


Figura 3.3.3-1. Índices de criticidad sobre la red de proyecto de lanzamiento de producto lácteo.

Adicionalmente, la tabla 3.3.3-1 incorpora los índices de criticidad aproximados a partir de la técnica analítica desarrollada en la sección 2.5. La comparación entre los valores simulados y aproximados analíticamente, demuestra una vez más la validez de la aproximación.

Actividades	Indice de Criticidad (Simulado)	Indice de criticidad (Aproximación analítica)	
Actividades pertenecientes al camino crítico	1	100,00%	100,00%
	3	100,00%	100,00%
	10	100,00%	100,00%
	22	100,00%	100,00%
	8	92,00%	97,23%
	9	92,00%	97,23%
	21	87,80%	90,75%
	16	81,80%	84,01%
	17	54,20%	55,98%
	18	54,20%	55,98%
Actividades adicionales para control y seguimiento	14	43,70%	44,02%
	15	33,50%	35,01%
	11	17,70%	15,99%
	20	10,80%	9,25%
	4	8,00%	2,77%
	5	8,00%	2,77%
	12	1,40%	0,00%
	19	0,60%	0,00%
	2	0,00%	0,00%
	6	0,00%	0,00%
	7	0,00%	0,00%
	13	0,00%	0,00%

Tabla 3.3.3-1.
Actividades del proyecto de lanzamiento de producto ordenadas por su índice de criticidad.

3.3.4. Caminos en competencia (*contending paths*)

Se evalúan al igual que con la red de proyecto de viviendas económicas, las probabilidades de criticidad de los diferentes caminos desde el inicio hacia el final del proyecto.

El resultado de la simulación en este caso puede observarse en la tabla 3.3.4-1 en dónde se han ordenado los posibles caminos presentados en la tabla 2.3.2-1 de acuerdo a su probabilidad de ser críticos. Al igual que en la red de ejemplo anterior, se observa que el orden (en cuanto a criticidad) de los caminos, no coincide con el orden de la media de duración y el desvío estándar en sentido decreciente.

En este proyecto, existe menor dominancia del camino 1 que para el caso del ejemplo anterior. Sin embargo continúa siendo un camino de suma importancia con 50,7% de probabilidad de ser crítico. Nótese que la diferencia entre los caminos 2 y 3 respecto al camino 1 se debe a la aparición en el camino de las actividades 11, 14 y 15.

Camino	Actividades en el camino	Media	Desv. Std.	Probabilidad de ser crítico
1	1-3-8-9-10-16-17-18-21-22	42	3,09	50,7%
2	1-3-8-9-10-16-14-15-21-22	41	2,98	18,5%
3	1-3-8-9-10-11-14-15-21-22	40	2,98	11,4%
4	1-3-8-9-10-16-14-20-22	40	2,83	5,5%
5	1-3-4-5-10-16-17-18-21-22	39	2,87	4,7%
6	1-3-8-9-10-11-14-20-22	39	2,83	4,1%
8	1-3-4-5-10-16-14-15-21-22	38	2,75	1,7%
9	1-3-8-9-10-11-12-22	37	3,06	1,3%
10	1-3-4-5-10-11-14-15-21-22	37	2,75	0,9%
12	1-3-8-9-10-19-20-22	37	2,60	0,6%
13	1-3-4-5-10-16-14-20-22	37	2,58	0,5%
14	1-3-4-5-10-11-14-20-22	36	2,58	0,2%
20	1-3-4-5-10-11-12-22	34	2,83	0,1%
7	1-3-8-9-10-16-17-20-22	38	2,77	0,0%
11	1-3-6-7-10-16-17-18-21-22	37	2,62	0,0%
15	1-3-6-7-10-16-14-15-21-22	36	2,49	0,0%
16	1-2-16-17-18-21-22	35	2,59	0,0%
17	1-3-4-5-10-16-17-20-22	35	2,52	0,0%
18	1-3-6-7-10-11-14-15-21-22	35	2,49	0,0%
19	1-3-6-7-10-16-14-20-22	35	2,31	0,0%
21	1-2-16-14-15-21-22	34	2,46	0,0%
22	1-3-4-5-10-19-20-22	34	2,33	0,0%
23	1-3-6-7-10-11-14-20-22	34	2,31	0,0%
24	1-2-16-14-20-22	33	2,27	0,0%
25	1-3-6-7-10-16-17-20-22	33	2,24	0,0%
26	1-3-6-7-10-11-12-22	32	2,58	0,0%
27	1-3-6-7-10-19-20-22	32	2,03	0,0%
28	1-2-16-17-20-22	31	2,20	0,0%
29	1-2-11-12-22	30	2,55	0,0%
30	1-2-13-22	25	1,72	0,0%

Tabla 3.3.4-1. Criticidad de los caminos en un proyecto de lanzamiento de producto lácteo.

La importancia de dichas actividades ya había sido advertida en la sección anterior cuando se señalara su alta probabilidad de convertirse en críticas. El análisis de los caminos en competencia refuerza las conclusiones obtenidas a través de los índices de criticidad.

En consideración del análisis realizado en el punto 2.4.2, es posible ampliar el estudio de los caminos en competencia a través de la simulación. De esta forma, es deseable poner el foco de atención no sólo en la probabilidad de un camino para convertirse en crítico, sino en que la duración de dicho camino supere la duración media esperada para el proyecto de 42 semanas.

La aplicación de este nuevo concepto ayuda a determinar los potenciales caminos críticos, en los cuales su sesgo hacia la derecha para la distribución de probabilidad de duración del proyecto podría afectar las estimaciones de duración. La tabla 3.3.4-2 presenta los índices de probabilidad obtenidos mediante simulación.

Camino	Actividades en el camino	Probabilidad de ser crítico	Probabilidad de ser crítico con retraso
1	1-3-8-9-10-16-17-18-21-22	50,7%	31,4%
2	1-3-8-9-10-16-14-15-21-22	18,5%	11,7%
3	1-3-8-9-10-11-14-15-21-22	11,4%	6,6%
4	1-3-8-9-10-16-14-20-22	5,5%	3,6%
5	1-3-4-5-10-16-17-18-21-22	4,7%	2,7%
6	1-3-8-9-10-11-14-20-22	4,1%	1,9%
8	1-3-4-5-10-16-14-15-21-22	1,7%	0,6%
9	1-3-8-9-10-11-12-22	1,3%	0,9%
10	1-3-4-5-10-11-14-15-21-22	0,9%	0,4%
12	1-3-8-9-10-19-20-22	0,6%	0,2%
13	1-3-4-5-10-16-14-20-22	0,5%	0,2%
14	1-3-4-5-10-11-14-20-22	0,2%	0,1%
20	1-3-4-5-10-11-12-22	0,1%	0,1%
7	1-3-8-9-10-16-17-20-22	0,0%	0,0%
11	1-3-6-7-10-16-17-18-21-22	0,0%	0,0%
15	1-3-6-7-10-16-14-15-21-22	0,0%	0,0%
16	1-2-16-17-18-21-22	0,0%	0,0%
17	1-3-4-5-10-16-17-20-22	0,0%	0,0%
18	1-3-6-7-10-11-14-15-21-22	0,0%	0,0%
19	1-3-6-7-10-16-14-20-22	0,0%	0,0%
21	1-2-16-14-15-21-22	0,0%	0,0%
22	1-3-4-5-10-19-20-22	0,0%	0,0%
23	1-3-6-7-10-11-14-20-22	0,0%	0,0%
24	1-2-16-14-20-22	0,0%	0,0%
25	1-3-6-7-10-16-17-20-22	0,0%	0,0%
26	1-3-6-7-10-11-12-22	0,0%	0,0%
27	1-3-6-7-10-19-20-22	0,0%	0,0%
28	1-2-16-17-20-22	0,0%	0,0%
29	1-2-11-12-22	0,0%	0,0%
30	1-2-13-22	0,0%	0,0%

Tabla 3.3.4-2. Probabilidad de criticidad con retraso respecto de la media para caminos alternativos del proyecto de lanzamiento de producto.

La probabilidad de criticidad con retraso, confirma la conclusión del uso de índices de criticidad en la sección 3.3.3. Adicionalmente a las actividades sobre el camino crítico original, deberá prestarse especial atención a las actividades 11, 14 y 15. Aplicando el criterio de protección del 5%, los caminos críticos a considerar por lo tanto serán el 1, 2 y 3.

Un aspecto notable de este análisis es que la suma de las probabilidades con retraso de los caminos en competencia no suma 50%, sino que acumulan 60,4% de probabilidad. Esto se debe a que la media de la distribución de probabilidad para la duración del proyecto no tiene su mediana coincidente con el valor esperado (media), como sería de esperar mediante la aproximación a la Normal propuesta por PERT.

3.3.5. La contribución a la varianza

Desarrollado en la sección 2.3.5, la contribución a la varianza describe en que forma la volatilidad (riesgo) de cada tarea influye sobre la variabilidad del resultado final. El informe resultante de la simulación de este indicador se conoce generalmente con el nombre de “análisis de tornado”, entre aquellos que hacen uso frecuente de simulación de Monte Carlo. El resultado en este caso puede observarse en la figura 3.3.5-1.

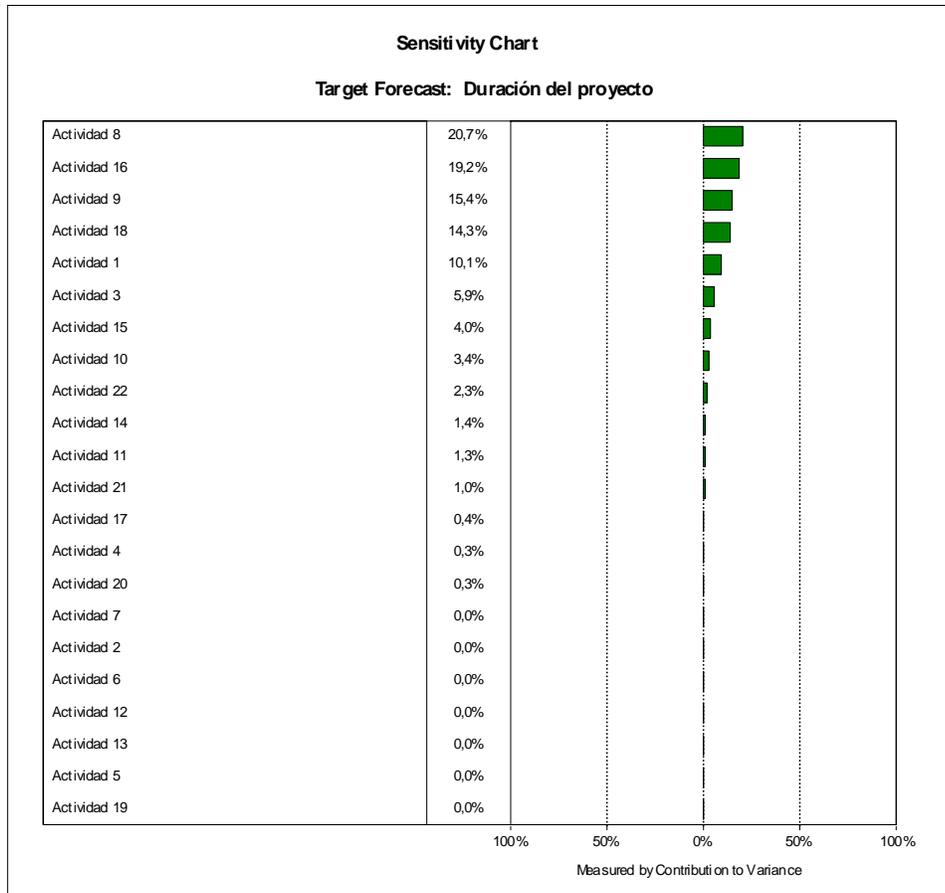


Figura 5.3.5-1. Sensibilidad de la duración del proyecto a la volatilidad de los tiempos de las actividades.

Cómo se mencionó anteriormente, la contribución a la varianza indica actividades de oportunidad / riesgos. En este caso no existe una única actividad que domine la varianza del proyecto, como ocurría en el ejemplo anterior. Aún así, este proyecto presenta una red más interesante para el análisis desde este punto de vista. El mismo se desarrolla en la sección 4 y se ha denominado *Gestión de Enfoque*.



4. LA GESTIÓN DE ENFOQUE

4.1. Introducción a la Gestión de Enfoque

El propósito de esta sección es el de evaluar el potencial impacto de la gestión de enfoque sobre la red de proyecto desarrollada en la sección 3. Lo que en este documento se propone como Gestión de enfoque, consiste en identificar aquellas actividades que por su disposición dentro de la red, duración y variabilidad representan una oportunidad / riesgo.

Manteniendo la línea de pensamiento del principio de Pareto, el enfoque de gestión sobre algunas pocas tareas vitales servirá al propósito de reducir considerablemente la variabilidad en el resultado del proyecto. La reducción en el espectro de actividades a las que debe atender un manager de proyecto, reduce considerablemente la variabilidad de dichas actividades [13]. La propuesta consiste en concentrar los esfuerzos de gestión y control sobre algunas pocas actividades para reducir su dispersión, ya que las mismas representan puntos de apalancamiento sobre el manejo de la red.

4.2. Identificando las actividades de enfoque

El primer paso para la gestión de enfoque es la identificación de aquellas actividades que más impacten sobre la distribución de probabilidad de duración del proyecto. Esta identificación no puede hacerse a través del índice de criticidad exclusivamente. Por ejemplo, una tarea podrá tener un índice de criticidad cercano al 100% (lo cuál es un buen indicador de su escaso margen y su posición dentro de la red) pero no tener una gran variabilidad en cuanto a su duración, por lo que no es probable que su correcta gestión afecte al resultado final. Es por ello que se recurre al indicador al que se ha referido como contribución a la varianza.

El análisis de simulación de Monte Carlo de contribución a la varianza se asemeja a un análisis de sensibilidad simultáneo. El mismo, provee una rápida y sencilla manera de determinar la influencia de la duración de cada actividad en la distribución de probabilidad de duración del proyecto. Los índices de contribución a la varianza, obtenidos en la sección 3.3.5, pueden ordenarse como se presentan en la figura 4.2-1. En el gráfico de doble eje vertical se han dispuesto los índices de contribución a la varianza de mayor a menor junto con una línea de trazado que representa el valor acumulado de contribución a la varianza.

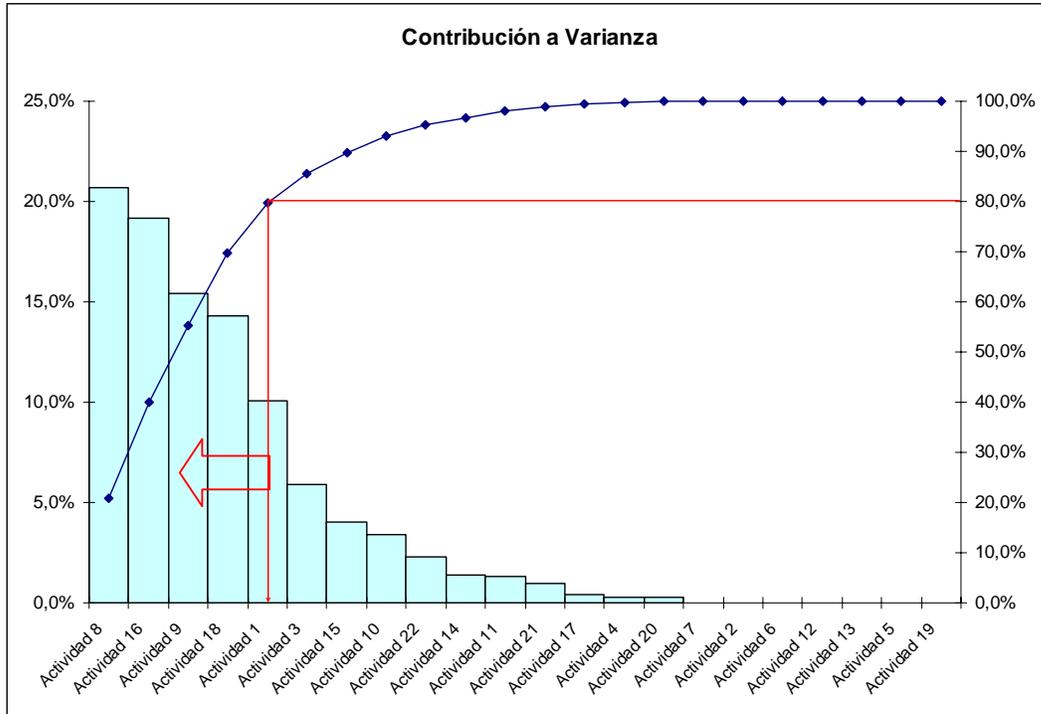


Figura 4.2-1. Gráfica de doble eje de contribución a la varianza para las actividades en la red de proyectos presentada en la sección 3.

La propuesta consiste en aplicar el principio de Pareto sobre la figura 4.2-1. En la misma, se observa una traza de color rojo que denota la contribución a la varianza acumulada de un 80%. Al llevar dicha traza al eje horizontal, quedan contenidas 5 de las 22 actividades en el proyecto. Si bien estas 5 actividades representan un 22,7% en cuanto a cantidad de actividades, poseen una influencia del 80% sobre la dispersión total del proyecto.

Tabla 4.2-1. Comparación entre índices de criticidad y contribución a la varianza para la red de proyecto de lanzamiento de producto.

Actividades	Varianza	Índice de criticidad (IC)	$\frac{\sigma_i^2.IC}{\sum_j \sigma_j^2.IC}$	Contribución a la Varianza
Actividad 8	1,78	92,0%	18,1%	20,7%
Actividad 16	1,78	81,8%	16,1%	19,2%
Actividad 9	1,36	92,0%	13,8%	15,4%
Actividad 18	2,78	54,2%	16,6%	14,3%
Actividad 1	0,69	100,0%	7,7%	10,1%
Actividad 3	0,44	100,0%	4,9%	5,9%
Actividad 15	1,78	33,5%	6,6%	4,0%
Actividad 10	0,25	100,0%	2,8%	3,4%
Actividad 22	0,25	100,0%	2,8%	2,3%
Actividad 14	0,44	43,7%	2,1%	1,4%
Actividad 11	1,78	17,7%	3,5%	1,3%
Actividad 21	0,11	87,8%	1,1%	1,0%
Actividad 17	0,11	54,2%	0,7%	0,4%
Actividad 4	1,78	8,0%	1,6%	0,3%
Actividad 20	1,00	10,8%	1,2%	0,3%
Actividad 2	1,00	0,0%	0,0%	0,0%
Actividad 5	0,03	8,0%	0,0%	0,0%
Actividad 6	0,03	0,0%	0,0%	0,0%
Actividad 7	0,44	0,0%	0,0%	0,0%
Actividad 12	2,78	1,4%	0,4%	0,0%
Actividad 13	1,00	0,0%	0,0%	0,0%
Actividad 19	1,00	0,6%	0,1%	0,0%

Las actividades 8, 16, 9, 18 y 1 representan la clave de la gestión de enfoque. La reducción en la variabilidad de dichas tareas es capaz de lograr un impacto significativo en asegurar la duración del proyecto, y por ende en hacer productiva la inversión en reducción de la misma. La tabla 4.2-1 compara los índices de contribución a la varianza con los índices de criticidad, confirmando que los mismos no resultan un criterio ordinal para la selección de las actividades de enfoque. Sin embargo, la tabla también demuestra que una buena aproximación para hallar los mismos consiste en ponderar el índice de criticidad con la varianza de su correspondiente tarea.

Si bien se ha llegado al indicador de contribución a la varianza a partir de la simulación, es posible aproximarse al criterio ordinal alcanzado por el mismo mediante un cálculo analítico. Aunque no es exacto, las pruebas realizadas sugieren que la aproximación es bastante efectiva, particularmente para las actividades de enfoque.

La aproximación analítica requiere el cálculo previo de las holguras totales para cada actividad. Las holguras juegan un papel fundamental en la estimación del impacto en la variabilidad del proyecto, dado que las actividades que menos holgura poseen, impactan con mayor probabilidad sobre la duración del proyecto. La tabla 4.2-2 presenta las holguras libres y totales para las actividades del proyecto de lanzamiento de producto.

ACTIVIDADES	Holgura libre	Holgura Total
1	0	0
2	0	7
3	0	0
4	0	3
5	3	3
6	0	5
7	5	5
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	2
12	5	5
13	17	17
14	0	1
15	1	1
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	3	5
20	2	2
21	0	0
22	0	0

Tabla 4.2-2. Holguras libres y totales del proyecto de lanzamiento de producto.

A su vez, mientras mayor sea la semi-amplitud de probabilidad superior de duración, más probable será que dicha actividad consuma su holgura estimada.

Esto también depende de la distribución de probabilidad de la rama con la cuál compete y en este sentido, el indicador no considera dicho efecto.

Por último, el impacto de la actividad será mayor, mientras mayor sea su extensión de duración en relación con la duración del proyecto. La figura 4.2-2 esquematiza mejor este concepto, presentando el ejemplo de dos actividades en competencia, siendo una de ellas, una actividad crítica.

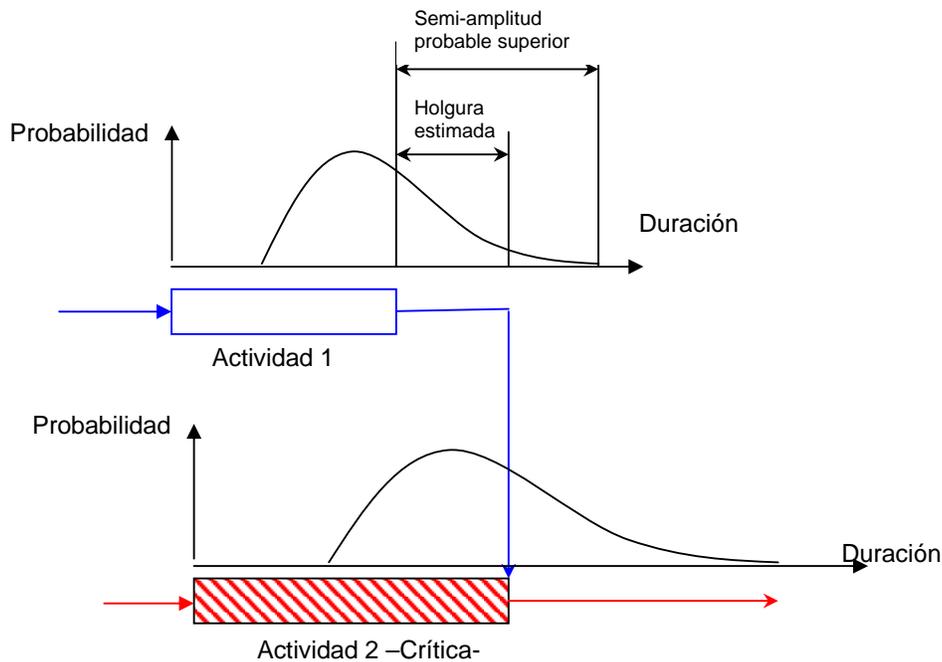


Figura 4.2-2. Diagrama para dos actividades en competencia, siendo una de ellas crítica. Esquematización del impacto de volatilidad en la duración de las tareas.

Lo que se desea obtener no es un número significativo, sino un número que sin importar su valor, permita ordenar las actividades de acuerdo a su impacto. Para ello se plantea el indicador construido en la expresión (16) al que se ha denominado *Coefficiente de holgura PERT*, en el cuál el ponderador de 0,25 que afecta a la *semi-amplitud de duración superior* se ha hallado experimentalmente.

$$\text{Coeficiente de holgura PERT}_i = \frac{\text{Holgura Total}_i - 0,25 \cdot \text{Semi-amplitud duración superior}_i}{\text{Duración estimada proyecto}} \quad (16)$$

Los valores obtenidos y el orden para los coeficientes, que deben ser ordenados de menor (más negativo) a mayor, se presentan en la tabla 4.2-3. En el caso de aplicar este criterio en lugar de simular, debe aplicarse el concepto de Pareto pero sobre las actividades: se seleccionan como

actividades de enfoque al 20% de las actividades que más bajo *coeficiente de holgura PERT* posean.

ACTIVIDADES	Coefficiente de Holgura PERT	Contribución a la varianza (por simulación)
18	-0,0476	14,30%
8	-0,0357	20,70%
9	-0,0327	15,40%
16	-0,0298	19,20%
1	-0,0208	10,10%
3	-0,0179	5,90%
10	-0,0149	3,40%
22	-0,0149	2,30%
15	-0,0119	4,00%
17	-0,0089	0,40%
21	-0,0089	1,00%
14	0,0060	1,40%
11	0,0119	1,30%
20	0,0179	0,30%
4	0,0357	0,30%
5	0,0685	0,00%
12	0,0774	0,00%
19	0,0893	0,00%
7	0,1012	0,00%
6	0,1161	0,00%
2	0,1488	0,00%
13	0,3810	0,00%

Tabla 4.2-3. Coeficientes de holgura PERT, calculado para las actividades de la red de proyectos. Si bien el resultado ordinal no es el mismo que para la situación simulada, las primeras 5 actividades prioritarias coinciden en ambos casos.

La selección de las actividades de enfoque es el paso más importante de la gestión de enfoque porque reduce el espectro de actividades sobre las cuales gestionar la variabilidad. Luego de haberlas identificado, el líder de proyecto deberá hacer uso de sus recursos de management para reducir la posible dispersión de tiempos en la duración de dichas actividades.

El manejo efectivo de riesgos de gestión puede ser dividido en dos partes: cuantificación de riesgos y control de riesgos.

- Cuantificación de riesgos:
 - Identificación, ponderación y priorización de riesgos: La gestión de enfoque concentra el proceso de cuantificación de riesgos en un solo paso para establecer cuáles riesgos deben ser eliminados o reducidos. Esta tarea se realiza tradicionalmente mediante una *Caja Doble de Pareto*³, donde se pondera la probabilidad de ocurrencia del riesgo con su impacto sobre la red de proyecto. En este caso, el concepto de Caja Doble de Pareto ha sido sustituido por la aplicación del principio de Pareto sobre los índices de contribución a la varianza o sobre el *coeficiente de holgura PERT*, obteniendo una medida conjunta del impacto y la probabilidad.

³ Concepto contribuido por Richard Kitterman

- Control de riesgos:
 - Mitigación de riesgos: Tomar acciones por adelantado que permitan reducir el impacto del riesgo sobre la duración de las actividades prioritarias identificadas. En general es más conveniente invertir dinero en la mitigación de riesgos que en el diseño de un plan de contingencias. En este aspecto se concentra la *gestión de enfoque* dado que identifica desde la etapa de planificación los puntos de apalancamiento para la reducción temprana de riesgos.
 - Planear para emergencias: Para todos aquellos riesgos que no pueden ser significativamente mitigados, elaborar un plan de emergencia.
 - Medir y controlar: Registrar los efectos de los riesgos identificados y gestionarlos hacia una conclusión satisfactoria.

La aplicación del principio de Pareto sobre los índices de contribución a la varianza proporciona un método sencillo para la identificación y priorización de las actividades que más contribuyen sobre el riesgo total del proyecto. Esto permite la mitigación temprana de riesgos y una potencial reducción en la varianza del proyecto desde la etapa de planificación. En cambio, las actividades de plan de contingencias y medición y control son llevadas a cabo sobre la marcha del proyecto, más para impedir o recuperar retrasos que para reducir riesgos.

4.3. Resultados de la Gestión de Enfoque

La gestión de enfoque, desde la identificación de las tareas hasta el uso de las técnicas de control y reducción de varianza, proponen una metodología para reducir los riesgos y mejorar los cumplimientos en fechas de entrega mediante el apalancamiento en algunas pocas actividades. El propósito no es reducir tiempos, sino reducir riesgos, haciendo que el “*just in time*” reemplace al “*empezar cuanto antes*” [6].

El inconveniente de aplicar la gestión de enfoque es que resulta difícil cuantificar exactamente cuanto puede reducirse la volatilidad en la duración de las actividades de enfoque, ya que en cada caso esto es muy dependiente de la tarea en sí misma. Sin embargo, de registrarse un desvío considerable mediante el gráfico de seguimiento y estimación continua, pueden aplicarse otras técnicas correctivas (como el crashing de actividades) a tiempo para alcanzar una duración propuesta.

En la figura 4.3-1 se plantea en forma de probabilidad acumulada, los posibles resultados a lograr mediante la gestión de enfoque. Asimismo, en el gráfico se compara el resultado de la gestión de enfoque con la duración normal de la red y con otra alternativa en la que se ha supuesto que se controlan los desvíos de todas las actividades y no solo las cinco actividades de enfoque. La relativamente escasa diferencia entre el resultado final de gestionar la varianza para 5 actividades contra la gestión de varianza de 22 actividades, refuerza los resultados obtenidos a través de los índices de contribución a la varianza y la aplicación del principio de Pareto.

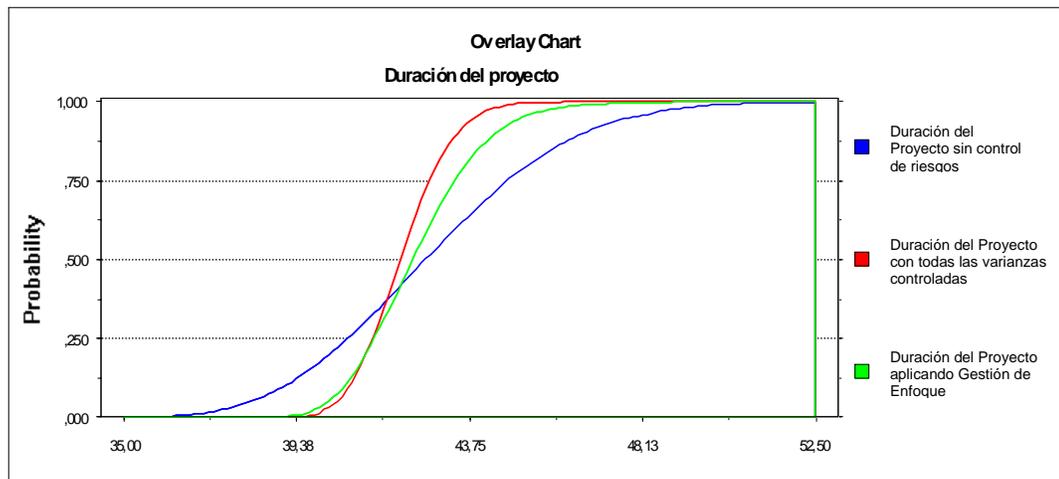


Figura 4.3-1. Comparación en probabilidad de duración de proyecto para diferentes técnicas de control de riesgos.

Como puede deducirse claramente de la figura 4.3-1, el esfuerzo adicional que requiere gestionar la variabilidad de 17 actividades adicionales a las de enfoque no presenta diferencias significativas en el resultado final.

Un aspecto también interesante a analizar se presenta en la figura 4.3-2 en donde se ha comparado la duración normal del proyecto, con la obtenida mediante la aplicación de la gestión de enfoque y a su vez con la distribución de probabilidad obtenida mediante el *crashing* de una semana en las 5 actividades de mayor índice de criticidad (a excepción de la actividad 10 que por su escasa duración no puede ser acortada).

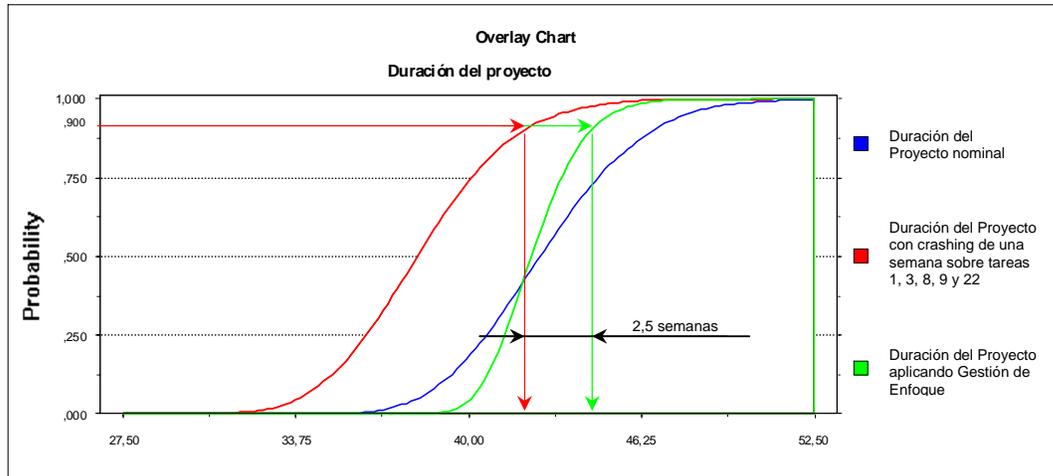
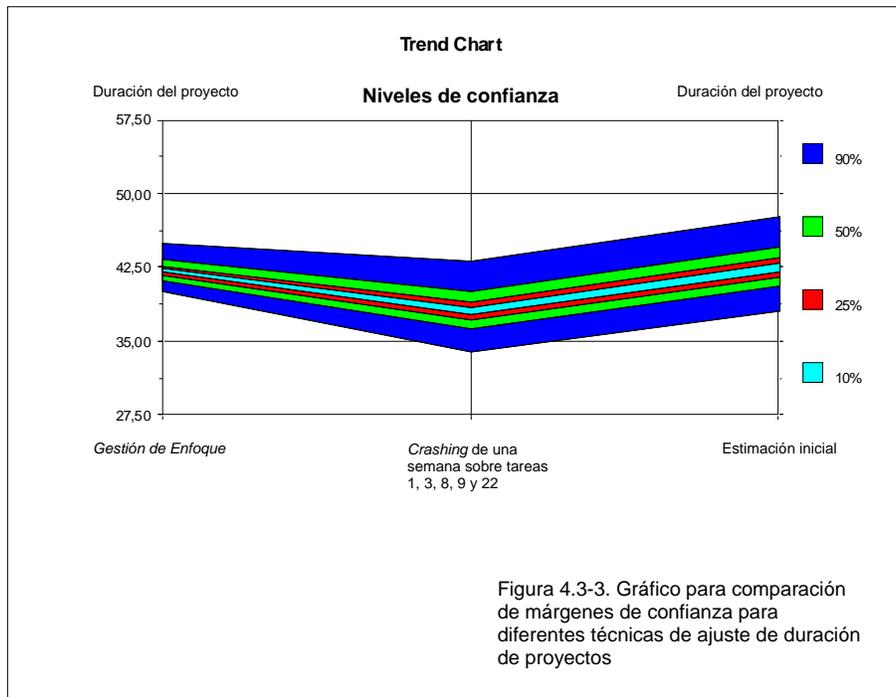


Figura 4.3-2. Comparación en probabilidad de duración de proyecto para diferentes técnicas de acortamiento de plazos.

Al realizar crashing de actividades, se reducen los valores medios de las actividades pero, generalmente, se mantienen sus dispersiones a menos que las mismas tengan que ver sólo con los recursos. Como se observa, la probabilidad acumulada para la duración del proyecto, se desplaza exactamente y con la misma distribución 5 semanas respecto de la correspondiente al proyecto nominal.

Sin embargo, al compararla con la distribución de probabilidad acumulada para la duración del proyecto aplicando gestión de enfoque, se observa una clara diferencia. Para una probabilidad de finalización de 90% la diferencia entre las duraciones propuestas por ambos métodos es de sólo 2,5 semanas. La gestión de enfoque no ha reducido las medias de las actividades y sin embargo, un *crashing* de 5 semanas en total sobre diferentes actividades del proyecto sólo ha logrado una diferencia de la mitad de ese tiempo cuando el manager quiere asegurar la fecha de finalización con 90% de probabilidad. Cabe aclarar que para un 50% de probabilidad, la diferencia entre la gestión de riesgos y crashing sí corresponde a 5 semanas.

Generalmente el crashing de actividades trae aparejado un costo más alto que aquel implicado en el control y la gestión previa de riesgos. Sin embargo estas técnicas no son excluyentes, pero cada una de ellas se adecua a diferentes situaciones. Por ejemplo, si hay premio a la finalización temprana, invierto principalmente en *crashing* y si hay castigo por demora, invierto más en gestión de riesgos. La figura 4.3-3 presenta un gráfico de niveles de confianza en el cuál puede observarse de diferente forma comparativa los métodos representados en la figura 4.3-2.



Aún realizando el análisis comparativo, existe un aspecto más a resaltar respecto de las diferencias entre hacer *crashing* y gestión de enfoque. Este aspecto se refiere al control durante la ejecución. El efecto del *crashing* sobre la criticidad de las tareas tiende a nivelar los caminos, tendiendo a igualar las probabilidades de ser críticos de los posibles caminos en competencia, esto significa incrementar la rigidez de la red, y consecuentemente la probabilidad de falla en la duración final. A diferencia de ello, la gestión de enfoque incrementa las probabilidades de ser crítico del camino principal, mediante la reducción en la volatilidad de las tareas de enfoque. La tabla 4.3-1 expone numéricamente este hecho. En la misma se han resaltado los caminos de mayor duración para cada caso que acumulan 80% de probabilidad de ser críticos. Como se observa, la aplicación de las técnicas de *crashing* hacen surgir una mayor cantidad de caminos a controlar, dificultando las tareas de control o incluso incrementando su costo, el cuál debería ser considerado al evaluar la alternativa para aplicar dicha técnica.

El uso de *crashing* como herramienta de gestión, propone un amplio tema para el análisis que excede a este documento y ha sido sujeto de extensos estudios en el área de la gestión de proyectos. Aquí solo se ha propuesto un análisis de sus características y aptitudes respecto de la *gestión de enfoque*.

Camino	Actividades en el camino	Probabilidad de ser crítico	Probabilidad de ser crítico (Gestión de Enfoque)	Probabilidad de ser crítico (<i>Crashing</i>)
1	1-3-8-9-10-16-17-18-21-22	50,7%	61,5%	35,6%
2	1-3-8-9-10-16-14-15-21-22	18,5%	18,1%	13,6%
3	1-3-8-9-10-11-14-15-21-22	11,4%	8,7%	8,3%
4	1-3-8-9-10-16-14-20-22	5,5%	4,6%	4,3%
5	1-3-4-5-10-16-17-18-21-22	4,7%	2,2%	17,1%
6	1-3-8-9-10-11-14-20-22	4,1%	2,7%	2,6%
8	1-3-4-5-10-16-14-15-21-22	1,7%	0,6%	7,5%
9	1-3-8-9-10-11-12-22	1,3%	1,0%	1,2%
10	1-3-4-5-10-11-14-15-21-22	0,9%	0,3%	4,0%
12	1-3-8-9-10-19-20-22	0,6%	0,1%	0,3%
13	1-3-4-5-10-16-14-20-22	0,5%	0,2%	1,9%
14	1-3-4-5-10-11-14-20-22	0,2%	0,1%	1,3%
20	1-3-4-5-10-11-12-22	0,1%	0,0%	0,5%
7	1-3-8-9-10-16-17-20-22	0,0%	0,0%	0,0%
11	1-3-6-7-10-16-17-18-21-22	0,0%	0,0%	0,6%
15	1-3-6-7-10-16-14-15-21-22	0,0%	0,0%	0,2%
16	1-2-16-17-18-21-22	0,0%	0,0%	0,2%
17	1-3-4-5-10-16-17-20-22	0,0%	0,0%	0,0%
18	1-3-6-7-10-11-14-15-21-22	0,0%	0,0%	0,1%
19	1-3-6-7-10-16-14-20-22	0,0%	0,0%	0,0%
21	1-2-16-14-15-21-22	0,0%	0,0%	0,1%
22	1-3-4-5-10-19-20-22	0,0%	0,0%	0,2%
23	1-3-6-7-10-11-14-20-22	0,0%	0,0%	0,0%
24	1-2-16-14-20-22	0,0%	0,0%	0,0%
25	1-3-6-7-10-16-17-20-22	0,0%	0,0%	0,0%
26	1-3-6-7-10-11-12-22	0,0%	0,0%	0,0%
27	1-3-6-7-10-19-20-22	0,0%	0,0%	0,0%
28	1-2-16-17-20-22	0,0%	0,0%	0,0%
29	1-2-11-12-22	0,0%	0,0%	0,0%
30	1-2-13-22	0,0%	0,0%	0,0%

Tabla 4.3-1. Comparación para probabilidades de caminos en competencia entre proyecto nominal, aplicando *crashing* y gestión de enfoque.

5. EJECUCION Y CONTROL

Gracias a la identificación de las actividades de enfoque, en la sección 4.2 se ha logrado dar con las 5 actividades que dominan los riesgos de este proyecto. El interrogante que surge entonces es como reducir la variabilidad de dichas actividades. Si bien la acción a tomar sobre cada actividad para cambiar incertidumbres por certezas depende en cada caso de la actividad, el control de la medida tomada juega un rol principal, siendo una de las mejores formas de asegurar las técnicas de mitigación de riesgos planificadas.

5.1. Sincronización⁴

La sincronización se refiere a la coordinación de las actividades *críticas* y *semicríticas* con sus inmediatas precedentes. Dicha coordinación permite la preparación de recursos, reuniones para la presentación de resultados parciales obtenidos en las actividades precedentes y medición de los potenciales riesgos.

La sincronización es un evento que debe ser disparado mediante un avance predeterminado de la actividad precedente más comprometida. La anticipación con que se dispara la sincronización debe ser determinada en función de la preparación que cada actividad requiera. Un aspecto importante de la sincronización es la determinación de la actividad precedente (si es que hubiera más de una) que debe dispararla. Para ello, resulta conveniente el uso de las aproximaciones en la sección 2.4 respecto a las holguras reales entre caminos en competencia.

En este caso, la actividad 1 no posee precedentes por ser la primera, mientras que la 8, 9 y 18 poseen sólo una actividad precedente. El uso de estimación de holguras reales es aplicable sólo en el caso de la actividad 16, que tiene como precedentes a la actividad 2 como un camino y a la actividad 10, 9, 8 y 3 formando otras de las ramas. Haciendo uso de las expresiones (10) y (11),

$$\begin{aligned}\mu &= (2+6+3+1)-(5) = 7 \\ \sigma &= \sqrt{(0,44+1,78+1,36+0,25)+(1)} = 2,198\end{aligned}$$

Con lo cuál se obtiene una probabilidad de inversión de caminos menor al 0,1%. Esto permite establecer que será la actividad 10 (que es la actividad crítica) la que dispare el proceso de sincronización con la actividad 16 sin necesidad de considerar adicionalmente la actividad 2.

⁴ Concepto de sincronización desarrollado a partir de referencia [18]

5.2. Seguimiento con estimación continua

La propuesta de seguimiento con estimación continua es una herramienta gráfica, que haciendo uso del camino crítico, asiste en las decisiones de mitigación de riesgos y asignación de recursos.

El seguimiento con estimación continua hace uso de las aproximaciones PERT y del camino crítico original, registrando el avance y haciendo uso de nueva información a medida que avanza el proyecto y finaliza cada tarea dentro del camino crítico. Para ello debe primero confeccionarse una tabla como la presentada en la tabla 5.2-1.

Actividad completa	$-2,5\sigma$	μ est restante	$+2,5\sigma$
INICIO	-7,73	42	7,73
Actividad 1	-7,44	34	7,44
Actividad 3	-7,25	32	7,25
Actividad 8	-6,44	26	6,44
Actividad 9	-5,74	23	5,74
Actividad 10	-5,61	22	5,61
Actividad 16	-4,51	17	4,51
Actividad 17	-4,43	15	4,43
Actividad 18	-1,50	5	1,50
Actividad 21	-1,25	3	1,25
Actividad 22	0,00	0	0,00

Tabla 5.2-1. Duraciones y desvíos estándar estimados para cada paso del proyecto.

La tabla 5.2-1 presenta las estimaciones en cuanto a duraciones esperadas a la finalización de proyecto y desvíos estándar. Se ha considerado 2,5 desvíos estándar para concentrar casi el 99% de probabilidad bajo el supuesto de distribución Normal (lo cuál puede presentar alguna discrepancia en la estimación, sobre todo en el final).

La tabla se construye, asumiendo que las actividades en la primera columna han finalizado, y en la segunda columna la duración media que ha de esperarse desde ese punto hasta el final del proyecto y su desvío. De esta forma se descartan todas las actividades que hasta ese momento se consideran concluidas para la estimación de la media y los desvíos. Una vez completada la tabla, *a medida que el proyecto va avanzado* y que cada actividad se va completando, *se suma la duración restante esperada* al día de proyecto actual y se estiman los límites de confianza con los desvíos. De esta forma se construye una serie de gráficos de control como los presentados en la figura 5.2-1.

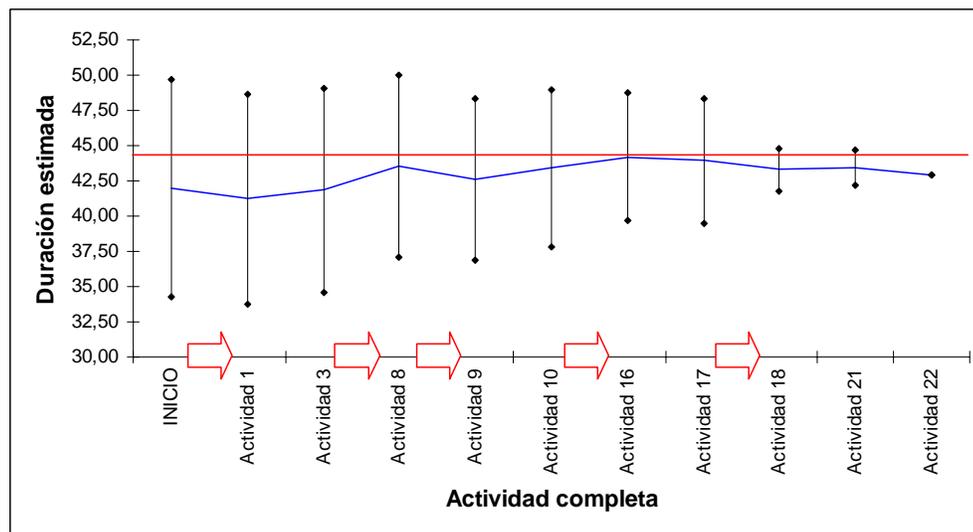
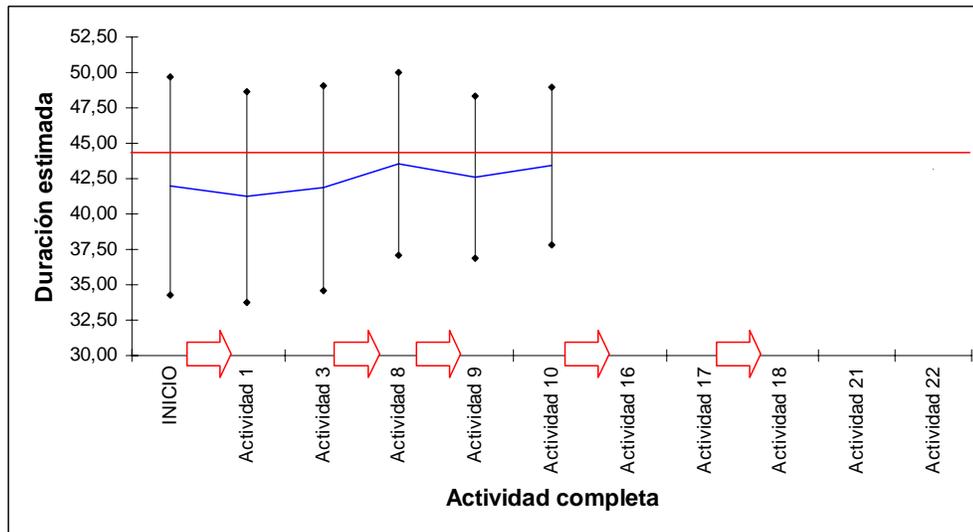
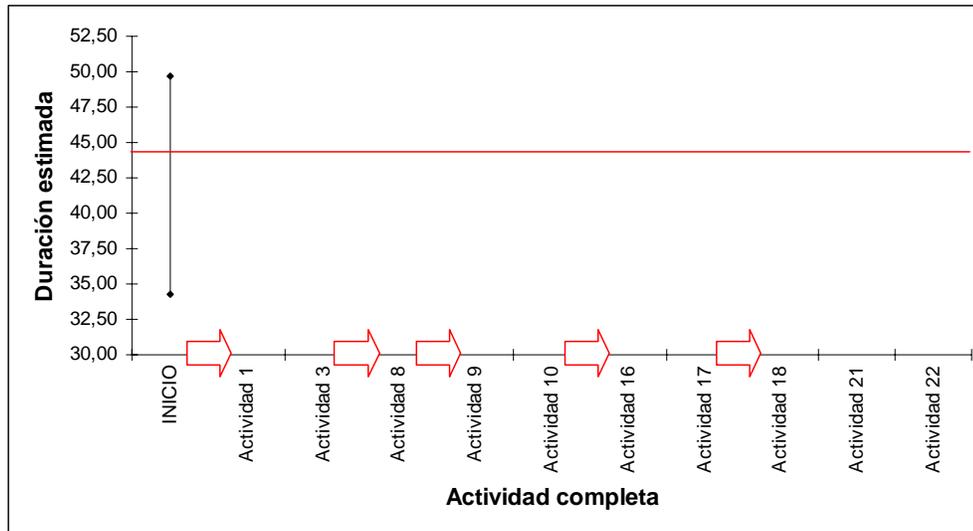


Figura 5.2-1. Evolución de gráfico de control para seguimiento con estimación continua..

En el gráfico de la figura 5.2-1 se ha representado como sería la evolución de un gráfico de control y seguimiento para todo el proyecto. En el eje X, se plantean las fechas de control (y las actividades completadas), mientras que en el eje Y se presenta el tiempo estimado para finalizar el proyecto. La línea roja que cruza los 44 días representa la fecha de entrega preestablecida. Se sabe que si se mantiene lo suficientemente estables las variabilidades de las actividades de enfoque, esta fecha puede lograrse mediante un control apropiado. A tales efectos, en el eje X se han dispuesto flechas de color rojo antes del comienzo de una tarea a la que se ha clasificado como actividad de enfoque. Las barras de estimación se calculan con el tiempo desde el inicio de proyecto a la semana actual, sumado a la duración esperada (línea azul en el gráfico de barras) y la altura total de la barra se construye con los desvíos estándar estimados en la tabla 5.2-1.

La gráfica permite tomar decisiones sobre la marcha y anticiparse acerca de las actividades de mayor riesgo, así como redefinir la estimación de la fecha de finalización a medida que el proyecto avanza.

Por ejemplo, si la línea de media esperada (línea azul) se desplazara por sobre la línea roja (*deadline*) se sabe que no se alcanzará la fecha estimada de finalización con sólo reducir riesgos sino que hará falta reducir valores medios estimados para las actividades (realizar *crashing*). En cambio si la media estimada se mantiene por debajo de la línea roja, será suficiente con actuar sobre las actividades de enfoque.

Como el método se apoya sobre el control del camino crítico original, hace falta tomar una acción secundaria además del gráfico de control. Esta consiste en asignar el mismo tipo de control de seguimiento sobre los potenciales caminos críticos que se han hallado mediante los índices de criticidad (actividades semicríticas) y la simulación de la red, presentados en las tablas 3.3.4-2 y 3.3.3-1, los cuáles incorporan a las actividades 11, 14 y 15.

5.3. Planes de contingencia

Para llevar adelante la reducción de riesgos sobre cada actividad, resulta conveniente elaborar planes específicos para cada una de las actividades que se han identificado como actividades de enfoque.

Un plan de reducción de riesgos, puede consistir en la preparación de más recursos, reuniones de definición de objetivos o diferentes actividades de

acuerdo a la actividad que concierne. **Sin importar en que consista el plan, lo crítico es que sea ejecutado a tiempo.**

La figura 5.3-1 presenta las diferentes etapas de la planificación para contingencias (corrección de errores imprevistos) sobre una actividad en particular. En este aspecto, cabe recordar que la distribución de probabilidad de duración de una tarea incluye y pondera los potenciales riesgos que la misma pueda sufrir, por lo que un retraso por sobre la moda sugiere la acción de alguna de las causas de riesgos identificada al momento de definir la distribución de probabilidad para la tarea. Adicionalmente, la planificación de mitigación de riesgos debería asegurar la finalización de la tarea para su valor modal. Asimismo, en la figura se ha integrado el concepto de planificación de contingencia junto con el de sincronización desarrollado en la sección 5.1.

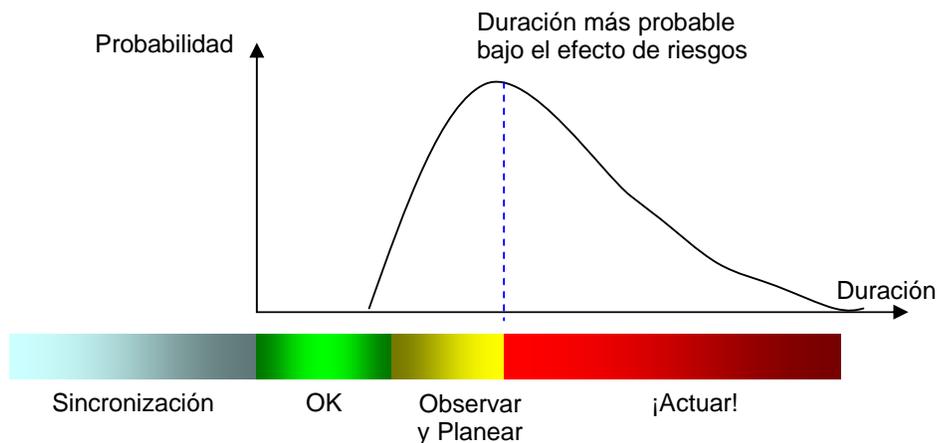


Figura 4.3.3-1. Etapas de la planificación de riesgo sobre una actividad de enfoque.

El control por etapas sobre las actividades de enfoque y la planificación para contingencias es una herramienta útil para evitar retrasos imprevistos. Además, la acción temprana de contingencia de riesgo (apenas pasada la duración modal) minimiza el efecto de la ley de Parkinson que postula que “El tiempo de una tarea se expande hasta llegar a la duración que le es permitida”. Sin embargo, ninguna acción tiene efecto inmediato y en la duración de cada etapa (en particular el período para Observar y planear) deberá considerarse el período que demora la acción de contingencia en causar efecto.



6. CONCLUSIONES

Este documento plantea como objetivo, el estudio de la gestión de la incertidumbre en la conducción de proyectos y en su desarrollo. Se han presentado diversas herramientas y técnicas mediante las cuáles puede analizarse y gestionarse una red de proyectos basada en el método PERT. El propósito de estas conclusiones es proyectar las mismas sobre el proceso de gestión de proyectos, reafirmando lo expuesto y clarificando cuándo debe hacerse uso de cada una de las herramientas, recordando que el desarrollo de este trabajo se ha centrado sobre aquellos proyectos en donde el tiempo es mucho más importante que el costo.

El líder de proyecto generalmente dispone del conjunto de actividades que conforman el proyecto y una fecha de entrega límite. Aplicando adecuadamente las herramientas desarrolladas, es posible llevar la ejecución del mismo a una resolución satisfactoria.

El uso de simulación es uno de los factores comunes empleados para índices de criticidad, caminos en competencia e índices de contribución a la varianza. La ventaja del empleo de simulación es su versatilidad y la gran cantidad de información que provee de la red. Sin embargo su uso puede ser costoso o dificultoso en proyectos de relativa envergadura o muy ajustados en el tiempo, por lo que se han planteado alternativas analíticas, que permiten la aplicación de los conceptos de gestión de riesgos a través del de cálculos (las herramientas descritas, técnica PNET y varianzas en los coeficientes de holgura PERT) sin necesidad de simular.

Siempre que los recursos, el tiempo de planificación lo permitan y la complejidad de la red lo justifique, el uso de simulación brinda información más completa y conveniente para mejorar la gestión del proyecto.

La **gestión de enfoque**, el método para control y ejecución propuesto en este documento, hace uso de las herramientas desarrolladas tomando ventajas de un mayor conocimiento de la red.

El uso de los índices de contribución a la varianza, aplicando el principio de Pareto, permite una rápida identificación de las **actividades de enfoque**. Las actividades de enfoque son aquellas en las cuáles *los riesgos que las afectan y el impacto que causan en la red, las priorizan por sobre el resto*. La priorización de riesgos es el primer paso hacia una gestión de *Risk Management* exitosa.

Figuera Andú aporta a través de la consideración de la varianza de las holguras y cálculos de riesgos de inversión, una herramienta necesaria para hacer de la sincronización de actividades, una técnica de mitigación de riesgos. La estimación de los riesgos de inversión permite establecer claras pautas acerca de las tareas que deben activar la sincronización de las actividades de enfoque. La prevención de inversiones en la duración de los caminos concurrentes, mejora la sincronización permitiendo mitigar riesgos de actividades antes de que las mismas comiencen y evitando los altos costos que generalmente implican los planes de contingencia. Además, el identificar las actividades que tienen importante probabilidad de convertirse en críticas, permite incorporarlas al conjunto de tareas que definen la varianza total del proyecto, mejorando el análisis económico de sistemas de premios y sanciones en la contratación de proyectos.

La aproximación Normal propuesta por el método PERT sobre el camino crítico original resulta la base de la técnica de seguimiento con estimación continua. El gráfico de control que propone esta técnica proporciona en una sola imagen importante información para la toma de decisiones sobre la marcha.

El cálculo de probabilidades para los caminos en competencia complementa esta técnica, sometiendo a un control adicional aquellos caminos con alto riesgo de convertirse en críticos. Adicionalmente, la identificación de caminos independientes en la red, por medio de la técnica PNET, permite elaborar planes de contingencia para los previsibles sesgos originados por el desplazamiento de la probabilidad de finalización hacia una distribución Lognormal.

Los índices de criticidad de las actividades resultan de considerable importancia para el mejor aprovechamiento de técnicas de *crashing*. Ante desvíos de la media estimada de finalización registrados en el gráfico de control por sobre las fechas de lanzamiento, la reprogramación de *crashing* de actividades sobre tareas con altos índices de criticidad aseguran su impacto en el resultado final.

Por último, la elaboración y el correcto *timing* previsto para las actividades de enfoque de los planes de contingencia, terminan de dar sustento a la gestión de enfoque. Incluso con las varianzas bajo control, los planes de reducción de riesgos y su accionamiento temprano, aminoran el impacto de la Ley de Parkinson, dando mayor sustento para una resolución exitosa.

La utilización de la *Gestión de Enfoque* propone un método para la ejecución y control que, haciendo uso de un profundo conocimiento de la red de proyecto,

permite alcanzar fechas tempranas con mayor precisión. La ventaja de esta técnica radica en su alcance y flexibilidad, ya que se *aplica durante la planificación* (identificando las tareas que deben ser aseguradas, y definiendo las acciones que permitan reducir su varianza), *en la programación del proyecto* (asignando las fechas de ejecución de estas tareas y las que la red sugiera en paralelo de manera de minimizar competencias por recursos, sin afectar el proyecto en su conjunto) y *sobre su ejecución y control* (accionando las contingencias ya planificadas para asegurar las fechas previstas). Su empleo en proyectos donde el tiempo de finalización es una variable clave, puede maximizar los beneficios y mejorar el rendimiento de los recursos de *management* empleados, en particular en ambientes de múltiples proyectos.



7. BIBLIOGRAFIA

1. Van Slyke, R.M. 1963. *Monte Carlo methods and the PERT problem*. Operations Research, 13: 141-143.
2. Goldratt, E. M. 1984. *La Meta, un proceso de mejora continua*. Editorial Díaz de Santos.
3. Port, O., Schiller, Z., King, R.W. 1990. *A Smarter way to Manufacture*, Business Week, no. 3157: 110-117.
4. Kopelman, O. 1997. *Projects at warp speed with QRPD: The definitive guidebook to Quality Rapid Product Development*. Global Brain, Inc. Palo Alto, CA, USA.
5. Ries A., Trout J. 1996. *Las 22 leyes inmutables del Marketing*. Editorial McGraw Hill.
6. Goldratt, E. M. 1997. *Cadena Crítica, una novela empresarial sobre la gestión de proyectos*. Editorial Díaz de Santos.
7. Nádas, A. 1978. *Probabilistic PERT*, IBM Data Systems Division laboratory, East Fishkill, New York.
8. Robillard, P., Trahan, M. 1977. *The completion time of PERT Networks*, Operations Research, 25: 15-29.
9. Van Dorp, J.R., Duffy, M.R. 1999. *Statistical dependence in Risk Analysis for Project Networks using Monte Carlo Methods*, International Journal of Production Economics 58: 17-29.
10. Berleant, D., Zhang, J., Sheblé, G. 2004. *Activity Networks and Uncertainty Quantification: 2nd order probability for solving graphs of concurrent and sequential tasks*, Department of Electrical and Computer Engineering, Iowa State University.
11. Singleton, S.C. 2003. *Critical Activities in PERT Networks*, INCOSE-LA Mini-Conference.
12. Hillier F. S., Lieberman G.J. 2001. *Investigación de Operaciones*, Séptima Edición. Editorial McGraw Hill.
13. Roberts B., Frost D., Smith C. 2003. *Risk-based support techniques for Programs and Projects*.
14. Figuera Andú J. 1966. *PERT-CPM-ROY: Apéndice II*. Editorial S.A.E.T.A.
15. Lane D. 1999. *Hyperstat*. Editorial Atomic Dog Publishing.
16. Ioannou P. G, Martinez J.C. 1998. *Project Scheduling using state-based probabilistic decision networks*. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference.
17. Tamborero del Pino J. M., Cejalvo Lapeña A. 1995. *NTP 418: Fiabilidad: la distribución lognormal*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España.

18. Patrick F. S. 2001. *Critical Chain and Risk Management, Protecting Project Value from Uncertainty*. Focused Performance, Hillsborough, NJ, USA.