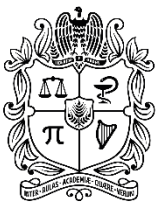


UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Modelo de solución al problema de programación de proyectos de desarrollo de nuevos productos con recursos restringidos, inserción de tareas y duración aleatoria

Solution model to the resource constrained project scheduling problem RCPSP with insertion task and random duration

Néstor Raúl Ortiz Pimiento

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2020

Modelo de solución al problema de programación de proyectos de desarrollo de nuevos productos con recursos restringidos, inserción de tareas y duración aleatoria

Solution model to the resource constrained project scheduling problem RCPSP with insertion task and random duration

Néstor Raúl Ortiz Pimiento

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Doctor en Ingeniería Área de Sistemas e Informática

Director:

Francisco Javier Diaz Serna, PhD.

Línea de Investigación:

Investigación de Operaciones

Grupo de Investigación:

UNGIDO

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2020

.

A mi familia:

Adriana, mi querida esposa. Te convertiste en la persona más importante de mi vida. Siempre pendiente de mis asuntos para ayudarme y aconsejarme. Doy gracias a Dios por conocerte y porque compartes tu vida conmigo.

Andrés Felipe y Sophia, mis amados hijos. Con ustedes hemos disfrutado momentos inolvidables, hemos crecido como familia y hemos comprendido el verdadero sentido del amor. Doy gracias a Dios por tenerlos a nuestro lado.

Agradecimientos

Esta tesis doctoral es el resultado del proceso de formación que inicié hace cuatro años en la Universidad Nacional de Colombia, y que se encuentra ligado a mi graduación como magíster en ingeniería hace 12 años. Desde ese momento, fue creciendo mi interés hacia la investigación teórica y aplicada, lo cual me ha permitido participar en diferentes proyectos orientados a mejorar el nivel de formación académica de mis alumnos en la Universidad Industrial de Santander.

Por esta razón, quiero expresar mi agradecimiento al Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, a sus profesores y especialmente al profesor Francisco Javier Diaz Serna, director de mi trabajo de investigación, quién con su acertada orientación y valiosos comentarios, me permitió avanzar sin tropiezos en el desarrollo de mi tesis.

De otra parte, agradezco inmensamente el apoyo que la Universidad Industrial de Santander me ha brindado desde que fue aprobada mi comisión de estudios. El apoyo no solo puede verse desde el punto de vista financiero, sino también desde lo administrativo, ya que debo reconocer el valioso acompañamiento que me brindaron los funcionarios de la universidad durante mi comisión.

Finalmente, agradezco a mi familia porque constituyen el eje fundamental de mi vida, son ellos mi principal fuente de motivación, y siempre han apoyado mis proyectos.

.

Resumen

En esta tesis doctoral, se desarrolla un modelo de optimización como estrategia de solución al problema de programación de proyectos de desarrollo de nuevos productos. Teniendo en cuenta que este tipo de proyectos son afectados por diversos riesgos que al materializarse pueden afectar la ejecución normal de las actividades y sus plazos de finalización, se ha optado por modelar el problema dentro de un contexto probabilístico y tomando como referente el problema de programación de proyectos con recursos restringidos (Resource Constrained Project Scheduling Problem: RCPSP). El RCPSP adoptado incluye como parámetros: la duración aleatoria de las actividades y la probabilidad de insertar tareas adicionales en la red del proyecto.

El modelo de optimización desarrollado en esta investigación contempla cuatro etapas: la identificación de los riesgos, la estimación de la duración de las actividades a partir de cuatro procedimientos basados en duraciones redundantes, la resolución de un programa lineal entero que genera las líneas-base del proyecto, y la selección de la mejor línea-base evaluada por medio de dos indicadores de robustez. Con el fin de aplicar el modelo propuesto, se presenta un caso de estudio que hace referencia al desarrollo de un material para el marco de conexión de un circuito integrado.

En el modelo desarrollado se destacan dos aportes fundamentales: la integración de un análisis detallado de riesgos del proyecto con un modelo de optimización que genera una línea-base robusta, y la adaptación del RCPSP con duración aleatoria de actividades e inserción de tareas al caso de proyectos de desarrollo de nuevos productos.

Palabras clave: Programación de proyectos; desarrollo de nuevos productos; duración aleatoria; línea-base del proyecto; análisis de riesgos; indicador de robustez.

Abstract

In this doctoral thesis, an optimization model is developed in order to provide a solution strategy to the scheduling problem in new product development projects. This projects face diferent risks that affect the normal execution of activities and their due date. Therefore, the problem has been analyzed as a resource-constrained project scheduling problem (RCPSP) under a probabilistic context. Specifically, it includes parameters like the random duration of the activities and the probability of inserting additional tasks in the project network.

The optimization model developed in this research has four stages: the identification of risks, the estimation of the activities duration from four redundancy based methods, the resolution of an integer linear program in order to generate the project baselines, and the selection of the best baseline through two robustness indicators. A case study to applied the proposed model is presented, which refers to the development of a leadframe material for a semiconductor package.

In the developed model, two fundamental contributions are hightlighted: the integration of a detail project's risks analysis with an optimization model that generate a robust baseline, and the adaptation of the RCPSP with random duration of activities and stochastic insertion tasks to the case of new product development project.

Keywords: Project scheduling; new product development; random duration; project baseline; risk analysis; robustness indicator.

Contenido

Pág.

Resumen IX

Lista de figuras XIII

Lista de tablas XV

Introducción 1

1. El problema de programación de proyectos con recursos restringidos 5
1.1 Introducción 5
1.2 Programación de proyectos con recursos restringidos determinístico 6
1.3 Programación de proyectos con recursos restringidos no determinístico 10
1.3.1 Programación predictiva, proactiva y reactiva 11
1.3.2 Medidas de robustez 13
1.4 Complejidad del problema de programación de proyectos con recursos restringidos 14
1.5 Algoritmo de ramificación y acotamiento en problemas de programación de proyectos con recursos restringidos 16
1.6 Consideraciones especiales al programar proyectos de desarrollo de nuevos productos 20
1.7 Conclusiones 23

2. Revisión de la literatura relevante 25
2.1 Introducción 25
2.2 Programación de proyectos con recursos restringidos determinístico 25
2.3 Programación de proyectos con recursos restringidos no determinístico 29
2.4 Programación de proyectos con recursos restringidos y duración de actividades aleatoria 31
2.5 Métodos de solución basados en duraciones redundantes 32
2.6 Programación de proyectos de desarrollo de nuevos productos 35
2.7 Conclusiones 38

3. El problema de investigación 39
3.1 Descripción del problema de investigación 39
3.2 Justificación de la investigación 40
3.3 Objetivos de la investigación 42
3.3.1 Objetivo general 42
3.3.2 Objetivos específicos 42

4. Modelo de optimización propuesto para resolver el RCPSP con duración aleatoria e inserción de tareas 43
4.1 Introducción..... 43
4.2 Etapas del modelo..... 44
4.2.1 Identificación de riesgos 44
4.2.2 Cálculo de la duración estimada de las actividades a partir de procedimientos alternativos 45
4.2.3 Obtención de las líneas-base generadas a partir de cada procedimiento. 48
4.2.4 Selección de la mejor línea-base para el proyecto 50
4.3 Conclusión..... 53

5. Caso de estudio 55
5.1 Introducción..... 55
5.2 Proceso de encapsulado de un circuito electrónico..... 55
5.3 Descripción general del proyecto..... 57
5.4 Conclusión..... 63

6. Aplicación del modelo propuesto 65
6.1 Introducción..... 65
6.2 No inclusión de nuevas actividades.....66
6.3 Inserción total de nuevas actividades..... 68
6.4 Inserción parcial de nuevas actividades..... 71
6.5 Análisis de resultados..... 73
6.6 Conclusión..... 75

7. Conclusiones y trabajo futuro 77
7.1 Conclusiones..... 77
7.2 Trabajo futuro..... 81

A. Anexo: Complejidad de la red que soporta el modelo propuesto 83

B. Anexo: Cantidad de escenarios simulados en la etapa 4 del modelo propuesto..... 87

Bibliografía 93

Lista de figuras

Pág.

Figura 2-1: Versiones del RCPSP determinístico abordados en la literatura científica durante la última década. 26
Figura 2-2: Publicaciones anuales del RCPSP no determinístico. 29
Figura 2-3: Versiones del RCPSP no determinístico abordados en la literatura científica desde 1996..... 30
Figura 3-1: Análisis detallado de riesgos para las actividades del proyecto. 41
Figura 5-1: Diagrama de red del caso de estudio..... 59
Figura 5-2: Precedencias ficticias. 60

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1: Técnicas de solución del RCPSP determinístico empleadas durante la última década. 26
Tabla 2-2: Técnicas de solución del RCPSP no determinístico desde 1996. 30
Tabla 4-1: Cuadro de riesgos para las actividades 45
Tabla 5-1: Lista de actividades del proyecto de desarrollo de un nuevo material para el marco de conexión de un circuito integrado. 58
Tabla 5-2: Lista de riesgos y duración de las tareas extra que pueden producirse. 60
Tabla 5-3: Cuadro de riesgos para las actividades del proyecto 61
Tabla 5-4: Lista de actividades y recursos requeridos. 62
Tabla 6-1: Duración estimada a partir de cada procedimiento en caso de no incluir las nuevas actividades (en semanas). 66
Tabla 6-2: Semana de inicio obtenida para cada procedimiento en caso de no incluir las nuevas actividades. 67
Tabla 6-3: Duración estimada a partir de cada procedimiento para el caso de inserción total de nuevas actividades (en semanas). 69
Tabla 6-4: Semana de inicio obtenida para cada procedimiento en el caso de inserción total de nuevas actividades. 70
Tabla 6-5: Duración estimada a partir de cada procedimiento para el caso de inserción parcial de nuevas actividades. 71
Tabla 6-6: Semana de inicio obtenida para cada procedimiento en el caso de inserción parcial de nuevas actividades. 72
Tabla 6-7: Robustez de la solución (SR) para cada procedimiento y cada alternativa de inserción de nuevas actividades. 73
Tabla 6-8: Robustez de la calidad (QR) para cada procedimiento y cada alternativa de inserción de nuevas actividades. 74

Introducción

El proceso de desarrollo de nuevos productos es un tema de gran interés y centro de atención para investigadores de diferentes áreas académicas. Los aportes más frecuentes en la literatura están relacionados con el diseño de modelos de gestión y la aplicación de técnicas que buscan reducir el tiempo de desarrollo del producto.

La programación de este tipo de proyectos se dificulta debido a la gran cantidad de eventos no planeados que suelen aparecer cuando se materializa un riesgo y cuyo impacto altera la duración de las actividades, obligando a reprogramar la línea-base del proyecto, e incluso, a insertar nuevas actividades.

En esta tesis doctoral, se ha analizado la programación en proyectos de desarrollo de nuevos productos, y se ha considerado al problema de programación de proyectos con recursos restringidos (RCPSP) como una referencia adecuada para abordar dicho análisis.

Tradicionalmente, el RCPSP ha sido resuelto teniendo en cuenta parámetros de entrada determinísticos. Sin embargo, este enfoque solo es aplicable cuando parámetros como la disponibilidad y la cantidad de recursos a utilizar, los costos involucrados o la duración de las actividades son asumidos como valores fijos.

El enfoque determinístico del RCPSP no aplica para los proyectos de desarrollo de nuevos productos, ya que en el desarrollo de sus actividades pueden aparecer circunstancias imprevistas. Por lo tanto, este tipo de proyectos debe ser analizado como un problema no determinístico y sus parámetros de entrada deben ser modelados bajo un contexto probabilístico o de incertidumbre, por ejemplo, empleando funciones de probabilidad, números difusos u otro tipo de representación para la incertidumbre.

En esta tesis, el RCPSP es analizado bajo un contexto probabilístico, ya que la duración de las actividades y los impactos de los posibles riesgos se representan a través de

distribuciones de probabilidad. Además, la probabilidad de inserción de nuevas actividades a la red del proyecto constituye un parámetro adicional. Por lo tanto, el problema se denomina RCPSP con duración aleatoria de actividades e inserción de tareas.

El modelo de optimización desarrollado contempla cuatro etapas que buscan generar una línea-base robusta para el problema de programación de proyectos: en la primera etapa, son identificados los riesgos y sus impactos; en la segunda, la duración de las actividades es estimada a partir de cuatro procedimientos basados en duraciones redundantes; en la tercera, se resuelve un programa lineal entero para generar líneas-base alternativas del proyecto; y en la cuarta, es seleccionada la mejor línea-base a partir de dos indicadores de robustez.

La etapa dos del modelo es flexible, ya que cualquier procedimiento basado en duraciones redundantes puede ser utilizado para estimar la duración. La etapa cuatro, contempla un proceso de simulación mediante la técnica de Monte Carlo, el cual permite calcular los indicadores de robustez requeridos para seleccionar la mejor línea-base. En dicho proceso de simulación son generados 10000 posibles escenarios de ejecución del proyecto.

Como proyecto de referencia para aplicar el modelo de optimización propuesto, fue utilizado un caso de estudio que describe el desarrollo de un material para el marco de conexión de un circuito integrado.

Esta tesis doctoral ha sido organizada de la siguiente manera: en el primer capítulo se presenta el marco teórico relacionado con el RCPSP, abordando el caso determinístico y el no determinístico; además se hace énfasis en la representación probabilística del problema. En este mismo capítulo son analizadas las características básicas de los proyectos de desarrollo de nuevos productos, y se describe brevemente el algoritmo de ramificación y acotamiento, por ser la técnica de solución mediante la cual se obtiene una solución al problema, en esta tesis.

En el segundo capítulo se presenta la revisión de la literatura científica relevante para la investigación, de tal forma que los aspectos más destacados en la última década en torno al RCPSP determinístico son analizados al iniciar dicho capítulo. De manera similar, el capítulo contempla un breve análisis de la actividad científica desde 1996 en torno al RCPS

no determinístico. Adicionalmente, se incluye una breve descripción de los principales artículos que abordan los procedimientos basados en duraciones redundantes y aquellos que tratan el problema de programación en proyectos de desarrollo de nuevos productos.

En el tercer capítulo se plantea el problema de investigación y los objetivos propuestos, a los cuales se les da cumplimiento a partir del capítulo 4, en donde se describe el modelo desarrollado para resolver el RCPSP con duración aleatoria de actividades e inserción de tareas enfocado al caso de desarrollo de nuevos productos. Luego, en el capítulo 5 se presenta un caso de estudio tomado de la literatura científica y adaptado de acuerdo con los propósitos de esta investigación.

Posteriormente, en el capítulo 6 es aplicado el modelo de optimización al caso de estudio planteado. El capítulo es subdividido en tres secciones con el fin de analizar tres alternativas que podrían emplearse para insertar nuevas actividades en la red del proyecto. Al terminar el capítulo, las líneas-base obtenidas se comparan y se selecciona aquella que posea el mejor desempeño con base en dos indicadores de robustez, conocidos como *robustez de la solución* y *robustez de la calidad*.

Al finalizar este documento, se presentan las conclusiones de la investigación y se indican los diversos temas que podrán dar origen a nuevos proyectos de investigación.

1. El problema de programación de proyectos con recursos restringidos

1.1 Introducción

Planear y secuenciar las actividades de un proyecto ha sido siempre una necesidad para las organizaciones. El control de los proyectos por medio de gráficos inicia en 1896 cuando Karol Adamiecki diseña un modelo básico conocido como el harmonograf (Weaver, 2006), pero en los siguientes años, la versión que alcanzó mayor popularidad en occidente fue la que presentó Henry Laurence Gantt a principios del siglo XX (Behnam, Harfield, & Kenley, 2016).

La programación de actividades a través de un modelo de red se dio a conocer a finales de la década de 1950, con las técnicas CPM y PERT. A partir de este momento, fueron continuos y numerosos los aportes en este tema. El problema de programación de proyectos (Project Scheduling Problem -PSP-) busca generar una línea-base para el proyecto y para ello resulta indispensable conocer las relaciones de precedencia entre las actividades.

A partir del PSP surge una nueva versión conocida como el problema de programación de proyectos con recursos restringidos (Resource Constrained Project Scheduling Problem -RCPSP-) el cual no solo tiene en cuenta las restricciones de precedencia entre actividades, sino también la cantidad de recursos que consume cada una de ellas durante el proyecto. De acuerdo con (Błażewicz, Ecker, Pesch, Schmidt, & Weglarz, 2007), los recursos pueden clasificarse como recursos renovables (horas-hombre, tiempo disponible de maquinaria o equipos, entre otros, los cuales están disponibles cada vez que inicia un nuevo periodo de tiempo), recursos no renovables (materiales requeridos o dinero, ya que están disponibles para el proyecto global y pueden consumirse en cualquier momento siempre y cuando no excedan el límite máximo), y los recursos doblemente restringidos (que cumplen

simultáneamente las dos consideraciones anteriores. El dinero podría cumplir esta condición si además de la disponibilidad presupuestal total es asignado un presupuesto máximo por periodo de tiempo).

A continuación, se amplía la información sobre el RCPSP, se describen dos enfoques de análisis: el determinístico y el no determinístico, y se hace referencia al algoritmo de ramificación y acotamiento por ser la técnica de solución seleccionada para resolver el problema de optimización presentado en esta tesis.

El algoritmo de ramificación y acotamiento fue seleccionado para resolver el programa lineal entero presentado en la etapa tres del modelo desarrollado, teniendo en cuenta que el caso de estudio planteado no supera las 60 actividades y por lo tanto puede obtenerse una solución óptima válida para los parámetros de entrada ingresados (duración estimada de las actividades del proyecto). El algoritmo ha sido ampliamente utilizado para producir soluciones exactas a los problemas de optimización NP-hard (Morrison, Jacobson, Sauppe, & Sewell, 2016), como es el caso del RCPSP.

1.2 Programación de proyectos con recursos restringidos determinístico

El RCPSP busca organizar las actividades de un proyecto con el fin de obtener una secuencia que minimice su duración total, teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos, la duración de las actividades y sus precedencias. En la formulación del modelo de optimización se definen n actividades o tareas, las cuales son identificadas por un subíndice (*i* o *j*) con valores entre 1 y n. Por razones prácticas de programación, la primera y la última actividad se representan como actividades ficticias con duración cero. El horizonte temporal de planeación se divide en períodos parciales que se representan mediante un subíndice (t) con valores entre 1 y T. T es el límite superior para la duración total del proyecto, y en esta tesis, fue obtenido sumando la duración de todas las actividades.

En cada periodo de tiempo, cada actividad i consume r_{ik} unidades del recurso renovable k. La cantidad máxima del recurso renovable k disponible para cada periodo de tiempo t está definida como RW_{kt}. Algunos modelos matemáticos también incluyen recursos no renovables y recursos parcialmente renovables, tal y como puede ser consultado en (Böttcher, Drexl, Kolisch, & Salewski, 2008).

El RCPSP puede ser expresado como un programa lineal entero mixto (Palpant, Artigues, & Michelon, 2004):

$$Minimize \quad S_n \tag{1.1}$$

Sujeto a:

$$S_j \geq S_i + d_i \qquad \forall (i,j) \in E \tag{1.2}$$

$$\sum_{i \in A(t)} r_{ik} \leq RW_{kt} \qquad \forall k, \forall t \tag{1.3}$$

$$S_i \geq 0 \qquad \forall i \tag{1.4}$$

Donde S_i representa el periodo de inicio de cada actividad i, y d_i su duración. Las restricciones indican lo siguiente:

- La restricción (1.2) establece los tiempos de inicio para cada actividad j teniendo en cuenta los tiempos de inicio y la duración de las actividades precedentes. Por su parte, *E* representa el conjunto de actividades y sus precedencias.

- La restricción (1.3) hace referencia a la restricción de recursos renovables, ya que impide que las *actividades activas* en un periodo t, superen la cantidad disponible de recursos tipo k.

- La restricción (1.4) indica que los tiempos de inicio son variables continuas no negativas.

La restricción de recursos expresada en (1.3) no corresponde realmente a una fórmula matemática, ya que allí se hace referencia a diferentes conjuntos de actividades A(t) que comparten recursos y pueden ser programadas simultáneamente en cada periodo t. Por

esta razón, las restricciones que se derivan de esta restricción general deben contener variables de decisión adicionales que permiten evaluar la conveniencia de programar una actividad i en el periodo t. Una interesante clasificación relacionada con los principales esquemas de formulación matemática basadas en programación lineal entera y entera-mixta, puede consultarse en (Artigues, Koné, Lopez, & Mongeau, 2015).

Las formulaciones matemáticas que sólo emplean variables de decisión enteras se conocen como formulaciones en tiempo-discreto o formulaciones indexadas en el tiempo. En este caso, las variables de decisión (S_i) son definidas como variables enteras, y las variables que evalúan la conveniencia de programar una actividad i en el momento t son definidas variables binarias (A_{it}). De acuerdo con (Artigues et al., 2015), estas variables binarias pueden ser de tres tipos (*pulse start, start step*, y *on/off variables*), y generan formulaciones en tiempo discreto diferentes.

Una variable tipo *pulse start* será igual a 1 solamente si en el instante t la actividad i inicia su ejecución ($t = S_i$), en caso contrario será cero ($t \neq S_i$).

Una variable tipo *start step* será igual a 1 a partir del periodo en que la actividad i sea programada ($t \geq S_i$), en caso contrario será cero ($t < S_i$).

Finalmente, una variable tipo *on/off* será igual a 1 desde el periodo t en que inicia su ejecución hasta su finalización ($S_i \leq t \leq S_i+d_i$), en caso contrario será cero: ($t < S_i$) y ($t > S_i+d_i$). La formulación matemática propuesta en esta tesis doctoral (ver numeral 4.2.3) corresponde a una formulación en tiempo discreto e incorpora una variable on/off. Sin embargo, difiere de la formulación presentada por (Artigues et al., 2015).

De otra parte, es importante mencionar algunas variantes del problema de programación de proyectos con recursos restringidos (RCPSP). Las variantes más conocidas son:

El problema multi-objetivo de programación de proyectos con recursos restringidos, en donde además de las restricciones de recursos y de precedencias, la generación de la línea-base depende de dos o más objetivos que deben optimizarse simultáneamente.

El problema multi-modo de programación de proyectos con recursos restringidos (MRCPSP), brinda la posibilidad de realizar de forma diferente cada una de las actividades del proyecto. En este caso, el problema de optimización generará una línea-base e indicará la forma más adecuada para ejecutar cada actividad.

El problema de programación con recursos restringidos y múltiples proyectos (RCMPSP), en donde se debe generar una línea-base que tenga en cuenta en forma simultánea los recursos que deben ser compartidos por todas las actividades de los proyectos analizados.

El problema de programación de proyectos con recursos restringidos e inserción de tareas (RCPSP-TI), en donde se analiza la posibilidad de incluir nuevas actividades o tareas a un proyecto en curso. Esta situación se presenta cuando aparecen imprevistos o eventualidades que obligan al gerente de proyectos a modificar el cronograma original. Este tipo de problema es más frecuente de lo que podría pensarse y es una característica presente en los proyectos de desarrollo de nuevos productos.

Además de lo anterior, es muy frecuente encontrar modelos matemáticos para resolver problemas de programación de proyectos que combinan algunas de las categorías anteriores, como por ejemplo el problema simultáneo multi-modo y multi-objetivo con recursos restringidos.

De otra parte, vale la pena mencionar que existen dos tipos adicionales de problemas relacionados con la programación de proyectos, el problema de nivelación de recursos (*project resource leveling problem*) y el problema de compensación tiempo costo (*time/cost trade-off problem*).

En general, los modelos de optimización propuestos en la literatura científica para resolver el RCPSP persiguen objetivos como los siguientes: minimizar la duración del proyecto (makespan), minimizar el costo del proyecto, o maximizar el Valor Presente Neto (VPN).

1.3 Programación de proyectos con recursos restringidos no determinístico

Tradicionalmente, los modelos construidos para resolver el RCPSP tienen un enfoque determinístico, en donde parámetros como la disponibilidad y la cantidad de recursos a utilizar, los costos involucrados o la duración de las actividades son asumidos como valores fijos. Sin embargo, cada vez es más frecuente la construcción de modelos con enfoque no determinístico, los cuales incorporan comportamientos aleatorios o inciertos en dichos parámetros de entrada del modelo.

En el caso de proyectos de desarrollo de nuevos productos, el enfoque determinístico del RCPSP no siempre es aplicable debido a que las actividades suelen desarrollarse en un entorno dinámico, cambiante, y sujeto a riesgos cuyo impacto es difícil de predecir. Por esta razón, es más apropiado analizar este tipo de proyectos bajo un contexto probabilístico o de incertidumbre. En el primer caso es utilizada una distribución de probabilidad para predecir el valor de cada uno de los parámetros del modelo y generar múltiples escenarios. En este caso, es de suponer que un gerente de proyecto dispone de información histórica o de datos de proyectos similares, o debe contar con la asesoría de personal de amplia experiencia, lo cual le permite identificar el tipo de distribución de probabilidad más adecuado para representar cada parámetro del modelo matemático.

En caso de no poseer dicha información, es necesario trabajar bajo un contexto de incertidumbre, en donde los parámetros del modelo pueden ser representados a partir de *números difusos* o empleando un *intervalo de incertidumbre*. Un *número difuso* se encuentra representado por una función que indica el grado de pertenencia de ciertos valores al parámetro analizado. Los números difusos más comunes son los triangulares (descritos a partir de tres valores numéricos) y los trapezoidales (descritos a partir de cuatro valores numéricos). La formulación matemática bajo esta representación es de tipo determinista y tiene una restricción por cada valor numérico que representa al parámetro difuso.

De otra parte, aunque no es frecuente emplear *intervalos de incertidumbre* para representar los parámetros no determinísticos del RCPSP, en (Bruni, Pugliese, Beraldi, & Guerriero, 2018) un modelo de optimización basado en la técnica de descomposición de Benders, selecciona en cada iteración un valor para la duración de las actividades. Este valor es obtenido al resolver el subproblema que contiene una función matemática asociada a un percentil definido previamente por el tomador de decisiones.

El modelo matemático presentado en esta tesis ha sido analizado dentro de un contexto probabilístico, ya que representa la duración de las actividades, los impactos de los posibles riesgos de un proyecto, y la aparición de actividades adicionales a las planeadas originalmente, por medio de distribuciones de probabilidad.

En el enfoque no determinístico se analiza el RCPSP tomando como referencia las estrategias de programación descritas en la siguiente sección.

1.3.1 Programación predictiva, proactiva y reactiva

Los procedimientos para abordar el RCPSP no determinístico se diseñan con base en estrategias predictivas, reactivas o proactivas. Según (Brčić, Kalpic, & Fertalj, 2012), una estrategia *predictiva* no tiene en cuenta el riesgo que afecta la duración de las actividades, y establece una línea-base tomando como referente parámetros determinísticos como el valor esperado de la duración de las actividades. En todo caso, el problema es resuelto como un problema determinístico.

A diferencia del caso anterior, un procedimiento de solución *proactivo* incorpora el riesgo dentro del modelo matemático con el fin de generar una línea-base robusta para el proyecto. Una línea-base puede considerarse robusta cuando los tiempos de inicio resultantes para cada actividad requieren pocos ajustes al aparecer las disrupciones que afectan su duración. Dentro de este enfoque se pueden agrupar tres tipos de solución (Brčić et al., 2012): los métodos basados en duraciones redundantes (*redundancy based methods*), los métodos de programación robusta (*robust scheduling methods*), y los métodos de programación contingente (*contingent scheduling*).

- Los métodos basados en duraciones redundantes (*redundancy based methods*), buscan proveer tiempo adicional a las actividades, de tal forma que sirvan de soporte para enfrentar las eventualidades que puedan aparecer, evitando así el incumplimiento en la fecha de finalización del proyecto. Este tiempo extra o protección adicional se incorpora de dos formas: extendiendo la duración original de cada actividad o insertando amortiguadores de tiempo (*buffers*) en sitios estratégicos de la red del proyecto. En ambas situaciones se hace necesario analizar los riesgos potenciales del proyecto y cuantificar su impacto.

- La estrategia proactiva basada en métodos de programación robusta (*robust scheduling methods*) proponen una línea-base para el proyecto, la cual ha sido previamente evaluada por medio de una función objetivo que busca optimizar alguna medida de robustez. La robustez de una solución puede evaluarse por medio de diversas medidas propuestas en la literatura científica (Van De Vonder, Demeulemeester, Herroelen, & Leus, 2006). La medida de robustez más común consiste en minimizar las diferencias entre los tiempos de inicio de las actividades que hacen parte de la línea-base del proyecto (tiempos de inicio planeados) y los tiempos de inicio reales.

- La estrategia basada en métodos de programación contingente (*contingent scheduling*) genera más de una línea-base para el proyecto, las cuales han sido creadas con base en las diferentes alternativas de riesgo. En este caso, las disrupciones son analizadas previamente y se crea una línea-base para cada posibilidad, de tal forma que se contará con planes de acción alternativos durante la ejecución del proyecto.

Finalmente, la programación *reactiva* es aquella que permite secuenciar las actividades justo en el momento en que se ejecuta el proyecto, lo cual indica que la generación de una línea-base no es obligatoria para su realización. Existen dos tipos de programación reactiva: la programación on-line y la programación reparadora de la línea-base. El primer caso (programación reactiva on-line) hace referencia a algoritmos que no tienen en cuenta una línea-base generada con anterioridad. Este tipo de programación ordena las actividades del proyecto a partir de un proceso de toma de decisiones por etapas, el cual

es soportado en políticas que permiten seleccionar las actividades a programar en cada una de las etapas del horizonte de planeación. El segundo caso, hace referencia a algoritmos que guían el proceso de ajuste de la línea-base generada por algún procedimiento predictivo o proactivo; por lo tanto, dependiendo del origen de la línea-base, estos procedimientos se conocen como programaciones *predictivas-reactivas* o programaciones *proactivas-reactivas*.

1.3.2 Medidas de robustez

La programación proactiva-reactiva evalúa el desempeño de la línea-base propuesta a partir de un análisis que permite medir su capacidad para enfrentar las disrupciones que afectan al proyecto y ponen en riesgo el cumplimiento de los plazos fijados. En este contexto aparece el concepto de *línea-base robusta*, definida como aquella que requiere pocos ajustes cada vez que surgen eventos no planeados.

A partir del trabajo de (Leon, Wu, & Storer, 1994), Herroelen y Leus (Herroelen & Leus, 2004) desarrollaron un modelo para resolver el *Project Scheduling Problem* y obtener una solución robusta utilizando como medida de robustez la desviación ponderada esperada (*expected weighted deviation*) de los tiempos de inicio planeados y los realmente ejecutados. Podría decirse que esta medida es una de las más utilizadas para evaluar la robustez de las líneas-base generadas por los algoritmos de optimización.

Diversas medidas de robustez han sido diseñadas con el fin de evaluar el desempeño de los algoritmos propuestos para resolver el RCPSP con duración de actividades no determinística. Las dos medidas más comunes son: la robustez de calidad (*quality robustness*) y la robustez de la solución (*solution robustness*). La *robustez de la calidad* hace referencia a la capacidad que tiene la línea-base para soportar las disrupciones en torno a la duración total del proyecto. De otra parte, la *robustez de la solución* analiza la capacidad de la línea-base para soportar las disrupciones que afectan los tiempos de inicio de cada una de las actividades (Van De Vonder, Demeulemeester, Herroelen, & Leus, 2005).

La programación robusta hace referencia a una solución factible que tiene una desviación mínima con relación al valor óptimo de cada uno de los escenarios generados por los

parámetros aleatorios del modelo. Teniendo en cuenta esta premisa, el concepto de robustez implica comparar una línea-base con varios escenarios de ejecución; por esta razón, se hace necesario aplicar una estrategia de programación reactiva que ajuste la línea-base propuesta y pueda ser evaluada en varios escenarios de ejecución (creados a partir de un proceso de simulación).

Adicionalmente, diversos autores han diseñado medidas indirectas de robustez, algunas de ellas basadas en los tiempos de holgura de las actividades del proyecto (Chtourou & Haouari, 2008; Hazir, Haouari, & Erel, 2010; Xiong, Liu, Chen, & Abbass, 2011).

1.4 Complejidad del problema de programación de proyectos con recursos restringidos

El RCPSP es uno de los problemas más comunes en literatura científica relacionada con Scheduling y es considerado como un problema NP-hard (Hartmann, 1999; Klein, 2000; Artigues, Demassey, & Néron, 2008). El esfuerzo computacional requerido para dar solución a este tipo de problemas es elevado, ya que un algoritmo polinomial no determinista (NP) no puede ejecutarse en tiempo polinomial. La complejidad del RCPSP se incrementa a medida que crece el número de actividades que tiene la red del proyecto.

Sin embargo, el número de actividades no es el único factor que influye en la complejidad del problema. Algunos factores adicionales son:

- Recursos analizados: Al incrementarse el número de recursos analizados, aumenta la posibilidad de generar conflicto entre actividades que originalmente podían ser programadas en forma simultánea.
- Disponibilidad de los recursos: Un recurso renovable escaso limita el número de actividades programadas en el mismo periodo de tiempo. Al igual que en el caso anterior, el espacio de soluciones factibles se reduce.
- Complejidad de la red del proyecto: No solo la cantidad de relaciones de precedencia que exista entre las actividades, sino la ubicación de dichas relaciones influye en el tiempo requerido para encontrar una solución al problema.

Los indicadores de complejidad más conocidos asociados a los factores descritos anteriormente son:

- Complejidad de la red (NC). Este indicador compara las redes de proyectos teniendo en cuenta la relación entre el número de precedencias no redundantes y el número de actividades. En (Browning & Yassine, 2010) se presentan diferentes fórmulas para calcular este indicador.
- Índice de complejidad (CI). Se define como el número mínimo de procedimientos de reducción necesarios para simplificar una red de proyecto acíclica. Los procedimientos de reducción pueden ser de nodo, reducción en serie y reducción en paralelo. En (De Reyck & Herroelen, 1996) son descritos estos procedimientos.
- Factor de Recursos (RF). Este indicador refleja el nivel de dependencia entre actividades y tipo de recursos: si RF=1, cada actividad requiere todos los tipos de recurso, pero si RF=0, las actividades no requieren ningún tipo de recurso. En (Kolisch, Sprecher, & Drexl, 1995) es presentada la ecuación que permite calcular este valor.
- Intensidad de los recursos. Este indicador evalúa cada tipo de recurso, y establece la relación entre el total de recurso disponible y la cantidad promedio requerida por actividad. El proceso de cálculo del indicador también puede ser consultado en (Kolisch et al., 1995).

Un análisis detallado de los anteriores indicadores de complejidad es descrito en (Morillo, Moreno, & Díaz, 2014b).

La complejidad del RCPSP no determinístico está ligada a los mismos factores asociados al RCPSP determinístico. Sin embargo, debido a que los parámetros del problema pueden asumir cualquier valor dentro de un rango previamente definido, el proceso de solución debe contemplar el análisis de múltiples escenarios, cada uno de ellos con una solución determinística propia. Esta condición implica que a medida que el número de escenarios analizados se incrementa, es más difícil encontrar una solución adecuada al problema.

Factores adicionales como la localización de las actividades y la correlación entre los riesgos que afectan un proyecto, pueden aumentar la complejidad del RCPSP no determinístico:

- Localización de las actividades: En este caso, la búsqueda de una solución adecuada al problema se dificulta cuando las actividades con mayor grado de incertidumbre hacen parte de algún camino que es considerado crítico para el proyecto (ruta crítica o caminos alternos con holguras pequeñas).
- Correlación entre riesgos que afectan las actividades: Es evidente que la aparición de un riesgo puede afectar la duración de una o más actividades. Sin embargo, cuando un riesgo se encuentra correlacionado con otros, es de esperar un impacto adicional en la duración de un nuevo grupo de actividades. De tal forma, que existe una relación directa entre el número de riesgos correlacionados entre sí, y la complejidad del problema.

Hasta el momento no se han reportado en la literatura científica indicadores de complejidad exclusivos para el RCPSP no determinístico.

1.5 Algoritmo de ramificación y acotamiento en problemas de programación de proyectos con recursos restringidos

Los problemas de Programación Entera, con variables de decisión que sólo toman valores enteros, pueden formularse de la misma manera que los problemas de programación lineal, pero agregando la condición de entera para las variables que lo requieran.

Cuando las variables pueden ser cero o uno, se habla de programación binaria; y cuando solo algunas de variables pueden tomar valores enteros o binarios, se habla de programación entera-mixta.

El RCPSP al ser formulado con un programa lineal entero o entero-mixto, puede ser resuelto por medio del algoritmo de ramificación y acotamiento. Este algoritmo permite obtener la solución óptima de un problema a partir de un proceso iterativo durante el cual se va restringiendo el espacio de búsqueda de la solución.

La complejidad en la estructura de este tipo de problemas de Programación Lineal Entera-Mixta puede hacer lento el proceso de búsqueda de soluciones óptimas debido

principalmente a que la técnica de ramificación y acotamiento requiere gran cantidad de tiempo y esfuerzo computacional. Sin embargo, el desarrollo de técnicas complementarias y el mejoramiento de los equipos de procesamiento facilitan cada día más el proceso matemático de optimización. Actualmente el RCPSP puede ser resuelto con facilidad en redes de proyecto de hasta 60 actividades (Morillo, Moreno, & Díaz, 2014a), lo cual resulta conveniente para resolver el caso de estudio presentado en el capítulo 5.

El algoritmo de ramificación y acotamiento esquematiza las posibles soluciones del problema por medio de un diagrama de árbol, en donde cada rama representa un posible grupo de soluciones que debe ser analizado. Cada rama es evaluada con el fin de analizar si es posible encontrar allí una opción de solución; en caso de no ser así, la rama se elimina (se poda) y el proceso de búsqueda de soluciones continúa por otra rama con mejores opciones de solución. En cada etapa del proceso de ramificación es resuelto un programa lineal que acepta soluciones con variables continuas. Sin embargo, debido a la cantidad de ramas que son generadas dentro del proceso iterativo, el esfuerzo computacional se incrementa enormemente y el algoritmo se hace lento y en algunos casos imposible de manejar.

Los dos principios básicos del algoritmo son los siguientes: no hace falta enumerar todas las soluciones posibles, ya que se pueden eliminar las ramas dominadas; una rama puede eliminarse si se demuestra que no contiene una solución factible que sea mejor que otra solución obtenida con anterioridad. La descripción detallada del algoritmo de ramificación y acotamiento puede consultarse en cualquier libro de investigación de operaciones. También existe una versión del algoritmo orientado a la selección de conjuntos con características óptimas, propuesto originalmente por (Narendra & Fukunaga, 1977) y utilizado ampliamente en problemas de secuenciación de tareas.

Cuando la duración de las tareas $\tilde{d}_i$ es representada mediante números difusos, el programa lineal entero original se transforma en un programa lineal entero determinístico, como consecuencia, la cantidad de restricciones se incrementa porque tienen en cuenta el conjunto de valores utilizados para representar cada duración difusa. El programa lineal entero equivalente es resuelto por métodos exactos tradicionales como el algoritmo de ramificación y acotamiento, y la solución es expresada nuevamente como un número difuso.

Cuando la duración de las tareas $\tilde{d}_i$ es representada por medio de una distribución de probabilidad, el problema lineal entero original se convierte en un programa lineal entero estocástico. Este tipo de problema tiene al menos cuatro alternativas de solución:

i. Estimar una duración determinística para cada actividad del proyecto tomando como referencia el valor esperado y adicionando un tiempo extra con el fin de soportar las disrupciones durante la ejecución del proyecto. Una vez fijados estos valores, es posible obtener la línea-base resolviendo el problema determinístico (por medio del método de ramificación y acotamiento o por otros métodos).

   Otra opción para adicionar tiempo extra consiste en no asignarlo a las actividades individuales, en vez de eso, obtener varios buffers de alimentación (al final de los caminos que no pertenezcan a la ruta crítica) y un buffer al final de la ruta crítica (buffer del proyecto). Para lograrlo, se puede formular y resolver un problema lineal entero-mixto que tenga en cuenta parámetros como el valor esperado para la duración de cada actividad, los recursos requeridos, las precedencias entre actividades y la fecha de entrega del proyecto. Las variables de decisión serían: el tiempo de inicio de cada actividad, el tamaño de los buffers, y su ubicación. Al formular el programa lineal, puede incluirse dentro de la función objetivo una penalización asociada al incumplimiento en la fecha acordada para la culminación del proyecto.

ii. Emplear técnicas de Montecarlo para generar aleatoriamente la duración de las actividades a partir de sus distribuciones de probabilidad. Cada vez que se realice el proceso de simulación se genera un escenario que contiene la duración de cada una de las actividades del proyecto. Los valores generados constituyen el parámetro de entrada para resolver un programa lineal entero determinístico que calcula la duración óptima del proyecto para el escenario simulado. Este proceso se repetirá una y otra vez, hasta que se decida detener la generación de escenarios. Esta alternativa de solución no propone una línea-base que indique el momento de inicio de cada una de las actividades. Sin embargo, a partir de la información generada puede construirse

una distribución de probabilidad que representa el Makespan o duración total del proyecto.

iii. Resolver un problema lineal entero determinístico, en donde el valor que asume cada duración $\tilde{d}_i$, corresponde al percentil fijado por el tomador de decisiones. Este tipo de formulación se conoce como programación estocástica con restricciones al azar (Muñoz Martos, Cerdá, & Caballero, 1998). Una vez formulado el problema en su versión determinística, se puede emplear el algoritmo de ramificación y acotamiento (o cualquier otro método) para obtener la programación de actividades que constituye la línea-base del proyecto y que asegura el nivel de cumplimiento fijado en las restricciones probabilísticas.

En problemas con un enfoque financiero es posible evaluar objetivos diferentes al costo total del proyecto o al VPN, tal y como lo propusieron (Song, Kang, Zhang, & Xi, 2018) al definir una *función objetivo* que busca minimizar el *Valor en Riesgo Condicional* (CVaR). El CVaR permite cuantificar la pérdida de dinero teniendo en cuenta el percentil fijado por el tomador de decisiones, lo cual implica que el modelo matemático tiene una estructura similar al empleado en programación estocástica.

iv. Dividir el problema en problemas más pequeños. La descomposición y solución de un problema de gran tamaño puede llevarse a cabo a partir de diversas estrategias, tales como: descomposición de Dantzing-Wolfe, relajación Lagrangeana, o los algoritmos basados en cortes de Benders. A continuación, se explica una versión del algoritmo de Benders, propuesta por (Bruni, Puglia, Beraldi, & Guerriero, 2017): El RCPSP se convierte en dos problemas lineales de menor tamaño: el problema maestro y el sub-problema. El problema maestro se encarga de optimizar la utilización de recursos del proyecto, mientras que el sub-problema se encarga de minimizar la duración total del proyecto. El problema maestro contiene las restricciones de recursos y el sub-problema las restricciones de precedencia. Sin embargo, se hace necesario enlazar ambos problemas, y para lograrlo, en la función objetivo del problema maestro se incluye una variable adicional y un grupo de restricciones conocidas como cortes de optimalidad, que provienen del sub-problema. A grandes rasgos, el proceso de solución es el siguiente: 1) Se resuelve el problema maestro, que inicialmente no contiene ningún corte de optimalidad, 2) esta solución se convierte en un parámetro de entrada para el

sub-problema, 3) Se resuelve el sub-problema bajo un escenario generado aleatoriamente para la duración, y se genera un corte de optimalidad para incorporarlo al problema maestro, 4) se resuelve el problema maestro, y finalmente, 5) se repite el proceso. El algoritmo finaliza cuando converjan los parámetros que se originan al interactuar el problema maestro y el sub-problema.

1.6 Consideraciones especiales al programar proyectos de desarrollo de nuevos productos

Minimizar el tiempo que transcurre entre la generación de ideas y la puesta en el mercado de un nuevo producto (*time to market*) es, hoy en día, un reto estratégico para aquellas empresas que son conscientes del entorno económico cada vez más complejo, dinámico y competitivo en el cual se desenvuelven.

La secuenciación de actividades en este tipo de proyectos se convierte en una necesidad básica para las organizaciones. Sin embargo, esta programación no resulta fácil debido a la gran cantidad de eventos no planeados (riesgos del proyecto) que suelen aparecer y cuyo impacto puede afectar directamente la línea-base provocando desviaciones en la programación original. Por esta razón, dentro del proceso de desarrollo de nuevos productos es necesario llevar a cabo un análisis detallado de los riesgos del proyecto, de tal forma que sus impactos puedan ser soportados por la línea-base generada.

(Park & Park, 2010), hace referencia a dos tipos de riesgos frecuentemente mencionados en la literatura científica: los riesgos internos, que pueden clasificarse en riesgos operacionales, tecnológicos y organizativos, y los riesgos externos, como el riesgo del mercado y el riesgo de proveedores.

Dentro de la categoría *riesgos operacionales*, se mencionan aquellos que producen variaciones en la calidad del producto, en el costo de producción, en el tiempo de desarrollo, en recursos humanos, y en la productividad. Entre los *riesgos tecnológicos* se mencionan las dificultades técnicas, las habilidades de aprendizaje, y los cambios tecnológicos. Como *riesgos organizativos* aparece el cambio en los requerimientos del

proyecto, el cambio en los miembros del equipo de trabajo, el cambio en las prioridades organizativas, el cambio en el compromiso de la gerencia y los conflictos internos de la organización.

Los *riesgos del mercado* incluyen el cambio en las necesidades del cliente, el tamaño y crecimiento del mercado, las estrategias de la competencia, y los cambios en las condiciones económicas o sociales. Finalmente, como *riesgo de proveedores* se menciona la confiabilidad de los proveedores, la variación en el costo de las partes que componen el producto, la variación en la calidad, el incumplimiento en los tiempos de producción de los componentes del producto, y los cambios en las relaciones con los proveedores.

Los riesgos mencionados anteriormente impactan en mayor o menor grado las actividades del proyecto. Por lo tanto, una posible agrupación de los riesgos según su impacto en la línea-base es la siguiente:

- **Riesgos que impactan globalmente al proyecto y pueden ocurrir en cualquier momento**. En este caso la red del proyecto debe insertar actividades o tareas adicionales en alguna parte del cronograma (el lugar exacto no puede definirse con anterioridad). Un ejemplo de esta situación ocurre cuando los competidores lanzan al mercado un producto similar o igual al diseñado por la empresa y como consecuencia deben incluirse nuevas tareas tendientes a ajustar o reformular el concepto original del producto.

- **Riesgos que impactan la duración de las actividades del proyecto**. Este es el caso más común en la literatura científica, y ocurre cuando una actividad es afectada por eventos no planeados que al interrumpirla ponen en riesgo el cumplimiento de su fecha de finalización y los tiempos de inicio de las actividades posteriores.

- **Riesgo de inserción de nuevas tareas**. A diferencia del caso anterior, aquí aparece una nueva tarea como consecuencia de un resultado no deseado en la actividad precedente (Por ejemplo, la realización de una prueba especializada adicional que permitiría decidir sobre la continuidad del proyecto). En esta situación, se tiene la ventaja de conocer con certeza la ubicación de la actividad donde podría ocurrir la disrupción y en consecuencia el lugar exacto donde debe ser insertada la nueva tarea.

- **Riesgos que generan bucles o ciclos**. En proyectos de desarrollo de nuevos productos podría ser necesaria la repetición de una prueba de producto, la cual se ejecutaría una y otra vez, hasta que el resultado sea favorable para la continuidad del proyecto.

- **Riesgos que generan la cancelación de un proyecto**. Esta situación se presenta cuando se obtienen resultados desfavorables después de una prueba del producto, o también cuando aparece en el mercado un producto similar o igual al diseñado por la empresa y como consecuencia se decide abandonar el proyecto.

- **Riesgos que generan caminos alternos**. En este caso, el camino o ruta a seguir en la red del proyecto depende del resultado obtenido en una actividad específica, como ocurre con las pruebas de mercado del producto. Dichos caminos deben ser identificados en etapas tempranas del proyecto.

De acuerdo con lo anterior, el modelo de optimización propuesto en esta tesis involucra tres tipos de riesgo: el riesgo que impacta la duración de las actividades, el riesgo de inserción de nuevas tareas, y el riesgo que genera la cancelación del proyecto. Estos tres riesgos se convierten en el foco central de la presente investigación debido a la frecuencia con que suelen aparecer y a que proveen la estructura básica para analizar riesgos en una red de proyecto de desarrollo de nuevos productos.

Adicionalmente, vale la pena mencionar que el riesgo de inserción de nuevas tareas constituye el punto de partida para el análisis de los demás riesgos. Específicamente, puede decirse que:

- Los riesgos que impactan globalmente al proyecto y que pueden ocurrir en cualquier momento, deben ser analizados como un proceso de inserción de un grupo de tareas, que en forma estocástica se incorporan a la red del proyecto.

- Los riesgos que generan bucles o ciclos ocurren porque no son satisfactorios los resultados obtenidos en una prueba, lo cual conlleva a la realización de la misma actividad una y otra vez. Esta situación es similar al proceso de inserción de una nueva tarea, debido a que contempla la probabilidad de fracaso en la prueba y la realización de una actividad adicional, que en este caso es la misma prueba. En este contexto, la red del proyecto resultante corresponde a un grafo de tipo cíclico.

- Por último, los riesgos que generan caminos alternos se basan en el mismo concepto de probabilidad utilizado por el proceso de inserción de tareas. La única diferencia radica en que el proceso básico contempla solo dos opciones: inserción o no inserción de tareas, mientras en este caso, las opciones son múltiples porque dependiendo del resultado probabilístico se selecciona sola una ruta.

Aun cuando el modelo matemático propuesto en esta investigación no incorpora todos los tipos riesgos descritos anteriormente, es claro que el análisis integral debe contemplarse en un estudio posterior.

1.7 Conclusiones

En este capítulo fueron descritas las bases conceptuales del RCPSP, su formulación matemática, las diferentes versiones del problema, y sus enfoques de solución: El enfoque determinístico, que provee soluciones óptimas bajo el supuesto de que los parámetros de entrada (duración, precedencia de actividades, y limitación de recursos) son fijos; y el enfoque no determinístico, que considera los parámetros de entrada como datos probabilísticos o como valores que tienen algún margen de incertidumbre, lo cual incrementa la complejidad del RCPSP. En esta tesis el problema ha sido abordado bajo un entorno probabilístico.

De acuerdo con los conceptos básicos presentados en este capítulo, los algoritmos de solución propuestos en la literatura científica se enmarcan en tres alternativas de programación: *predictiva, proactiva* y *reactiva*; siendo la programación *reactiva* un complemento necesario para las dos primeras. A partir de esta integración, se destaca la programación *proactiva-reactiva*, la cual permite evaluar el desempeño de la línea-base generada en la fase *proactiva* mediante un indicador de robustez.

Teniendo en cuenta que los proyectos de desarrollo de nuevos productos enfrentan diversos tipos de riesgo que pueden afectar la ejecución normal de las actividades y sus plazos de finalización, en esta investigación se ha considerado el RCPSP con duración aleatoria de actividades e inserción de tareas como un referente adecuado para abordar el problema de secuenciación de actividades. Adicionalmente, el modelo de solución propuesto en el capítulo 4 tiene un enfoque de programación *proactiva-reactiva*.

2. Revisión de la literatura relevante

2.1 Introducción

El RCPSP es uno de los problemas más comunes en literatura científica relacionada con *Scheduling*, por lo tanto, existe una amplia variedad de procedimientos y algoritmos que resuelven el problema a partir de diferentes estrategias de optimización.

En esta revisión de literatura se destacan los aportes más destacados de las versiones determinística y no determinística, algunos de ellos provenientes de estudios previos que analizan el estado de arte del problema.

2.2 Programación de proyectos con recursos restringidos determinístico

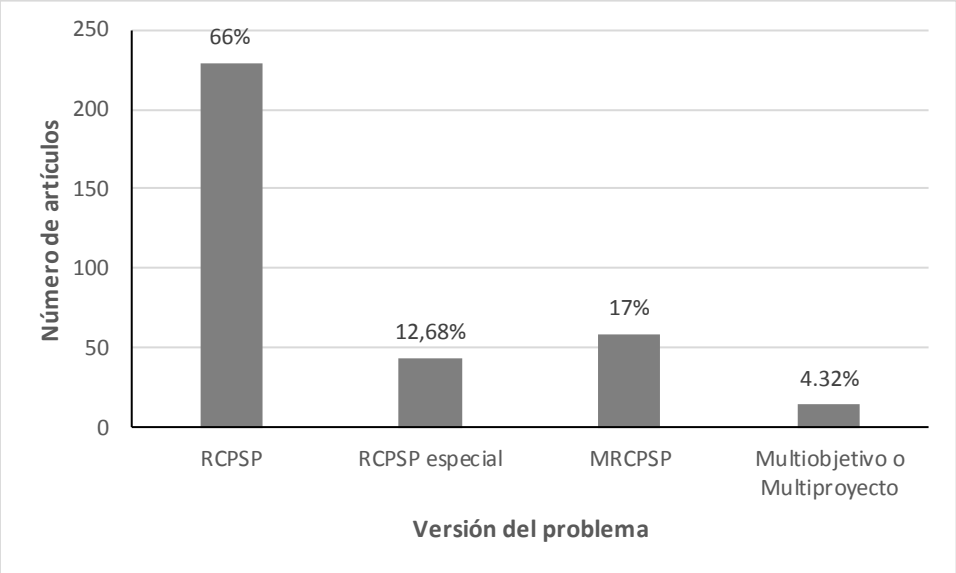
El RCPSP determinístico ha sido un problema ampliamente analizado en la literatura científica, razón por la cual el número de estudios publicados es elevado. Aun cuando el enfoque determinístico no constituye el tema central de esta tesis, es importante presentar algunos análisis importantes con el fin de contextualizar el problema abordado.

A partir de una búsqueda simple de documentos empleando la base de datos Scopus, se pudo establecer que en la última década (de enero de 2009 a diciembre de 2018) fueron publicados 347 documentos, entre los que se encuentran artículos en revistas, ponencias en eventos y capítulos de libros. La mayor parte de las contribuciones corresponden a documentos que proponen algoritmos de solución para el RCPSP básico y el RCPSP con múltiples modos de ejecución (MRCPSP), con un total de 229 (66%) y 59 (17%) casos, respectivamente.

En menor cantidad, tal y como puede apreciarse en la Figura 2-1, aparecen aportes relacionados con las versiones multiobjetivo-multiproyecto (RCMPSP), 15 casos, y con

versiones especiales del RCPSP, 44 casos, como el RCPSP con interrupción de actividades (*Preemptive RCPSP*) y el RCPSP con recursos capaces de desempeñar más de una función (*Multi-skill RCPSP*), entre muchas otras variantes.

Figura 2-1: Versiones del RCPSP determinístico abordados en la literatura científica durante la última década



Fuente: Autor

Adicionalmente se pudo establecer que las metaheurísticas son los algoritmos más utilizados por los autores para dar solución al RCPSP determinístico (ver Tabla 2-1).

Tabla 2-1: Técnicas de solución del RCPSP determinístico empleadas durante la última década.

Tipo de técnica	Número de documentos	Porcentaje
Metaheurísticas	245	70,61%
Métodos heurísticos	44	12,68%
Métodos exactos	36	10,37%
Algoritmos apoyados en *solvers* especiales	22	6,34%
Total	347	100,00%

Fuente: Autor

En el grupo de metaheurísticas, se destacan las metaheurísticas híbridas, los algoritmos genéticos y la optimización por enjambre de partículas. De acuerdo con (Karam & Lazarova-Molnar, 2013), las metaheurísticas híbridas constituyen una tendencia importante al resolver problemas de optimización como el RCPSP. En el proceso de hibridación son aprovechadas las ventajas de las metaheurísticas individuales y son combinadas en un solo procedimiento con el fin de mejorar el desempeño del algoritmo creado. Por lo anterior, vale la pena mencionar la revisión de literatura realizada por (Pellerin, Perrier, & Berthaut, 2019), quienes realizaron un interesante análisis de documentos de los últimos 20 años focalizado en metaheurísticas hibridas. En ese trabajo, se explica la estructura básica de los procesos de hibridación y se identifican las principales metaheurísticas usadas en dichos procesos, las cuales corresponden a algoritmos de búsqueda local (GRASP, búsqueda Tabú, Recocido simulado), algoritmos basados en poblaciones (Optimización por colonia hormigas, Optimización por colonia de abejas, Optimización por enjambre de partículas), y las redes neuronales.

Otras técnicas mencionadas en la Tabla 2-1, hacen referencia a los métodos heurísticos, los métodos exactos, y los algoritmos apoyados en *solvers* especiales. Dentro de los métodos heurísticos se destacan claramente los esquemas generadores de secuencias (SGS) y en menor proporción las reglas de prioridad y la regla de ajuste a la derecha, entre otros. Los métodos exactos representan solo el 10,37% de las contribuciones realizadas por los autores, lo cual puede deberse al alto esfuerzo computacional requerido para obtener soluciones óptimas en problemas de tamaño medio y grande. En este subgrupo se destacan los algoritmos de ramificación y acotamiento, la programación binaria, y la programación entera y entera-mixta.

La explicación de las técnicas mencionadas hasta este momento puede ser consultada en (Morillo et al., 2014a; Morillo et al., 2014b), donde fue realizada una revisión de literatura en torno al RCPSP determinístico. Finalmente, dentro de los algoritmos computacionales apoyados en *solvers* especiales se destaca la programación de restricciones (*constrained programming*), el *Boolean satisfiability (SAT) solver*, y el *lazy clause generation (LCG) solver*.

La descripción de las contribuciones más relevantes para el RCPSP determinístico también pueden ser consultadas en (Kolisch & Hartmann, 2006), quienes realizaron una revisión

de literatura en donde clasifica el RCPSP de acuerdo con las diferentes versiones del problema. La clasificación proporcionada en ese artículo se divide en cinco grupos:

El grupo 1 hace referencia a condiciones especiales relacionadas con las actividades del proyecto. A este grupo pertenece la interrupción de las actividades (*Preemptive RCPSP*), la variación en la cantidad de recursos durante la ejecución de la actividad, el tiempo de alistamiento de algunas actividades (RCPSP with *Setup times*), el MRCPSP, y el problema de compensación tiempo-recurso o tiempo-costo (*Trade-off problems*), entre otros.

El grupo 2 contempla restricciones para las actividades en el horizonte de planeación. Los casos más comunes ocurren cuando son definidos tiempos de espera entre el inicio o finalización de las actividades (*Minimal / Maximal Time Lags*), o cuando se fijan momentos de inicio o fin de las actividades (*Release dates and deadlines*).

En el grupo 3 son contempladas las restricciones relacionadas con el tipo de recurso: renovables, no renovables, parcialmente renovables, o doblemente restringidos, entre otros; mientras que en el grupo 4 se presentan las funciones objetivo más representativas del RCPSP: funciones basadas en el tiempo, en el costo, en el valor presente neto, y funciones con múltiples objetivos, entre otros.

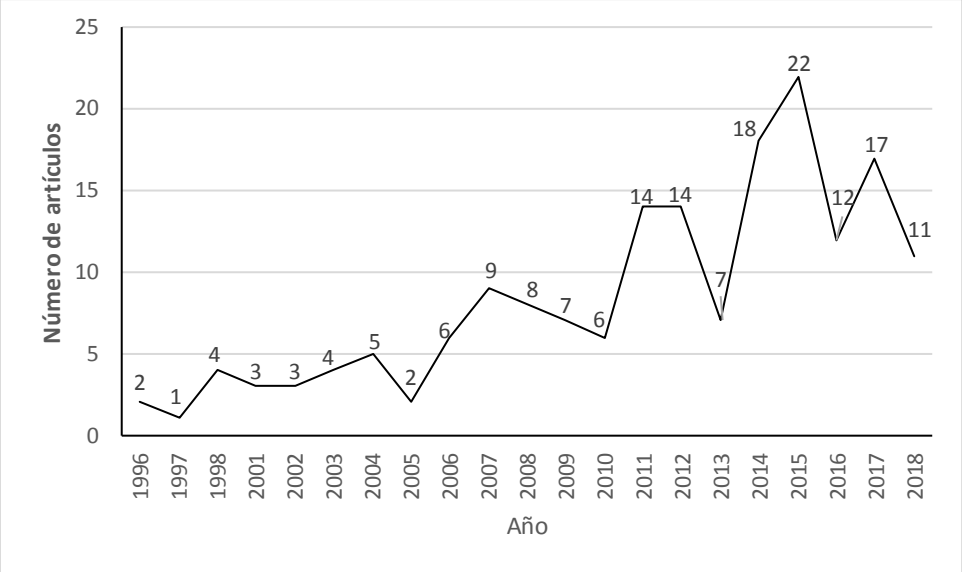
Finalmente, el grupo 5 hace referencia al caso de múltiples proyectos, no sólo analizando el problema de programación, sino también el de selección de proyectos y programación; adicionalmente describe los objetivos más comunes.

(Habibi, Barzinpour, & Sadjadi, 2018) presentaron una versión actualizada de esta clasificación y amplía la revisión de literatura incorporando algunos artículos relacionados con el enfoque no determinístico.

2.3 Programación de proyectos con recursos restringidos no determinístico

Tal y como puede observarse en la Figura 2-2, la incorporación de un enfoque incierto o probabilístico al RCPSP ha sido un tema de creciente interés en el entorno académico. Esta tendencia está basada en el número de artículos, capítulos de libro y ponencias publicados desde enero de 1996 hasta diciembre de 2018.

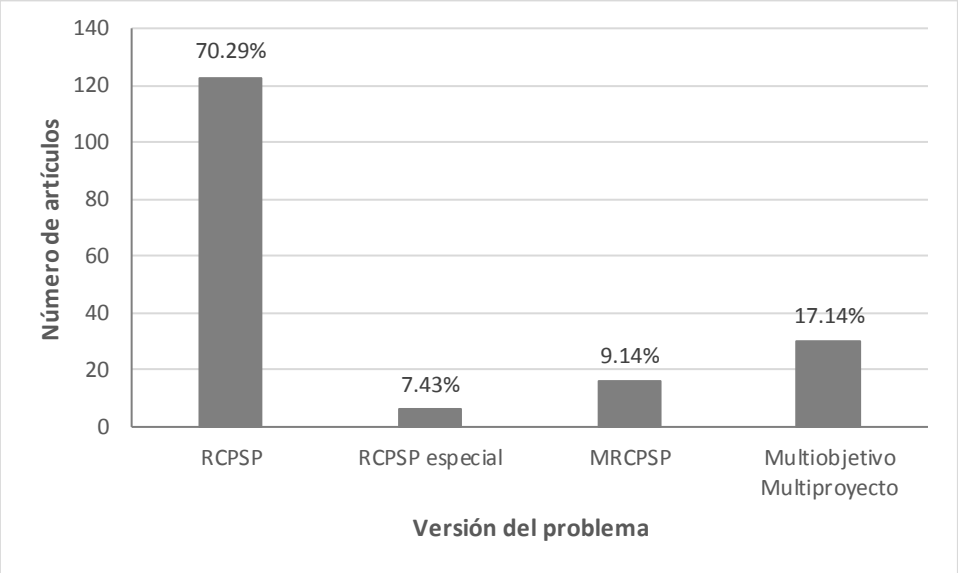
Figura 2-2: Publicaciones anuales del RCPSP no determinístico.



Fuente: Autor

En total han sido publicados 175 documentos, equivalente a 7.57 artículos por año. Sin embargo, esta cifra aumenta si sólo se tienen en cuenta los últimos 10 años, colocándose en 12.8 artículos por año (inferior a los 34.7 artículos por año del RCPSP determinístico). La mayor parte de las contribuciones corresponden a documentos que proponen algoritmos de solución para el RCPSP básico y el RCPSP con múltiples objetivos o múltiples proyectos, con un total de 123 (70,29%) y 30 (17.14%) casos, respectivamente. Como puede apreciarse en la Figura 2-3, la menor cantidad de versiones corresponden al problema multimodo MRCPSP (16 casos) y a las variantes especiales del RCPSP (6 casos), como el RCPSP con interrupción de actividades (*Preemptive RCPSP*) y el RCPSP con tiempos de espera entre el inicio o finalización de las actividades (*Minimal / Maximal Time Lags*), entre otras variantes.

Figura 2-3: Versiones del RCPSP no determinístico abordados en la literatura científica desde 1996.



Fuente: Autor

De otra parte, como puede verse en la Tabla 2-2, las metaheurísticas son los algoritmos más utilizados por los autores para dar solución al problema desde el enfoque no determinístico.

Tabla 2-2: Técnicas de solución del RCPSP no determinístico desde 1996.

Tipo de técnica	Número de documentos	Porcentaje
Metaheurísticas	82	46.86%
Métodos heurísticos	57	32.57%
Métodos exactos	29	16.57%
Sin información	7	4.00%
Total	175	100,00%

Fuente: Autor

En el grupo de metaheurísticas, se destacan los algoritmos genéticos y la optimización por enjambre de partículas. En cuanto a los métodos heurísticos, las técnicas más utilizadas han sido el método de la cadena crítica y las listas de prioridad. Finalmente, en el grupo de los métodos exactos se destaca el algoritmo de ramificación y acotamiento y la programación dinámica.

La descripción detallada de cada uno de trabajos contabilizados en esta sección puede ser consultada en (Ortiz-Pimiento & Diaz-Serna, 2018). En ese artículo, fue realizada una extensa revisión de literatura científica en torno al RCPSP bajo un enfoque no determinístico.

2.4 Programación de proyectos con recursos restringidos y duración de actividades aleatoria

En la presente investigación, el RCPSP es analizado bajo un contexto probabilístico, ya que la duración de las actividades y los impactos de los posibles riesgos son representados a través de distribuciones de probabilidad. La duración puede ser modelada a partir de información histórica, de datos de proyectos similares o a través de la experiencia de personal experto.

De acuerdo con la revisión de la literatura científica realizada para el periodo comprendido entre 1996 y 2019, las técnicas de solución utilizadas con mayor frecuencia para resolver el RCPSP con duración de actividades aleatoria, fueron los algoritmos genéticos y el método de la cadena crítica. Al primer grupo pertenecen los trabajos de (Pet-Edwards & Mollaghesemi, 1996; Liu, Yang, Chen, Wang, & Li, 2009; Xiong, Liu, et al., 2011; Shou & Wang, 2012; Xiong, Chen, Liu, & Abbass, 2011; Wei-xin, Xu, Xian-long, & Lei, 2014; Huang, Yuan, & Xiao, 2015; Capa & Ulusoy, 2015; Mogaadi & Chaar, 2015; Tabrizi & Ghaderi, 2016; Chen, Xiong, & Zhou, 2016; Ghoddousi, Ansari, & Makui, 2017). En el segundo grupo se encuentran los trabajos de (Tukel, Rom, & Eksioglu, 2006; Ashtiani, Jalali, Aryanezhad, & Makui, 2007; Ash & Pittman, 2008; Fallah & Ashtiani, 2010; Zhang, Cui, Bie, & Chai, 2011; Liu, Chen, & Peng, 2012; Yu, Xu, & Hu, 2013; Mansoorzadeh, Yusof, Mansoorzadeh, & Zeynal, 2014; Saihjpal & Singh, 2014; Zhang, Song, & Díaz, 2016; Iranmanesh, Mansourian, & Kouchaki, 2016; Tysiak, 2017).

Con menos frecuencia, el problema ha sido resuelto mediante la programación dinámica (F. Liu, Luh, & Moser, 1998; Choi, Lee, & Realff, 2003; Tereso, Araujo, & Elmaghraby, 2004; Creemers, 2014; Brcic, Kalpic, & Katic, 2014; Creemers, 2015; Li & Womer, 2015), la técnica de ramificación y acotamiento (Ramat, Lente, Slimane, Tacquard, & Venturini, 1996; Leus & Herroelen, 2002; Adida & Joshi, 2009; Gutjahr, 2015; Varakantham, Fu, & Lau, 2016; Chakrabortty, Sarker, & Essam, 2017), procesos de simulación (Fernandez, Armacost, & Pet-Edwards, 1998; Golenko-Ginzburg, Gonik, & Laslo, 2003; Cho & Eppinger, 2005; Golenko-Ginzburg, Gonik, & Baron, 2006; Deblaere, Demeulemeester, & Herroelen, 2011; Subhy, Georgy, & Ibrahim, 2014), reglas de prioridad (Golenko-Ginzburg & Gonik, 1997; Golenko-Ginzburg & Gonik, 1998; Rabbani, Fatemi Ghomi, Jolai, & Lahiji, 2007; Rabbani, Baradaran, Fatemi Ghomi, & Hashemin, 2008; Fu, Lau, & Xiao, 2008; Ashtiani, Leus, & Aryanezhad, 2011), Optimización por Enjambre de Partículas (Zhang, Liu, Zhou, & Chen, 2015; Yaghoubi, Noori, & Azaron, 2015; Zhang & Xu, 2015; Gan & Xu, 2015), Cadenas de Markov (Davari & Demeulemeester, 2017; Davari & Demeulemeester, 2019; Creemers, 2019), algoritmos tipo Greedy (Ward, 2004; Ballestin & Leus, 2007; Wale, 2015), y el Algoritmo de Recocido Simulado (Vaziri, Carr, & Nozick, 2007; Cheng, Fowler, & Kempf, 2012; Ning, He, Jia, & Wang, 2017). Como se dijo en la sección anterior, la descripción detallada de los anteriores aportes puede ser consultada en (Ortiz-Pimiento & Diaz-Serna, 2018).

El RCPSP con inserción de tareas fue analizado a profundidad por (Archer, Armacost, & Pet-armacost, 2009). En esa investigación los autores se enfocaron en determinar el tamaño adecuado de los buffers de un proyecto con el fin de soportar las disrupciones que pueden aparecer durante su ejecución.

2.5 Métodos de solución basados en duraciones redundantes

Como se mencionó en el capítulo anterior, la estrategia proactiva de solución del RCPSP no determinístico agrupa tres tipos de solución (Brčić et al., 2012): los métodos basados en duraciones redundantes (enfoque utilizado en esta tesis), los métodos de programación robusta, y los métodos de programación contingente.

Los métodos basados en duraciones redundantes incorporan tiempo adicional a las actividades de un proyecto a partir de dos posibilidades: insertando amortiguadores de tiempo (buffers) o extendiendo la duración original de cada actividad.

En el primer caso, se destaca el método de la Cadena Crítica, propuesto originalmente por (Goldratt, 1997), cuyo propósito es insertar tiempo extra (buffers) en algunos puntos estratégicos dentro de la red del proyecto. Tradicionalmente, los investigadores se han enfocado en la identificación y cuantificación de factores clave para determinar el tamaño y la ubicación adecuada de los buffers del proyecto. (Rezaie, Manouchehrabadi, & Shirkouhi, 2009) establecieron un buffer para cada una de las actividades del proyecto, el cual estaba basado en el coeficiente de variación de la distribución de probabilidad asociada a la duración de tareas. (Bie, Cui, & Zhang, 2011) calcularon el tamaño del buffer del proyecto teniendo en cuenta el grado de dependencia y el factor de dependencia entre las tareas del proyecto. (Yang, Fu, Li, Huang, & Tao, 2008) determinaron el tamaño del buffer del proyecto teniendo en cuenta el tamaño de la red, la incertidumbre en la duración de las actividades y la flexibilidad para desplazar sus tiempos de inicio.

(Ash & Pittman, 2008) desarrollaron un algoritmo que integra una heurística para analizar los requerimientos de recursos y el método PERT para calcular la duración del proyecto y el tamaño de los buffers.

Adicionalmente, algunos investigadores identificaron nuevos factores que afectan el tamaño del buffer. (Shi & Gong, 2009) tuvieron en cuenta componentes como escasez de recursos, complejidad de la red y perfil de riesgo del administrador del proyecto. (X. Zhang et al., 2011) concluyeron que existe un alto grado de interacción entre el tamaño del buffer de alimentación, el nivel de servicio, la incertidumbre en la duración de las tareas y la duración total del proyecto. (D. Liu et al., 2012) emplearon el concepto de entropía para dimensionar el tamaño del buffer y tuvieron en cuenta un factor de utilización de recursos, la complejidad de la red y la aversión al riesgo. (Yu et al., 2013) incorporaron en su análisis el comportamiento aleatorio de la duración de las tareas, la restricción de múltiples recursos y el factor de impacto de cada uno de éstos. (Iranmanesh et al., 2016) diseñó un factor de densidad que considera los recursos escasos, la localización de las tareas en la red, el riesgo del ambiente de trabajo y el riesgo en cada tarea.

La segunda alternativa para adicionar tiempo extra a las actividades del proyecto consiste en incrementar la duración original de cada una de ellas a partir de la identificación de los riesgos potenciales del proyecto y la cuantificación de su impacto.

Entre las propuestas más destacadas en torno a esta alternativa se puede mencionar el trabajo de (Ökmen & Özta, 2005), quienes desarrollaron un modelo de análisis de riesgo denominado *Judgmental Risk Analysis Process* (JRAP). Esta propuesta es considerada una metodología de análisis de riesgo pesimista, ya que el tiempo extra se obtiene a partir de los datos generados en los peores escenarios de un proceso de simulación utilizando técnicas de Monte Carlo.

De otra parte, (Ascensión Zafra-Cabeza, Ridao, & Camacho, 2007; Ascension Zafra-Cabeza, Ridao, & Camacho, 2008) presentan un modelo para evaluar los riesgos del proyecto, plantear acciones de mitigación, evaluar su impacto en diferentes escenarios, y establecer la duración del proyecto. El tiempo extra de cada actividad fue obtenido a partir de la probabilidad de ocurrencia del riesgo y su impacto promedio.

Adicionalmente, (Mansoorzadeh & Mohd Yusof, 2011; Mansoorzadeh et al., 2014) propusieron una estructura basada en la integración del análisis de riesgos y la gestión de la cadena crítica (CCPM). En esa investigación, el tiempo extra de cada actividad fue estimado a partir de la técnica de análisis de modo y efecto de fallas difuso.

Por último, (J. Zhang, Shi, & Díaz, 2015) propusieron un procedimiento de monitoreo y control de proyectos de software basados en un modelo predictivo (*Grey Prediction Model*). En este caso, el tiempo extra de cada actividad se basó en la probabilidad de ocurrencia del riesgo, el impacto estimado, y la aversión al riesgo del administrador del proyecto.

2.6 Programación de proyectos de desarrollo de nuevos productos

De acuerdo con los documentos identificados en la base de datos Scopus para el periodo comprendido entre 1996 y 2019, el problema de programación de proyectos (*Project Scheduling Problem, PSP*) aplicado al caso de desarrollo de nuevos productos fue abordado en 19 trabajos de investigación. Estas contribuciones corresponden al 6,64% del total de artículos científicos relacionados con el problema de programación de proyectos.

Aunque algunos de estos trabajos utilizaron números difusos para representar la duración de las actividades (J. R. Wang, 1999; Wang, 2002; Wang, 2004; Yi, Gao, & Guan, 2014; Huang et al., 2015), la representación más frecuente ha sido a partir de distribuciones de probabilidad. (Schmidt & Grossmann, 1996) modelaron la duración de las actividades a través de distribuciones de probabilidad discretas y propusieron un programa lineal entero mixto para maximizar el valor presente neto en un proyecto de desarrollo de un nuevo producto. El modelo matemático no tuvo en cuenta la restricción de recursos; sin embargo, incorporó dos elementos de análisis muy importantes: la probabilidad de realizar con éxito cada actividad del proyecto y la probabilidad de ocurrencia de los escenarios identificados.

(Subramanian, Pekny, & Reklaitis, 2001) abordaron el problema de programación de múltiples proyectos con recursos restringidos (RCMPSP) y presentaron un procedimiento que combina programación matemática con simulación de eventos discretos para valorar la incertidumbre y controlar el riesgo en procesos de selección de proyectos de desarrollo de nuevos productos y la posterior programación de tareas. El modelo combinado de simulación-optimización buscaba maximizar el valor presente neto teniendo en cuenta la probabilidad de éxito de las actividades, su duración aleatoria, y la incertidumbre en la cantidad requerida de recursos.

El RCMPSP aplicado al proceso de desarrollo de nuevos productos fue analizado también por (Choi, Realff, & Lee, 2004), quienes utilizaron una Cadena de Markov de tiempo discreto para analizar la variación en los costos, la probabilidad de éxito o fracaso de cada actividad y su duración aleatoria. Tres procedimientos heurísticos fueron empleados para crear un espacio de estados adecuado para resolver el modelo matemático por medio de la programación dinámica.

(Gao, Chen, Jiang, & Liu, 2005) propusieron un algoritmo heurístico que tuvo en cuenta la aleatoriedad en la duración de las actividades, la posibilidad de realizar retrabajos, y la inclusión de actividades concurrentes que compartían recursos escasos. Al final, el algoritmo permite obtener una distribución de probabilidad para la duración del proyecto y para los tiempos de inicio de cada actividad.

(Mizuyama, 2006) planteó un algoritmo de solución heurístico para resolver el problema de programación de proyectos (*PSP*) sin recursos restringidos, a partir de un proceso de toma de decisiones probabilístico en múltiples etapas. El algoritmo propuesto evalúa la posibilidad de acortar las actividades del proyecto con el fin de cumplir con la fecha de entrega, y al mismo tiempo reducir el impacto negativo generado en la calidad de cada uno de los entregables del proyecto.

(Ascensión Zafra-Cabeza et al., 2007; Ascension Zafra-Cabeza et al., 2008), propusieron un enfoque novedoso que no solo tiene en cuenta la duración aleatoria de cada actividad sino también el impacto de los posibles riesgos de un proyecto. El modelo matemático formulado utiliza una técnica de control predictivo (*Model Predictive Control MPC*) para evaluar el impacto de los riesgos de un proyecto y la conveniencia de llevar a cabo acciones de mitigación. El procedimiento propuesto permite resolver el problema de programación de proyectos (PSP) sin recursos restringidos, apoyado en una red de Petri tipo p-timed. De acuerdo con los autores, este tipo de red provee un modelo dinámico para representar el tiempo y el costo de un proyecto de desarrollo de nuevos productos.

La programación dinámica fue utilizada nuevamente como técnica de solución por (Creemers, Leus, & De Reyck, 2010; Creemers, De Reyck, & Leus, 2015). Los autores diseñaron un modelo que incorpora alternativas de desarrollo tecnológico y busca maximizar el valor presente neto esperado de un proyecto de desarrollo de nuevos productos. El modelo planteado incorpora la probabilidad de éxito o fracaso de cada actividad y su duración aleatoria.

(Mohammadi, Sayed, & Mohammad, 2014) presentaron un procedimiento de solución al problema de programación de proyectos (PSP) sin recursos restringidos basado en la matriz de dependencia de la estructura (DSM) y en técnicas de simulación de Monte Carlo. En este trabajo de investigación, la DSM fue útil para organizar las relaciones de precedencia de las actividades y el flujo de información entre ellas. El proceso de simulación generó diferentes escenarios a partir de las distribuciones de probabilidad asociadas a la duración de las actividades y a un parámetro relacionado con la superposición entre tareas. Finalmente, cuando el proceso de simulación se estabiliza, el valor promedio para la duración del proyecto y su varianza son calculadas.

(Nelson, Azaron, & Aref, 2016) propusieron un modelo que utiliza redes tipo GERT (Graphical Evaluation and Review Technique). De acuerdo con los autores, las redes tipo GERT permiten representar adecuadamente parámetros como la duración aleatoria de las actividades, la posibilidad de ejecutar una actividad más de una vez, o la finalización anticipada del proyecto. En este trabajo de investigación, la red tipo GERT fue modelada por medio de un proceso de simulación basado en técnicas de Montecarlo; adicionalmente, el concepto de ingeniería concurrente fue asociado con el principio de retrabajo y el de superposición de actividades.

Este mismo año, (Nasr, Yassine, & Abou Kasm, 2016) presentaron un método analítico para estimar la duración esperada de un proyecto de desarrollo de nuevos productos sin recursos restringidos, el cual utiliza como punto de partida una cadena de Markov con recompensa. El flujo de información y los retrabajos fueron representados a partir de una matriz de dependencia de la estructura (DSM).

Recientemente, el RCMPSP fue abordado nuevamente por (Song, Xi, Kang, & Zhang, 2018). En este trabajo de investigación los autores proponen un modelo de simulación basado en agentes y aplicado a un programa de desarrollo de nuevos productos. El sistema diseñado está soportado en técnicas heurísticas integradas con esquemas generadores de secuencias, e incluye tanto la programación proactiva como la reactiva.

De acuerdo con esta revisión de literatura, solo cuatro artículos abordaron el RCPSP con duración de actividades aleatoria. En los demás casos (9 artículos), los modelos

matemáticos presentados fueron implementados sin tener en cuenta la restricción de recursos, es decir, el problema abordado fue el *PSP* con duración de actividades aleatoria.

De otra parte, es importante indicar que los artículos descritos anteriormente, asumen que la distribución de probabilidad de la duración de las actividades incluye todos los impactos causados por los riesgos del proyecto. La excepción a este enfoque fue planteada por (Ascensión Zafra-Cabeza et al., 2007; Ascension Zafra-Cabeza et al., 2008), quienes realizaron un análisis detallado de cada uno de los riesgos asociados a las actividades del proyecto.

2.7 Conclusiones

En el presente capítulo se resaltaron los aportes más relevantes escritos en la literatura científica en torno al RCPSP. Inicialmente se abordó el RCPSP en su enfoque determinístico, en donde vale la pena destacar dos aspectos: la gran cantidad de documentos que presentan algoritmos de solución al problema (34,7 artículos por año), y las metaheurísticas como técnica de solución más frecuente.

Posteriormente, fue abordado el RCPSP en su enfoque no determinístico. Para este caso, pudo evidenciarse el creciente interés que tiene la comunidad científica sobre el tema; adicionalmente, se hizo un énfasis especial sobre el RCPSP cuando la duración de las actividades es analizada bajo un contexto probabilístico.

Finalmente, se realizó una búsqueda especial de documentos y fueron descritos los artículos más representativos del problema de programación de proyectos de desarrollo de nuevos productos.

3. El problema de investigación

3.1 Descripción del problema de investigación

El entorno bajo el cual se ejecutan los proyectos de desarrollo de nuevos productos conlleva a que este tipo de proyectos pueda ser impactado frecuentemente por eventos inesperados. Los impactos generalmente se reflejan en la duración de las actividades, en el costo del proyecto, en la disponibilidad de los recursos, o en el cumplimiento de las fechas de finalización.

Debido a la inexistencia de un modelo de optimización previo que involucre todas estas características, esta investigación se ha concentrado en desarrollar un modelo capaz de generar una línea-base robusta que analice simultáneamente el impacto de riesgos en la duración de las actividades y la aparición de nuevas tareas durante la ejecución del proyecto.

El impacto de los riesgos debe ser cuantificado e integrado a un proceso de análisis que permita construir un modelo matemático ajustado a las características propias de los proyectos de desarrollo de nuevos productos. Cuando un riesgo se materializa aparecen las tareas extra que no estaban contempladas originalmente en la red del proyecto. Sin embargo, los algoritmos proactivos actualmente propuestos en la literatura científica que han sido aplicados al caso de desarrollo de nuevos productos no incorporan un procedimiento para identificar los riesgos que puedan afectar cada actividad y cuantificar su impacto.

Adicionalmente, la ausencia de estrategias que tengan en cuenta la posible aparición de nuevas tareas no refleja la realidad en los actuales modelos que buscan resolver el problema de programación de proyectos.

Por lo tanto, es necesario abordar un nuevo enfoque de solución que permita dar respuesta a preguntas como las siguientes:

- ¿Cómo debería incorporarse el análisis de riesgos dentro de un modelo de optimización tendiente a generar una línea-base robusta de un proyecto?
- ¿Cuáles procedimientos serían aplicables para determinar el impacto de los riesgos sobre la duración de las actividades?
- ¿De qué manera se incorporaría al modelo la posibilidad de insertar nuevas tareas al proyecto?
- ¿Cómo podría reducirse el impacto producido por una eventual cancelación del proyecto?
- ¿Qué parámetros de entrada requiere un programa lineal entero que resuelva el RCPSP con duración aleatoria de actividades e inserción de tareas?
- ¿Cómo se evaluaría la robustez de la(s) solución(es) obtenida(s)?
- ¿Se hace necesaria una estrategia reactiva de programación del proyecto?

3.2 Justificación de la investigación

El análisis detallado de riesgos por cada actividad y la inserción de tareas son los dos elementos básicos para modelar adecuadamente el problema de programación de proyectos de desarrollo de nuevos productos.

El RCPSP con probabilidad de inserción de nuevas tareas, fue abordado por (Archer et al., 2009), quienes se enfocaron en determinar el tamaño adecuado de los buffers del proyecto para soportar las disrupciones que pudieran ocurrir durante su ejecución. Sin embargo, no llevaron a cabo un análisis detallado de los riesgos del proyecto.

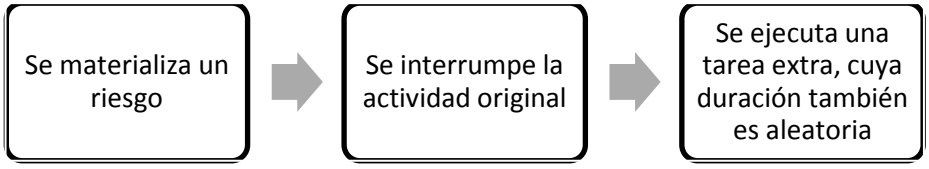
Tradicionalmente, los autores emplean distribuciones de probabilidad para representar la duración de las actividades del proyecto asumiendo que cada distribución de probabilidad incluye todos los posibles impactos causados por los riesgos del proyecto. Aunque esta suposición es ampliamente utilizada en los modelos de optimización propuestos en la literatura científica, el análisis detallado de riesgos (identificación, asociación con cada

actividad, y cuantificación) es fundamental porque hace evidente el impacto de cada riesgo sobre la duración de las actividades. Ese nivel de detalle evita imprecisiones desde el punto de vista estadístico ya que no es correcto asumir que todos los riesgos pueden incluirse en una sola distribución de probabilidad.

En ese orden de ideas, vale la pena mencionar los aportes de (Ökmen & Özta, 2005; Zhang, Jia, & Díaz, 2015; Ascensión Zafra-Cabeza et al., 2007; Ascension Zafra-Cabeza et al., 2008; Mansoorzadeh & Mohd Yusof, 2011; Mansoorzadeh et al., 2014) quienes abordaron el problema de programación de proyectos e incorporaron en sus modelos matemáticos un análisis sobre el impacto de riesgos en la duración de las actividades. Los cuatro primeros trabajos aplicaron sus estrategias al PSP sin restricción de recursos, y los demás al RCPSP. Sin embargo, ninguno de ellos se enfocó en generar una línea-base para el proyecto, ni en incluir el proceso de inserción de actividades.

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace evidente que un análisis detallado de los riesgos debe seguir un esquema como el presentado en la Figura 3-1:

Figura 3-1: Análisis detallado de riesgos para las actividades del proyecto.



Fuente: Autor

El modelo propuesto en la presente tesis destaca dos aportes fundamentales: la integración de un análisis detallado de riesgos del proyecto con un modelo de optimización que genera una línea-base robusta, y la adaptación del RCPSP con duración aleatoria de actividades e inserción de tareas, bajo una estrategia proactiva-reactiva, al caso de proyectos de desarrollo de nuevos productos.

3.3 Objetivos de la investigación

3.3.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo basado en optimización robusta que permita seleccionar el procedimiento adecuado[1] para programar proyectos de desarrollo de nuevos productos, considerando la restricción de recursos renovables escasos, el impacto de los riesgos sobre la duración de actividades, y la posibilidad de inserción de nuevas tareas en la red del proyecto.

3.3.2 Objetivos específicos

- Formular un modelo de programación matemática para resolver el RCPSP determinístico, el cual será útil para generar la línea-base de un proyecto de desarrollo de nuevos productos.
- Diseñar tres procedimientos basados en el método de duraciones redundantes, los cuales tendrán como propósito cuantificar el impacto de los riesgos y estimar el tiempo extra que debería asignarse a cada actividad que compone el proyecto.
- Aplicar una medida de robustez para identificar el mejor procedimiento diseñado. Este punto debe tenerse en cuenta porque al abrir la posibilidad de insertar una nueva actividad en la red, se generan por lo menos dos escenarios de programación: el primero donde se incluye la actividad y el segundo donde se excluye dicha actividad; además, cada uno de ellos tendrá definida una probabilidad de ocurrencia.

[1] Los procedimientos (basados en duraciones redundantes) incorporados al modelo de optimización generarán líneas-base diferentes. Por ello, se incluye una fase final donde se selecciona aquel que provee la mayor robustez.

4. Modelo de optimización propuesto para resolver el RCPSP con duración aleatoria e inserción de tareas

4.1 Introducción

En muchos casos, la programación de proyectos se dificulta debido a la gran cantidad de eventos no planeados que suelen aparecer y cuyo impacto puede alterar la duración de las actividades, obligando a realizar ajustes al cronograma original, e incluso, a insertar nuevas actividades dentro del proyecto. Por ésta y otras razones, se hace necesario llevar a cabo un análisis detallado de los riesgos del proyecto, de tal forma que sus impactos puedan ser incorporados en un modelo de optimización que genere una línea-base capaz de soportar las disrupciones que pueden presentarse durante su ejecución.

El modelo de optimización que se propone a continuación es aplicable a proyectos con alta vulnerabilidad al riesgo, esto es, proyectos donde la probabilidad de incumplir con la fecha de entrega, aumentan drásticamente cuando uno o varios riesgos ocurren durante su ejecución y retardan la duración de las actividades. Este tipo de situación es frecuente no solo en proyectos de desarrollo de nuevos productos, sino también en proyectos de obras civiles con alta dependencia de los estudios geológicos, o en proyectos de desarrollo de software donde la duración de las actividades está asociada con las habilidades que poseen los programadores.

El modelo contempla cuatro etapas: en la primera, se identifican los riesgos y sus impactos sobre las actividades; en la segunda, se estima la duración de las actividades a partir de procedimientos alternativos basados en el *método de duraciones redundantes*; en la tercera, se generan líneas-base para cada procedimiento alternativo utilizando un

programa lineal entero; y en la cuarta, se selecciona el procedimiento que genera la línea-base más robusta para el proyecto.

La etapa dos del modelo es flexible, ya que cualquier procedimiento basado en el *método de duraciones redundantes* puede ser utilizado para estimar la duración.

4.2 Etapas del modelo

4.2.1 Identificación de riesgos

De acuerdo con (Elmaghraby, 2005), la duración de un proyecto puede verse afectada por dos tipos de riesgo: el primero, conocido como riesgo externo hace referencia a los eventos que interfieren con el desarrollo normal de las actividades tales como falla en equipos, pérdida de documentos y accidentes laborales, entre otros. El segundo, denominado riesgo interno, hace referencia al margen de error originado al estimar la duración de la actividad en ausencia de riesgos externos. El riesgo interno no está relacionado con eventos externos y no origina interrupción de las actividades.

Los riesgos externos identificados en esta etapa son asociados a cada actividad del proyecto, indicando su impacto y probabilidad de ocurrencia. El impacto de un riesgo externo implica llevar a cabo una tarea extra cuya duración puede ser representada a través de una distribución de probabilidad. Así mismo, la probabilidad de ocurrencia de cada riesgo puede ser determinada con base en la experiencia y/o juicio de expertos.

Con el fin de organizar la información sobre los riesgos y su afectación a las actividades, se construye un cuadro de riesgos para las actividades. La Tabla 4-1 presenta un ejemplo creado por el autor, usando la siguiente nomenclatura:

b_i: Duración aleatoria de la actividad i en ausencia de riesgos externos. En el ejemplo de la Tabla 4.1, la duración sigue una distribución normal N (μ, σ), con un valor esperado μ = $\mathbf{b_i}$ y una desviación estándar σ = σ_{bi}.

Pr_{ki}: Probabilidad de ocurrencia del riesgo externo k que afecta la actividad i

h_{ki}: Duración aleatoria de la tarea extra que se ejecuta cuando el riesgo externo k aparece y afecta la actividad i. En el ejemplo de la Tabla 4.1, la duración sigue una distribución normal N(μ, σ), con un valor esperado μ = $\mathbf{h_{ki}}$ y una desviación estándar σ = σ_{hki}.

Tabla 4-1: Cuadro de riesgos para las actividades

Actividades	Duración de la actividad i (b_i)	Riesgo	Tarea extra que impacta la actividad i y es generada por el riesgo k	
			Probabilidad de ocurrencia del riesgo (Pr_{ki})	Duración de la tarea extra (h_{ki})
Actividad 1	N (20, 2.1)	Riesgo 1	0.1	N (4, 0.1)
		Riesgo 3	0.3	N (3, 0.4)
Actividad 2	N (12, 1)	Riesgo 3	0.4	N (2, 0.3)
Actividad 3	N (16, 2)	Riesgo 2	0.5	N (3, 0.2)
…. …				
Actividad n				

Fuente: Autor

En esta tesis, los riesgos externos son asumidos como independientes y la probabilidad de ocurrencia del riesgo externo a lo largo del horizonte de planeación del proyecto se considera constante.

4.2.2 Cálculo de la duración estimada de las actividades a partir de procedimientos alternativos

En esta etapa, cualquier procedimiento basado en el *método de duraciones redundantes* puede ser utilizado para calcular la duración de las actividades (d_i). La estrategia consiste en adicionar tiempo extra a la duración original con el fin de enfrentar las eventualidades que pueden aparecer durante la ejecución del proyecto. La nueva duración debe calcularse incluso para las actividades que probablemente se integrarán a la red del proyecto (inserción de tareas).

Los cuatro procedimientos presentados en esta etapa del modelo están basados en los lineamientos del *Judgmental Risk Analysis Process*, JRAP (Ökmen & Özta, 2005) y en el

modelo aplicado por (Ascensión Zafra-Cabeza et al., 2007), en su trabajo sobre análisis y mitigación de riesgos.

Procedimiento A. Este procedimiento se basa en un análisis pesimista, ya que la duración de cada actividad (d_i) corresponde al valor máximo obtenido mediante un proceso de simulación.

Teniendo en cuenta la información contenida en un cuadro de riesgos como el presentado en la Tabla 4-1, se genera una muestra de al menos 1000 duraciones aleatorias para cada actividad del proyecto. Una vez disponible los datos generados, se selecciona la duración que posea el valor más alto. La *duración estimada* de la actividad i (d_i) es calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$d_i = \mathbf{b_i} + Max[\ \sum_1^k (Pr_{ki} * \boldsymbol{h}^s_{ki})\ ] \quad (4.1)$$

En donde $\mathbf{b_i}$ hace referencia a la *duración esperada*[2], Pr_{ki} a la *probabilidad de ocurrencia de cada riesgo* y $\boldsymbol{h}^s_{ki}$ a la duración simulada de cada tarea extra.

Procedimiento B. En este caso, la *duración estimada* (d_i) se asocia al nivel de aversión al riesgo que posea el gerente del proyecto (PR). Por ello, si el gerente del proyecto asume que ningún riesgo afectará a la actividad i (PR=0) entonces la *duración esperada* (d_i) será exactamente a la *duración esperada* ($\mathbf{b_i}$). En caso contrario, si asume que todos los riesgos se materializan (PR=1) entonces la *duración esperada* (d_i) debe tener en cuenta no solo el valor esperado de la *duración básica* sino también la duración esperada de las *tareas extra*[3] ($\mathbf{h}_{ki}$).

[2] b_i es la variable aleatoria y $\mathbf{b}_i$ con negrilla es el valor esperado de esa variable aleatoria
[3] h_{ki} es la variable aleatoria y $\mathbf{h_{ki}}$ con negrilla es el valor esperado de esa variable aleatoria

La ecuación (4.2) es utilizada para calcular la duración esperada (di) por este procedimiento[4].

$$d_i = \mathbf{b_i} + PR * [\sum_1^k(\mathbf{h}_{ki})] \quad (4.2)$$

Aquí, $\mathbf{b_i}$ hace referencia al valor esperado de la duración, PR corresponde al nivel de riesgo que asuma el tomador de decisiones (alternativamente, puede ser el promedio las probabilidades de ocurrencia de los riesgos del proyecto), y $\mathbf{h}_{ki}$ es el valor esperado de las tareas extras asociadas al riesgo k y actividad i.

Procedimiento C. (Heldman, 2005) indica que la exposición a un riesgo puede ser calculado multiplicando su probabilidad de ocurrencia y el impacto esperado. Teniendo en cuenta este concepto, el *impacto individual* de un riesgo sobre una actividad i se calcula multiplicando su probabilidad de ocurrencia (Pr_{ki}) y la duración esperada de la *tarea extra* asociada a ese riesgo ($\mathbf{h_{ki}}$).

Como consecuencia, el *impacto total* de los riesgos sobre una actividad i se obtiene sumando sus *impactos individuales*.

Finalmente, la duración estimada (d_i) es calculada al sumar el valor esperado de la duración básica ($\mathbf{b}_i$) y el *impacto total* de los riesgos:

$$d_i = \mathbf{b_i} + \sum_1^k(Pr_{ki} * \mathbf{h}_{ki}) \quad (4.3)$$

Procedimiento D. Este procedimiento asume que cuando una actividad es ejecutada, la aparición de la totalidad de los riesgos identificados es poco probable. Por lo tanto, basta con considerar al riesgo que genera mayor impacto como único parámetro para calcular el tiempo extra asociado a la actividad i.

[4] Cuando se tienen datos sobre probabilidades de ocurrencia de los riesgos, PR podría calcularse calculando el promedio de dichas probabilidades.

La duración estimada (d_i) corresponde al máximo valor obtenido de multiplicar la probabilidad de ocurrencia Pr_{ki} y la duración esperada de cada tarea extra ($\mathbf{h}_{ki}$).

$$d_i = \mathbf{b_i} + Max\ [Pr_{ki} * \mathbf{h}_{ki}] \quad (4.4)$$

4.2.3 Obtención de las líneas-base generadas a partir de cada procedimiento

Una vez calculada la duración estimada (d_i) a partir de cada procedimiento es posible obtener su línea-base correspondiente resolviendo el programa lineal entero que se muestra a continuación.

Parámetros de entrada:

d_i: Duración estimada de la actividad i (incluyendo las nuevas actividades que se insertan a la red del proyecto)
P_{ij}: Parámetro binario que indica la relación de precedencia entre actividades. (P_{ij} es igual a 1 si la actividad i precede la actividad j, e igual a cero en caso contrario.

El horizonte de tiempo es dividido en periodos parciales representados por el subíndice (t), el cual toma valores entre 1 y T. T es el límite superior para la duración total del proyecto, y en esta tesis, fue obtenido después de sumar la duración de todas las actividades.

Variables de decisión:

S_i: Tiempo de inicio planeado de la actividad i
A_{it}: Variable binaria que indica si la actividad i se ejecuta en el periodo t. (A_{it} es igual a 1 si la actividad i se encuentra activa en el periodo t, e igual a cero en caso contrario).

El modelo de optimización para resolver el RCPSP con duración de actividades aleatoria e inserción de tareas, es expresado como un programa lineal entero:

$$Minimizar \quad S_n \tag{4.5}$$

Sujeto a:

$$S_j \geq P_{ij} * [\, S_i + d_i] \qquad \forall\, i, \forall\, j \tag{4.6}$$

$$S_i + d_i - 1 \geq t * A_{it} \qquad \forall\, i, \forall\, t \tag{4.7}$$

$$S_i \leq t + (1 - A_{it}) * M \qquad \forall\, i, \forall\, t \tag{4.8}$$

$$\sum_{t=1}^{T} A_{it} = d_i \qquad \forall\, i \tag{4.9}$$

$$\sum_{i=1}^{n} (r_{ik} * A_{it}) \leq Rw_{kt} \qquad \forall\, k, \forall\, t \tag{4.10}$$

$$S_i \geq 0 \text{ entero} \qquad \forall\, i \tag{4.11}$$

$$A_{it} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i, \forall\, t \tag{4.12}$$

La función objetivo del modelo busca minimizar el Makespan o duración del proyecto (S_n indica el tiempo de inicio de la actividad ficticia n). La ecuación (4.6) asegura que las actividades inician solo cuando aquellas que la preceden han finalizado. Las ecuaciones (4.7 - 4.9) aseguran que A_{it} sea igual a 1 cuando la actividad i se encuentra activa en el momento t, en caso contrario, A_{it} es igual a cero. El aporte de cada ecuación es presentado a continuación: la ecuación (4.7) permite que A_{it} sea 1 solo si la actividad i no ha finalizado en el momento t (hay que tener en cuenta que un periodo t inicia en t-1 y finaliza t, por ello se hace necesario restar una unidad en la ecuación permite identificar el periodo de tiempo), la ecuación (4.8) permite que A_{it} sea 1 solo si la actividad i inició después del momento t (M representa un número muy grande), y la ecuación (4.9) asegura que A_{it} sea 1 para el intervalo $\{S_i, S_i+d_i\}$.

De otra parte, la ecuación (4.10) permite programar simultáneamente varias actividades siempre y cuando no se superen los recursos disponibles. Finalmente, las ecuaciones (4.11 – 4.12) indican las condiciones de no negatividad y el tipo de variable requerido.

Es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- En esta tesis, la duración de cada actividad se estima a partir de métodos basados en redundancias.
- Teniendo en cuenta que el modelo matemático propuesto es formulado en tiempo discreto con variables tipo On/Off (Artigues et al., 2015), las duraciones obtenidas (d_i) se redondean al valor entero más cercano. Esta estrategia de redondeo permite obtener una cifra más cercana al valor calculado previamente por el método de duraciones redundantes.
- Las relaciones de precedencia ficticias P_{ij} asociadas a las actividades que pueden insertarse en la red del proyecto, se ingresan al modelo de la misma forma en que son ingresadas las precedencias reales. En otras palabras, las actividades a insertar se incorporan al programa lineal entero sin tener en cuenta su probabilidad de ocurrencia.
- El modelo propuesto solo tiene en cuenta los recursos renovables del proyecto.

El anterior modelo de programación lineal entera ha sido programado en GAMS usando el solver MIP de CPLEX, el cual utiliza un potente algoritmo de ramificación y corte. Este algoritmo es una versión avanzada del algoritmo de ramificación y acotamiento, ya que ejecuta el proceso de ramificación y emplea planos de corte para ajustar las relajaciones de la programación lineal.

Teniendo en cuenta que cada uno de los procedimientos descritos en el numeral 4.2.2 tendrá asociada una línea-base diferente, se hace necesario compararlas con el fin de seleccionar la más robusta.

4.2.4 Selección de la mejor línea-base para el proyecto

Cualquier estrategia proactiva-reactiva para resolver el RCPSP no determinístico puede ser evaluada a partir de indicadores de robustez. En este caso, el desempeño de cada procedimiento propuesto en la etapa 2 es analizado en términos de robustez, con el fin de identificar la línea-base que mejor soporta las disrupciones que ocurrirán durante la ejecución del proyecto.

Los procedimientos basados en el método de duraciones redundantes hacen parte del tipo de estrategias proactivas de programación, los cuales requieren de una estrategia reactiva que sirva de complemento para reprogramar las actividades durante la ejecución del proyecto.

En esta investigación, se hizo necesario diseñar un procedimiento reactivo con el fin de simular la ejecución real del proyecto y al mismo tiempo, comparar las líneas-base generadas por cada procedimiento que contempla el modelo propuesto. La programación reactiva esta soportada en un *esquema generador de secuencias* en paralelo, el cual permite reprogramar las actividades y realizar los ajustes requeridos en caso de aparecer cualquier disrupción.

Los *esquemas generadores de secuencias* en paralelo programan las actividades en algunos *puntos de decisión* a lo largo del horizonte de planeación. Cada *punto de decisión* es progresivo y corresponde a una iteración. El algoritmo diseñado inicia en el momento cero de la línea de tiempo, en donde son programadas las actividades que no tienen precedencias, siempre y cuando exista disponibilidad de recursos.

Las actividades que se están ejecutando en el mismo periodo de tiempo son llamadas *actividades activas*. Al finalizar la *actividad activa* de menor duración se fija el siguiente *punto de decisión* y se crea una nueva *lista de actividades* candidatas a ser programadas, las cuales deben cumplir con las restricciones de precedencia y de disponibilidad de recursos. En caso de que las actividades candidatas a programar superen la disponibilidad de recursos, las actividades son seleccionadas de acuerdo con el orden indicado por la línea-base y su duración aleatoria es calculada justo en el momento en que es programada por el *esquema generador de secuencia*. El procedimiento se repite hasta que la *lista de actividades* queda vacía. En ese momento, los tiempos de inicio reales de cada actividad (S_{Ri}) son obtenidos a partir de los tiempos de inicio resultantes en la programación reactiva.

Las desviaciones entre los tiempos de inicio planeados en cada línea-base (S_{LBi}) y los reales (S_{Ri}) son el punto de partida para analizar la robustez del modelo propuesto. Sin embargo, el concepto de robustez implica comparar una solución con varios escenarios de ejecución. Por lo tanto, en esta investigación la línea-base de cada uno de los cuatro

procedimientos propuestos es comparada con los resultados de la programación reactiva para 10000 escenarios simulados[5] a partir de la técnica de Monte Carlo.

La comparación de las líneas-base de cada procedimiento se realiza teniendo en cuenta dos conceptos: *robustez de la solución* y *robustez de la calidad*. La *robustez de la solución* analiza la capacidad de una línea-base para soportar las disrupciones que afectan los tiempos de inicio de cada actividad, mientras que la *robustez de la calidad* analiza la capacidad para soportar las disrupciones que afectan la fecha de finalización del proyecto (Herroelen & Leus, 2004; Van De Vonder et al., 2005).

El primer paso para obtener la *robustez de la solución* (SR) consiste en calcular la desviación media de cada una de las actividades del proyecto (ΔS_i) utilizando la ecuación (4.13):

$$\Delta S_i = \frac{\sum_1^m |S_{LBi} - \boldsymbol{S_{Ri}}|}{m} \qquad (4.13)$$

En donde S_{LBi} corresponde al tiempo de inicio planeado en la línea-base del proyecto para cada actividad i (i = 1, 2, … n), y $\mathbf{S_{Ri}}$ representa el tiempo de inicio realmente ejecutado para la actividad i (obtenido mediante un proceso de simulación con m = 10000 escenarios).

Posteriormente, cada valor ΔS_i es utilizado para obtener el indicador de *robustez de la solución* (SR) por medio de la ecuación (4.14):

$$SR = \sum_1^n \Delta S_i \qquad (4.14)$$

[5] Este valor (10.000 escenarios) corresponde a una cifra utilizada frecuentemente en estudios previos de simulación para el problema de programación de proyectos. De hecho, dentro de la literatura revisada en esta tesis, tan solo 4 investigaciones superan los 10.000 escenarios.

De otra parte, el indicador de *robustez de la calidad* (QR) hace referencia a la desviación promedio para la última actividad del proyecto (ΔS_n). Por lo tanto, la ecuación (4.15) simplemente refleja que QR = ΔS_n:

$$\mathrm{QR} = \frac{\sum_1^m |S_{LBn} - \boldsymbol{S_{Rn}}|}{m} \qquad (4.15)$$

Los indicadores de robustez (SR y QR) fueron la base fundamental para seleccionar el procedimiento que generó la mejor línea-base para el proyecto.

Una programación robusta corresponde a una solución factible con mínima desviación entre los valores óptimos de la línea-base y los valores obtenidos para cada escenario simulado. Por lo tanto, el análisis de robustez se centra en calcular los indicadores de robustez para las líneas-base generadas por los cuatro procedimientos y luego selecciona aquella con menor desviación entre los tiempos de inicio planeados y los ejecutados.

4.3 Conclusión

El modelo de optimización propuesto en esta tesis se compone de cuatro etapas: la primera de identificación y cuantificación de los riesgos que afectan la duración de las actividades de un proyecto, la segunda, en donde se emplean cuatro procedimientos basados en el método de duraciones redundantes para estimar la duración de cada actividad, la tercera, en donde un programa lineal entero permite generar las líneas-base del proyecto para los cuatro procedimientos propuestos en la etapa anterior; y la cuarta, que analiza la robustez de cada una de las líneas-base obtenidas.

El análisis de robustez se realiza tomando como referencia dos indicadores de robustez que comparan los tiempos de inicio planeados en la línea-base con los tiempos de inicio reales. Para generar los tiempos de inicio reales fue necesario diseñar un algoritmo de programación *reactiva* que se apoya en un proceso de simulación. Por tal razón, el modelo de solución propuesto en esta tesis puede catalogarse como un procedimiento basado en un enfoque proactivo-reactivo.

Por último, vale la pena indicar que en la etapa 2 puede ser utilizado cualquier procedimiento basado en duraciones redundantes. Lo realmente importante en este modelo, es que deben incluirse por lo menos dos procedimientos con el fin de ser comparados entre sí, y seleccionar la línea-base más robusta.

5. Caso de estudio

5.1 Introducción

En esta sección se presenta un proyecto de desarrollo de un nuevo producto, el cual fue originalmente desarrollado por (Lertapiruk, 2014). El caso de estudio provee información relacionada con un proyecto para desarrollar un nuevo material para el marco de conexión que será utilizado en un proceso de encapsulado de un circuito integrado. El nuevo material debe ser obtenido aplicando una tecnología especial denominada *RT Technology*, la cual permite incrementar la adherencia entre los materiales del circuito integrado y el material del marco de conexión.

La información que se describe en este capítulo ha sido adaptada para ajustarla a las características de un RCPSP con duración aleatoria de actividades e inserción de actividades. Inicialmente se presenta la lista de actividades que componen el proyecto, posteriormente aparecen el diagrama de red del proyecto, datos específicos sobre los posibles riesgos que pueden afectar las actividades, y finalmente la información sobre los recursos escasos que se deben tener en cuenta durante la programación.

5.2 Proceso de encapsulado de un circuito electrónico

De acuerdo con (Lertapiruk, 2014), este proceso consiste en ensamblar la matriz de semiconductores con los otros componentes del circuito integrado: el marco de conexión, el adhesivo, el alambre conductor y el material de encapsulación.

- El marco de conexión es una delgada lámina de metal que sirve como soporte a la matriz de semiconductores durante todo el proceso de ensamblaje. Este componente tiene dos elementos fundamentales: una almohadilla que es un lugar donde se integra la matriz de semiconductores, y una pata o pin conductor, cuyo propósito es crear la conexión eléctrica entre la matriz de semiconductores y el circuito externo.

- El adhesivo es un material a base de polímero utilizado para unir el semiconductor a la almohadilla del bastidor principal, de tal forma que inmoviliza el semiconductor durante el proceso de ensamblaje. Existen dos tipos principales de adhesivos: los conductores y los no conductores. Su uso dependerá de las aplicaciones del semiconductor, en caso de que se requiera conductividad eléctrica y disipación térmica, se seleccionará el adhesivo conductor.
- El alambre conductor crea una conexión eléctrica entre la matriz de semiconductores y los cables. El desafío del material del alambre se basa en su tamaño, ya que tiene que ser muy delgado. Aunque la mayoría de los circuitos integrados están ensamblados con alambre de oro debido a su resistencia natural a la corrosión y buena estabilidad térmica, también es posible encontrarlos en plata o aluminio.
- El material de encapsulación permite proteger la matriz de semiconductores del entorno externo, como la humedad, la contaminación y la corrosión. El material de encapsulación es el material más complejo en los circuitos integrados porque debe proveer baja absorción de humedad, bajo estrés, bajo contenido iónico, y alta adhesión al material del marco de conexión.

El proceso de ensamblaje general incluye las siguientes etapas:

- **Preparación de la matriz de semiconductores**. Teniendo en cuenta que una base de silicio puede contener gran cantidad de semiconductores, se hace necesario realizar un proceso de corte para separarlos y obtener una matriz individual, con la cual se puede iniciar el proceso de ensamblaje del circuito integrado. La base de silicio se monta en una cinta de corte que sujeta e inmoviliza la matriz de semiconductores después de cortar la base de silicio. En esta etapa, una cuchilla de diamante es utilizada como herramienta de corte y debe inyectarse agua desionizada para evitar el calentamiento de la pieza.
- **Ensamble de la matriz de semiconductores**. El propósito fundamental en esta etapa es crear una fuerte adhesión entre la matriz de semiconductores y la almohadilla del marco de conexión. El ensamble de la matriz puede dividirse en 3 subetapas: dispensación de la cantidad controlada de adhesivo a la almohadilla, selección y colocación de la matriz de semiconductores con la orientación y posición adecuada, y curado del adhesivo (por temperatura, horno, o un curado rápido).

- **Ensamble del alambre.** El propósito principal de este proceso es crear una conexión eléctrica entre la matriz de semiconductores y el pin conductor del marco de conexión. Para lograrlo, se aplica un pulso ultrasónico al alambre para hacer vibrar el oro a nivel molecular y fusionarlo en el área deseada. Los parámetros que influyen en la resistencia de la unión son: la fuerza de unión, la energía ultrasónica, y el tiempo de unión.
- **Encapsulado**. En esta etapa se realiza el sellado de la matriz semiconductora para protegerla del estrés mecánico y del entorno externo. El proceso de encapsulación se puede dividir en dos subetapas: el moldeo y el curado posterior. El moldeo permite encerrar el paquete de semiconductores a partir de un material especial que se convierte en fase líquida y luego se inyecta para encapsular perfectamente la matriz de semiconductores. Posteriormente, el material inyectado se cura después de solidificarse. Al igual que otros procesos, el moldeo también requiere la optimización de parámetros, como el caudal, el tiempo de curado y el perfil de temperatura.
- **Marcación láser e individualización**. El circuito integrado es etiquetado con el fin de proveer información básica como el nombre del producto, la fecha y lugar de fabricación, y el logotipo de la empresa. Posteriormente, se realiza un proceso de prensado que individualiza el producto separando los semiconductores del pin del marco de conexión, y al mismo tiempo le imprime una forma especial al alambre de conducción.
- **Prueba funcional**. En esta etapa se realiza una prueba eléctrica para garantizar que la matriz de semiconductores pueda realizar su función después de haber sido ensamblada. Algunos de los productos requieren condiciones de prueba especiales, como la prueba de alta temperatura y la prueba de baja temperatura.

5.3 Descripción general del proyecto

Las actividades requeridas para llevar a cabo el proyecto de desarrollo del material para el marco de conexión de un circuito integrado, sus duraciones (representadas como distribuciones de probabilidad normal)[6] y sus relaciones de precedencia, se detallan en la Tabla 5-1.

[6] A excepción de las actividades a insertar en la red del proyecto, las demás actividades y las relaciones de precedencia son prácticamente las mismas presentadas por Lertapiruk en el año 2014. Sin embargo, sus duraciones fueron alteradas para convertirlas en funciones probabilísticas, de tal forma que pudieran ser utilizadas para los propósitos de esta tesis.

Tabla 5-1: Lista de actividades del proyecto de desarrollo de un nuevo material para el marco de conexión de un circuito integrado.

Actividades	Duración en semanas (b_i)	Precedencia
1. Identificar lista de materiales necesarios para construir el nuevo producto	N (1, 0.1)	-
2. Dibujar, revisar y aprobar el marco de conexión (leadframe)	N (4, 0.4)	-
3. Solicitar nuevo código para el encapsulado y recopilar información	N (2, 0.2)	-
4. Definir un nuevo flujo del proceso productivo	N (1, 0.1)	1, 2, 3
5. Reunión de inicio para introducir el nuevo proyecto y concretar el apoyo de las partes interesadas	N (1, 0.1)	4
6. Selección del alambre de conducción para la muestra del prototipo. Definir criterios de calidad y pruebas de confiabilidad.	N (6, 0.6)	-
7. Ordenar el nuevo material: crear la orden de compra para el proveedor.	N (2, 0.2)	5, 6
8. Construir la muestra del marco de conexión	N (16, 1.6)	7
9. Verificar dimensiones del marco de conexión	N (2, 0.2)	8
10. Inspeccionar el espesor del producto	N (2, 0.2)	8
11. Inspeccionar la topografía de la superficie del producto	N (6, 0.6)	8
12. Realizar la prueba de fabricación y construir el prototipo de muestra	N (4, 0.4)	9, 10
13. Realizar la prueba de rendimiento del ensamble y la prueba funcional con su reporte	N (1, 0.1)	11, 12
14. Elaborar el informe de ensamble	N (1, 0.1)	13
15. Prueba de confiabilidad MSLA	N (8, 0.8)	14
16. Prueba de confiabilidad: TMCL	N (12, 1.2)	14
16S. Ajustes al producto y nueva prueba TMCL	N (10, 1)	16
17. Prueba de confiabilidad: HAST	N (10, 1)	14
18. Prueba de confiabilidad: HTSL	N (10, 1)	14
18S. Ajustes al producto y nueva prueba HTSL	N (8, 0.8)	18
19. Transición hacia la producción: reunión con el ingeniero de producción para compartir resultados y parámetros del proceso productivo	N (1, 0.1)	15, 16S, 17, 18S
20. Actualización de las especificaciones aprobadas en el sistema	N (4, 0.4)	14
21. PAPP: Proceso de aprobación de partes de producción (firmado)	N (8, 0.8)	14
22. Reporte del desarrollo realizado	N (2, 0.2)	19, 20, 21
23. Expedición del certificado firmado con la aprobación del nuevo producto	N (4, 0.4)	22
24. Preproducción: instrucciones de trabajo e inspección de los primeros 10 lotes.	N (8, 0.8)	23

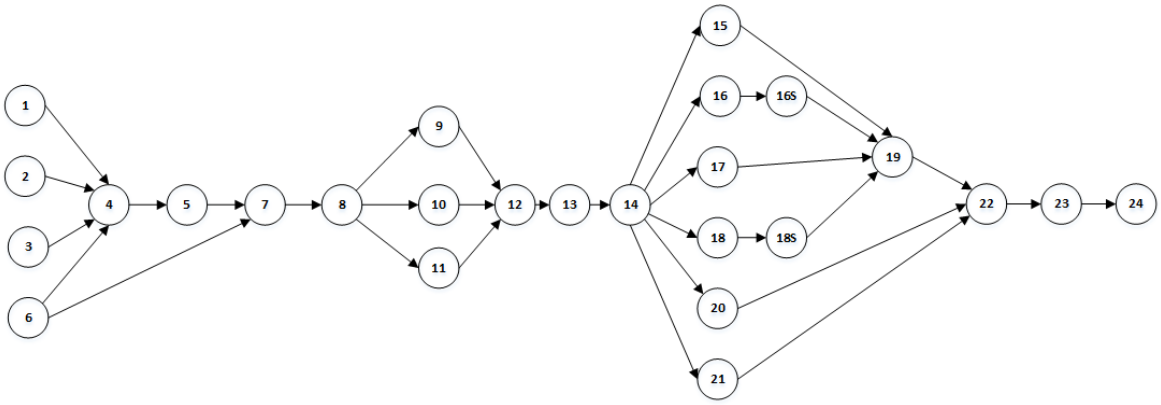
Fuente: Autor

Las actividades 16S y 18S son nuevas actividades a insertar en la red del proyecto, ya que solo se ejecutan si los resultados de las pruebas de confiabilidad TMCL y HTSL no son aceptadas. Para este proyecto, la probabilidad de fracaso de las pruebas TMCL (actividad

16) y HTSL (actividad 18) son del 20% y 18% respectivamente; por lo tanto, estos valores indican la probabilidad de que las actividades 16S y 18S sean insertadas en la red del proyecto.

El diagrama de red que representa el proyecto de desarrollo del nuevo producto ha sido diseñado especialmente para esta tesis[7] y puede ser observado en la Figura 5-1.

Figura 5-1: Diagrama de red del caso de estudio.



Fuente: Autor.

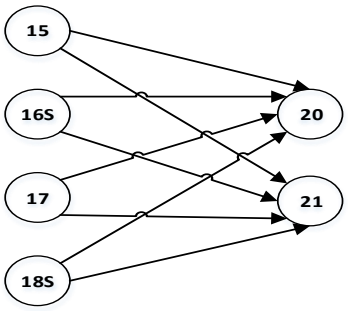
Sin embargo, es preciso indicar que un proyecto de desarrollo de nuevos productos contiene algunas *actividades de decisión*, las cuales pueden condicionar la continuidad de un proyecto. Un resultado desfavorable en una *actividad de decisión* puede conllevar a la cancelación del proyecto y, como consecuencia, a la pérdida de la inversión realizada hasta ese momento. Por este motivo, las *actividades de decisión* y sus predecesoras deben programarse lo antes posible, mientras que las restantes deben programarse una vez finalicen las *actividades de decisión*. Esta estrategia, aunque podría incrementar la duración del proyecto, se enfoca a reducir la pérdida de dinero en caso de que el proyecto sea cancelado.

En este caso de estudio, las *actividades de decisión* están ubicadas en la fase de pruebas de confiabilidad, y corresponden a las actividades 15, 16S, 17, y 18S. Como se dijo

[7] El trabajo original no presentaba un diagrama de red del proyecto, razón por la cual fue necesario elaborarlo aquí, teniendo en cuenta la información sobre precedencias.

anteriormente, estas actividades junto con sus predecesoras deben programarse lo antes posible; mientras que las actividades 20 y 21 deben programarse inmediatamente después de las *actividades de decisión*. Una forma de lograr este propósito consiste en adicionar precedencias ficticias (P_{ij}), tal y como se muestra en la Figura 5-2.

Figura 5-2: Precedencias ficticias.



Fuente: Autor.

En la Tabla 5-2 se detallan los riesgos que pueden afectar a las actividades[8] y en la Tabla 5-3 aparece el cuadro de riesgos del proyecto.

Tabla 5-2: Lista de riesgos y duración de las tareas extra que pueden producirse.

Riesgo	Descripción	Duración en semanas (h_{ki})
Riesgo 1	El proveedor no realiza a tiempo el envío del material	N (4, 0.4)
Riesgo 2	Baja calidad de la muestra del marco de conexión	N (12, 1.2)
Riesgo 3	Algunos recursos requeridos son asignados a otro proyecto vigente	N (2, 0.2)
Riesgo 4	Las máquinas ocupadas impiden la fabricación del prototipo	N (4, 0.4)
Riesgo 5	Los cambios en el circuito no pueden ser soportados por el actual tablero de pruebas	N (12, 1.2)
Riesgo 6	Alta carga de trabajo en el laboratorio retrasa las pruebas del nuevo producto	N (4, 0.4)

Fuente: Autor.

[8] Los riesgos identificados y su descripción fueron tomados del trabajo original de Lertapiruk (2014). Sin embargo, su probabilidad de ocurrencia, su asociación a las actividades, y la duración de las tareas extra, debió ser estimada a partir de la información contenida en el capítulo de análisis de riesgos no técnicos presentado en dicho trabajo.

Tabla 5-3: Cuadro de riesgos para las actividades del proyecto.

Actividades	Duración de la actividad i (b_i)	Riesgo	Tarea extra que impacta la actividad i y es generada por el riesgo k	
			Probabilidad de ocurrencia del riesgo (Pr_{ki})	Duración de la tarea extra (h_{ki})
1	N (1, 0.1)	Ninguno	0	0
2	N (4, 0.4)	Ninguno	0	0
3	N (2, 0.2)	Ninguno	0	0
4	N (1, 0.1)	Ninguno	0	0
5	N (1, 0.1)	Ninguno	0	0
6	N (6, 0.6)	Ninguno	0	0
7	N (2, 0.2)	Ninguno	0	0
8	N (16, 1.6)	Riesgo 1	0.2	N (4, 0.4)
		Riesgo 2	0.1	N (12, 1.2)
9	N (2, 0.2)	Ninguno	0	0
10	N (2, 0.2)	Riesgo 2	0.1	N (12, 1.2)
11	N (6, 0.6)	Riesgo 2	0.1	N (12, 1.2)
12	N (4, 0.4)	Riesgo 3	0.1	N (2, 0.2)
		Riesgo 4	0.35	N (4, 0.4)
13	N (1, 0.1)	Riesgo 5	0.1	N (12, 1.2)
14	N (1, 0.1)	Ninguno	0	0
15	N (8, 0.8)	Ninguno	0	0
16	N (12, 1.2)	Ninguno	0	0
16S	N (10, 1)	Riesgo 6	0.5	N (4, 0.4)
17	N (10, 1)	Ninguno	0	0
18	N (10, 1)	Ninguno	0	0
18S	N (8, 0.8)	Riesgo 6	0.5	N (4, 0.4)
19	N (1, 0.1)	Ninguno	0	0
20	N (4, 0.4)	Ninguno	0	0
21	N (8, 0.8)	Ninguno	0	0
22	N (2, 0.2)	Ninguno	0	0
23	N (4, 0.4)	Ninguno	0	0
24	N (8, 0.8)	Ninguno	0	0

Fuente: Autor.

Adicionalmente, es importante recordar que los recursos críticos del proyecto pueden limitar la programación simultánea de algunas actividades. En este caso de estudio, los recursos críticos renovables corresponden al tiempo dedicado por el personal especializado: líder del proyecto (PL), operario de valoración de la calidad (QA), e ingeniero

de diseño (DE). La Tabla 5-4 presenta la dedicación requerida por parte del personal especializado para ejecutar cada actividad. La dedicación fue asociada al porcentaje de tiempo requerido para contribuir con las actividades del proyecto.

Tabla 5-4: Lista de actividades y recursos requeridos.

Actividades	Tipo de recurso escaso	Dedicación requerida por semana
1. Identificar lista de materiales necesario para construir el nuevo producto	PL	50%
2. Dibujar, revisar y aprobar el marco de conexión (leadframe)	DE	50%
3. Solicitar nuevo código para el encapsulado (package) y recopilar información	PL, DE	20%, 50%
4. Definir el nuevo flujo del proceso productivo	PL	80%
5. Reunión de inicio para introducir el nuevo proyecto y concretar el apoyo de las partes interesadas	PL	50%
6. Selección del cable de conducción para la muestra del prototipo. Definir criterios de calidad y pruebas de confiabilidad.	PL	40%
7. Ordenar el nuevo material: crear la orden de compra para el proveedor.	No requiere	
8. Construir la muestra del marco de conexión	No requiere	
9. Verificar dimensiones del marco de conexión	QA	100%
10. Inspeccionar el espesor del enchapado	QA	100%
11. Inspeccionar la topografía de la superficie	No requiere	
12. Realizar la prueba de fabricación y construir el prototipo de muestra	No requiere	
13. Realizar la prueba de rendimiento del ensamble y la prueba funcional con su reporte	No requiere	
14. Elaborar el informe de ensamble	PL	100%
15. Prueba de confiabilidad MSLA	No requiere	
16. Prueba de confiabilidad: TMCL	No requiere	
16S. Ajustes al producto y nueva prueba TMCL	No requiere	
17. Prueba de confiabilidad: HAST	No requiere	
18. Prueba de confiabilidad: HTSL	No requiere	
18S. Ajustes al producto y nueva prueba HTSL	No requiere	
19. Transición hacia la producción: reunión con el ingeniero de producción para compartir resultados y parámetros del proceso productivo	PL	50%
20. Actualización de las especificaciones aprobadas en el sistema	PL	50%
21. PAPP: Proceso de aprobación de partes de producción (firmado)	QA	100%
22. Reporte del desarrollo realizado	PL	100%
23. Expedición del certificado firmado con la aprobación del nuevo producto	No requiere	
24. Preproducción: Instrucciones de trabajo e inspección de los primeros 10 lotes.	PL	20%

Fuente: Adaptado de (Lertapiruk, 2014)

La disponibilidad de tiempo asignada por semana para el proyecto[9] es del 100% para el líder del proyecto, 100% para el operario de valoración de la calidad, y 50% para el ingeniero de diseño. A manera de ejemplo, mientras se ejecuta la actividad 22, el líder del proyecto (PL) no podrá comprometerse con ninguna otra actividad, ya que dicha actividad le exige una dedicación del 100%.

5.4 Conclusión

En este capítulo fue presentado el caso de estudio relacionado con un proyecto de desarrollo de un nuevo producto. La información original fue adaptada y ampliada, de tal forma que se ajustara a los parámetros que tiene el RCPSP con duración aleatoria de actividades e inserción de tareas.

Entre otras cosas, vale la pena mencionar que los datos originales corresponden a un modelo determinístico, la red del proyecto no contemplaba actividades a insertar, y los recursos renovables no poseían limitaciones en cuanto a disponibilidad.

Al final, el caso de estudio incluyó todos los elementos y parámetros requeridos para la correcta aplicación del modelo de optimización propuesto.

[9] El trabajo original de Lertapiruk no incluye datos sobre la disponibilidad de recursos, razón por la cual fueron establecidos intencionalmente unos valores, que generan conflicto entre las actividades al demandar recursos en forma simultánea.

6. Aplicación del modelo propuesto

6.1 Introducción

En este capítulo se aplica el modelo de optimización propuesto a un problema de programación de proyectos de desarrollo de nuevos productos. Los parámetros de entrada de dicho proyecto se encuentran descritos en el capítulo anterior.

Como se recordará, inicialmente el modelo genera una línea-base diferente asociada a cada uno de los procedimientos empleados en la etapa 2, y posteriormente las compara con el fin de seleccionar la que tiene mejor desempeño desde la perspectiva de robustez.

Sin embargo, teniendo en cuenta que el caso de estudio presentado en el capítulo 5 proporciona una probabilidad conocida de insertar actividades adicionales a la red del proyecto, el problema debe analizarse en torno a las posibles alternativas de inserción de dichas actividades.

Por lo tanto, en seguida se presentan tres alternativas: en el primer caso, el problema es resuelto sin incluir en la red del proyecto las nuevas actividades (lo cual equivale a incluirlas en la red del proyecto con duración igual a cero); en el segundo caso, son incluidas las nuevas actividades, lo cual implica que la red del proyecto se amplía y su fecha de culminación podría ser mayor. Finalmente, en el tercer caso, el problema es resuelto incluyendo en la red del proyecto las actividades, pero con una duración menor a la original. En este caso, la duración se ajusta tomando como parámetro de referencia la probabilidad de que la nueva actividad sea insertada en la red.

6.2 No inclusión de nuevas actividades

A partir de la información contenida en las Tablas 5-1, 5-2, y 5-3 del capítulo anterior, y utilizando las ecuaciones (4.1 – 4.4), se estima la duración de cada actividad (d_i) para cada uno de los procedimientos. Estas acciones corresponden a las etapas 1 y 2 del modelo propuesto. Los resultados obtenidos pueden apreciarse en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1: Duración estimada a partir de cada procedimiento en caso de no incluir las nuevas actividades (en semanas).

Actividad	Procedimiento A	Procedimiento B	Procedimiento C	Procedimiento D
1	1	1	1	1
2	4	4	4	4
3	2	2	2	2
4	1	1	1	1
5	1	1	1	1
6	6	6	6	6
7	2	2	2	2
8	19	20	18	17
9	2	2	2	2
10	4	5	3	3
11	8	9	7	7
12	6	5	6	5
13	2	4	2	2
14	1	1	1	1
15	8	8	8	8
16	12	12	12	12
16S	0	0	0	0
17	10	10	10	10
18	10	10	10	10
18S	0	0	0	0
19	1	1	1	1
20	4	4	4	4
21	8	8	8	8
22	2	2	2	2
23	4	4	4	4
24	8	8	8	8

Fuente: Autor.

En este caso, las nuevas actividades (16S y 18S) no se incluyen en la red del proyecto, razón por la cual, su duración es cero.

Una vez obtenida la duración de cada actividad, se incorpora la información relacionada con la precedencia entre actividades y con los requerimientos de recursos renovables escasos descritos en la Tabla 5-4. En este momento, se inicia la etapa 3, ya que estos datos se convierten en los parámetros de entrada del programa lineal entero que genera los tiempos de inicio de cada actividad, necesarios para construir la línea-base del proyecto.

Como se dijo en el capítulo anterior, el modelo de programación lineal entera fue programado en GAMS usando el *solver* MIP de CPLEX. El tiempo de corrida para cada procedimiento fue de 5 segundos, y los resultados obtenidos pueden verse en la Tabla 6-2. En el Anexo A se ha probado el modelo matemático en redes de proyecto de diferente tamaño con el fin de visualizar su capacidad de respuesta.

Tabla 6-2: Semana de inicio obtenida para cada procedimiento en caso de no incluir las nuevas actividades.

Actividad	Procedimiento A	Procedimiento B	Procedimiento C	Procedimiento D
1	0	0	4	0
2	0	0	2	0
3	4	4	0	4
4	6	6	6	6
5	7	7	7	7
6	0	0	0	0
7	8	8	8	8
8	10	10	10	10
9	33	35	31	30
10	29	30	28	27
11	33	30	29	27
12	35	37	33	32
13	41	42	39	37
14	43	46	41	39
15	48	48	42	40
16	44	47	42	40
16S	-	-	-	-
17	44	47	42	40

Continuación **Tabla 6-2**

Actividad	Procedimiento A	Procedimiento B	Procedimiento C	Procedimiento D
18	45	49	42	40
18S	-	-	-	-
19	57	66	54	52
20	57	63	54	52
21	56	59	54	52
22	64	67	62	60
23	66	69	64	62
24	70	73	68	66

Fuente: Autor.

Adicionalmente, la finalización del proyecto ocurrirá en 78, 81, 76, 74 semanas para los procedimientos A, B, C, y D, respectivamente.

La etapa 4 del modelo de optimización será presentada en el numeral 6.5 (análisis de resultados), ya que corresponde al proceso de selección del procedimiento que genera la línea-base más robusta. Se procederá de igual manera para las siguientes alternativas de inserción.

6.3 Inserción total de nuevas actividades

De manera similar a lo descrito en el numeral anterior, la información contenida en las Tablas 5-1, 5-2, y 5-3 del capítulo anterior, permiten estimar a partir de las ecuaciones (4.1 – 4.4), la duración de cada actividad (di) para cada uno de los procedimientos (ver Tabla 6-3).

A diferencia de la alternativa presentada en la sección anterior, en este caso, son incorporadas a la red del proyecto las nuevas actividades (16S y 18S) y sus duraciones son obtenidas al aplicar las ecuaciones (4.1 – 4.4).

Tabla 6-3: Duración estimada a partir de cada procedimiento para el caso de inserción total de nuevas actividades (en semanas).

Actividad	Procedimiento A	Procedimiento B	Procedimiento C	Procedimiento D
1	1	1	1	1
2	4	4	4	4
3	2	2	2	2
4	1	1	1	1
5	1	1	1	1
6	6	6	6	6
7	2	2	2	2
8	19	20	18	17
9	2	2	2	2
10	4	5	3	3
11	8	9	7	7
12	6	5	6	5
13	2	4	2	2
14	1	1	1	1
15	8	8	8	8
16	12	12	12	12
16S	13	11	12	12
17	10	10	10	10
18	10	10	10	10
18S	11	9	10	10
19	1	1	1	1
20	4	4	4	4
21	8	8	8	8
22	2	2	2	2
23	4	4	4	4
24	8	8	8	8

Fuente: Autor.

Una vez obtenida la duración de cada actividad, y con la información sobre precedencia de actividades y requerimientos de recursos descritos en la Tabla 5-4, se resuelve el programa lineal entero presentado en la sección 4.2.3.

Los tiempos de inicio obtenidos para cada uno de los procedimientos propuestos pueden verse en la Tabla 6-4.

Tabla 6-4: Semana de inicio obtenida para cada procedimiento en el caso de inserción total de nuevas actividades.

Actividad	Procedimiento A	Procedimiento B	Procedimiento C	Procedimiento D
1	2	0	3	0
2	0	0	2	0
3	4	4	0	4
4	6	6	6	6
5	7	7	7	7
6	0	0	0	0
7	8	8	8	8
8	10	10	10	10
9	33	35	28	30
10	29	30	30	27
11	30	30	29	27
12	35	37	33	32
13	41	42	39	37
14	43	46	41	39
15	45	48	42	40
16	44	47	42	40
16S	56	59	54	52
17	45	47	42	50
18	44	49	42	40
18S	55	60	52	50
19	69	75	70	64
20	70	71	67	66
21	69	70	66	64
22	77	78	74	72
23	79	80	76	74
24	83	84	80	78

Fuente: Autor.

Adicionalmente, la finalización del proyecto ocurrirá en 91, 92, 88, y 86 semanas para los procedimientos A, B, C, y D, respectivamente. La selección del procedimiento que genera la línea-base más robusta será presentada en la sección 6.5.

6.4 Inserción parcial de nuevas actividades

Siguiendo el mismo esquema de las secciones anteriores, la Tabla 6-5 presenta la duración de cada actividad (di) para cada uno de los procedimientos.

Tabla 6-5: Duración estimada a partir de cada procedimiento para el caso de inserción parcial de nuevas actividades.

Actividad	Procedimiento A	Procedimiento B	Procedimiento C	Procedimiento D
1	1	1	1	1
2	4	4	4	4
3	2	2	2	2
4	1	1	1	1
5	1	1	1	1
6	6	6	6	6
7	2	2	2	2
8	19	20	18	17
9	2	2	2	2
10	4	5	3	3
11	8	9	7	7
12	6	5	6	5
13	2	4	2	2
14	1	1	1	1
15	8	8	8	8
16	12	12	12	12
16S	3	2	2	2
17	10	10	10	10
18	10	10	10	10
18S	2	2	2	2
19	1	1	1	1
20	4	4	4	4
21	8	8	8	8
22	2	2	2	2
23	4	4	4	4
24	8	8	8	8

Fuente: Autor.

En esta alternativa de inserción, la duración estimada para las nuevas actividades (16S y 18S) hace referencia a una duración ponderada. Por ello, la estimación obtenida a partir

de las ecuaciones (4.1 – 4.4), es multiplicada por su probabilidad de ocurrencia (20% y 18% respectivamente, de acuerdo con el análisis presentado en el numeral 5.2).

Una vez resuelto el programa lineal entero presentado en la sección 4.2.3 se obtienen los tiempos de inicio para cada uno de los procedimientos propuestos (ver Tabla 6-6).

Tabla 6-6: Semana de inicio obtenida para cada procedimiento en el caso de inserción parcial de nuevas actividades.

Actividad	Procedimiento A	Procedimiento B	Procedimiento C	Procedimiento D
1	3	4	0	1
2	2	2	0	0
3	0	0	4	4
4	6	6	6	6
5	7	7	7	7
6	0	0	0	0
7	8	8	8	8
8	10	10	10	10
9	33	35	28	30
10	29	30	30	27
11	30	31	32	27
12	35	37	33	32
13	41	42	39	37
14	43	46	41	39
15	44	47	42	40
16	44	47	42	40
16S	56	59	54	52
17	44	47	42	40
18	45	47	42	40
18S	55	57	52	50
19	65	66	60	54
20	62	61	58	54
21	59	61	56	54
22	67	69	64	62
23	69	71	66	64
24	73	75	70	68

Fuente: Autor.

En este caso, la finalización del proyecto ocurrirá en 81, 83, 78, y 76 semanas para los procedimientos A, B, C, y D, respectivamente.

En la siguiente sección se analizará cada una de las líneas-base creadas y se seleccionará la de mejor desempeño en términos de robustez.

6.5 Análisis de resultados

La comparación de las líneas-base de los proyectos fue realizada teniendo en cuenta el indicador de *robustez de la solución* (SR) y el de *robustez de la calidad* (QR). La *robustez de la solución* analiza la capacidad de una línea-base para soportar las disrupciones que afectan los tiempos de inicio de cada actividad, mientras que la *robustez de la calidad* analiza la capacidad para soportar las disrupciones que afectan la fecha de finalización del proyecto.

Durante el proceso de simulación fueron creados 10000 posibles escenarios de ejecución para el caso de estudio, en cada uno de ellos se aplicó la estrategia reactiva que reprograma la secuencia de actividades tomando como referente la línea-base generada por el programa lineal entero. Al finalizar el proceso de simulación, fueron aplicadas las ecuaciones (4.14) y (4.15), y fueron obtenidos los indicadores de robustez. Este cálculo fue realizado para cada una de las líneas-base asociadas a cada procedimiento propuesto y a cada alternativa de inserción de actividades analizada. El indicador de *robustez de la solución* obtenido en cada caso puede observarse en la Tabla 6-7.

Tabla 6-7: Robustez de la solución (SR) para cada procedimiento y cada alternativa de inserción de nuevas actividades.

Procedimiento	**Inserción de nuevas actividades en la red del proyecto**		
	Parcial	**Total**	**No inclusión**
Procedimiento A	119,011	149,923	121,745
Procedimiento B	133,166	168,611	133,139
Procedimiento C	111,978	129,971	116,61
Procedimiento D	115,894	124,036	121,343

Fuente: Autor.

De acuerdo con los indicadores obtenidos para la *robustez de la solución*, la alternativa de inserción total de las nuevas actividades tiene el peor desempeño entre las alternativas evaluadas. De otra parte, la no inclusión de dichas actividades en la red del proyecto tiene un desempeño ligeramente superior a la inserción parcial, solo cuando se aplica el procedimiento B.

En todo caso, se puede observar claramente que *el procedimiento C con inserción parcial de nuevas actividades*, es el que permite generar la línea-base más robusta para el caso de estudio analizado.

En cuanto al indicador de robustez de la calidad, los resultados son similares, tal y como puede verse en la Tabla 6-8.

Tabla 6-8: Robustez de la calidad (QR) para cada procedimiento y cada alternativa de inserción de nuevas actividades.

Procedimiento	**Inserción de nuevas actividades en la red del proyecto**		
	Parcial	**Total**	**No inclusión**
Procedimiento A	7,131	12,182	7,157
Procedimiento B	7,641	12,747	7,308
Procedimiento C	7,122	10,053	7,469
Procedimiento D	7,570	8,957	8,265

Fuente: Autor.

En este caso, la alternativa de inserción total de las actividades nuevamente tiene el peor desempeño entre las alternativas evaluadas. Al analizar el procedimiento B, se observa un mejor desempeño al “no incluir actividades” en la red del proyecto que al realizar una “inserción parcial”. Sin embargo, en términos generales, el *procedimiento C con inserción parcial de actividades* es el que permite generar la línea-base más robusta para el caso de estudio analizado.

La inserción total de las nuevas actividades nunca generó la mejor solución para el problema analizado, ya que sus indicadores de robustez superan ampliamente las alternativas de inserción parcial y de no inserción de actividades. Éstas dos últimas tienen valores similares de robustez y podría pensarse que cualquiera de las dos constituye una buena opción para generar la línea-base del proyecto.

6.6 Conclusión

En este capítulo se aplicó el modelo de optimización propuesto en un caso de estudio relacionado con un proyecto de desarrollo de un nuevo producto. La aplicación fue llevada a cabo teniendo en cuenta tres posibles alternativas para incorporar nuevas actividades en la red del proyecto.

Los resultados obtenidos a partir del análisis de los indicadores de *robustez de la solución* y *robustez de la calidad* demuestran que el *procedimiento C con inserción parcial de nuevas actividades* generó la mejor línea-base para el caso de estudio.

El Anexo B contiene un análisis en donde se demuestra que los 10.000 escenarios generados en la etapa 4 del modelo matemático son suficientes para obtener indicadores de robustez válidos para el caso de estudio presentado en esta tesis.

7. Conclusiones y trabajo futuro

7.1 Conclusiones

En esta Tesis Doctoral fue creado un modelo de optimización que permite resolver el RCPSP con duración aleatoria e inserción de tareas para el desarrollo de nuevos productos a partir de una estrategia de programación proactiva-reactiva. Como punto de partida, es importante indicar que fue a partir de la identificación de los impactos de los riesgos sobre la línea-base generada, que se consideró al RCPSP con duración aleatoria de actividades e inserción de tareas, un referente adecuado para analizar el problema de programación de este tipo de proyectos.

El modelo propuesto contempló cuatro etapas: identificación y cuantificación de los riesgos que afectan las actividades del proyecto, estimación de la duración de las actividades teniendo en cuenta la afectación por posibles riesgos, generación de líneas-base luego de resolver un programa lineal entero, y selección de la línea-base más robusta.

Aunque tradicionalmente la duración de una actividad y el impacto de los riesgos son modelados por medio de una distribución de probabilidad única, en esta tesis, el enfoque de análisis implicó un proceso de identificación, cuantificación, y asociación de los riesgos con las actividades.

La incorporación del impacto de los riesgos a la duración de cada actividad fue llevada a cabo por medio de un grupo de procedimientos basados en duraciones redundantes, los cuales permitieron adicionar tiempo extra a las duraciones originales. De otra parte, tener en cuenta la inserción de actividades como elemento fundamental del RCPSP, hizo relevante una característica especial de los proyectos de desarrollo de nuevos productos, ya que su impacto sobre la línea-base del proyecto puede llegar a ser significativo.

Con el fin de abordar la solución al problema, fue necesario presentar las bases conceptuales del RCPSP, su formulación matemática, el enfoque de análisis determinístico, el cual provee soluciones óptimas bajo el supuesto de que los datos de entrada son fijos, y el enfoque de análisis no determinístico, que considera los parámetros de entrada como datos probabilísticos o enmarcados dentro de un contexto de incertidumbre. Además, fueron descritas las versiones con múltiples objetivos, con múltiples modos, el problema de compensación tiempo-costo, y el problema de nivelación de recursos.

También fueron presentadas algunas estrategias de solución del RCPSP, allí se indicó la diferencia entre las proactivas, las reactivas, y la estrategia combinada proactiva-reactiva; esta última, básica para evaluar la robustez de las líneas-base generadas por el modelo de optimización propuesto. Adicionalmente, fueron descritas las características más importantes del algoritmo de ramificación y acotamiento, el cual fue utilizado en esta tesis como técnica de solución para el problema de programación de proyectos con recursos restringidos.

El proceso de revisión de literatura científica llevado a cabo destacó los principales aportes en torno al RCPSP desde los enfoques determinístico y no determinístico. El primero de ellos más dinámico que el segundo, ya que la cantidad de artículos por año supera ampliamente al caso no determinístico. El capítulo de revisión de literatura también incluyó una sección en donde se identificaron los artículos más representativos del problema de programación de proyectos para el caso de desarrollo de nuevos productos.

El modelo matemático para el RCPSP fue formulado como un programa lineal entero en tiempo discreto con variables tipo On/Off, fue programado en GAMS y resuelto usando el solver MIP de CPLEX. Las soluciones óptimas generadas sirvieron de base para construir las líneas-base del proyecto presentado como caso de estudio. El programa lineal entero fue aplicado a una red de proyecto que contenía 24 actividades y 3 recursos restringidos.

Las líneas-base generadas fueron comparadas en términos de robustez, razón por la cual fueron empleados dos indicadores que comparan sus tiempos de inicio planeados con los

tiempos de inicio reales. El primero conocido como *robustez de la solución* permitió analizar la capacidad de cada línea-base para soportar las disrupciones que afectan los tiempos de inicio de las actividades del proyecto, y el segundo, conocido como *robustez de la calidad* permitió analizar la capacidad para soportar las disrupciones que afectan la fecha de finalización del proyecto.

Teniendo en cuenta que los indicadores de robustez requieren como dato en entrada el tiempo de inicio real de cada actividad, se diseñó un algoritmo de programación *reactivo*, el cual se basó en un *esquema generador de secuencias* en paralelo. Además, fue necesario llevar a cabo un proceso de simulación para la duración de las actividades, de tal forma que el *esquema generador de secuencias* pudiera seleccionar en cada *punto de decisión*, la actividad que debía programarse en ese instante. Finalmente, las líneas-base generadas para los cuatro procedimientos propuestos, fueron comparadas con los resultados de la programación reactiva para 10000 escenarios simulados a partir de la técnica de Monte Carlo.

El modelo de solución propuesto en esta tesis puede catalogarse como un procedimiento basado en un enfoque proactivo-reactivo, ya que además de establecer una línea-base que sirve de guía para el proyecto, propone una estrategia de reprogramación cuyo objetivo es ajustar la línea-base seleccionada.

De otra parte, es importante mencionar que la información original del proyecto tomado como referente para aplicar el modelo de optimización debió ser adaptada porque los parámetros de entrada debieron ser analizados a partir de un enfoque no determinístico. Por lo tanto, fue ajustada la información relacionada con la duración de las actividades y la duración de las tareas extra; y fue incorporada nueva información relacionada con la probabilidad de ocurrencia de los riesgos, su asignación a las actividades, la disponibilidad de recursos, y la definición de actividades que se insertan en la red del proyecto.

El capítulo final presenta un análisis de robustez en donde se compararon cuatro procedimientos basados en duraciones redundantes a partir tres posibles alternativas para la conformación de una red del proyecto: no insertar las nuevas actividades, llevar a cabo una inserción total de dichas actividades, o realizar una inserción de tipo parcial. De acuerdo con los resultados obtenidos, el procedimiento que contempla el *impacto total* de

los riesgos (procedimiento C) al ser aplicado junto a la alternativa de inserción parcial de nuevas actividades tiene el mejor desempeño para el caso de estudio evaluado

Vale la pena decir que la alternativa de inserción total de las actividades nunca generó la mejor solución para el problema analizado, ya que sus indicadores de robustez superan ampliamente las alternativas de inserción parcial y de no inserción de actividades.

Con todo lo anterior, puede demostrarse el cumplimiento de los objetivos propuestos en el proyecto de tesis, en donde se planteaba desarrollar un modelo basado en optimización robusta, que permitiera seleccionar el procedimiento adecuado para programar proyectos de desarrollo de nuevos productos, considerando la restricción de recursos renovables escasos, el impacto de los riesgos sobre la duración de actividades, y la posibilidad de inserción de nuevas tareas en la red del proyecto.

En el capítulo 4, numeral 4.2.3 se dio cumplimiento al primer objetivo específico de la tesis: “Formular un modelo de programación matemática para resolver el RCPSP determinístico, el cual será útil para generar la línea-base de un proyecto de desarrollo de nuevos productos”. En ese numeral fue desarrollado el modelo de programación matemática para resolver el RCPSP determinístico, el cual fue empleado para generar la línea-base de un proyecto de desarrollo de nuevos productos.

También en el capítulo 4, numeral 4.2.2, fueron diseñados al menos tres procedimientos para estimar la duración de las actividades basados en el método de duraciones redundantes; con lo cual se dio cumplimiento al segundo objetivo específico: “Diseñar tres procedimientos basados en el método de duraciones redundantes, los cuales tendrán como propósito cuantificar el impacto de los riesgos y estimar el tiempo extra que debería asignarse a cada actividad que compone el proyecto”.

El capítulo 6 presentó los resultados de la aplicación del modelo de optimización que incluye el análisis propuesto en el tercer objetivo específico: “Aplicar una medida de robustez para identificar el mejor procedimiento diseñado. Este punto debe tenerse en cuenta porque al abrir la posibilidad de insertar una nueva actividad en la red, se generan

por lo menos dos escenarios de programación: el primero donde se incluye la actividad y el segundo donde se excluye dicha actividad; además, cada uno de ellos tendrá definida una probabilidad de ocurrencia". En este capítulo, fueron aplicadas dos medidas de robustez para identificar el mejor procedimiento diseñado, y fueron tenidas en cuenta diferentes alternativas para insertar nuevas actividades en la red de un proyecto.

Finalmente, es importante mencionar los trabajos de divulgación del conocimiento asociados al trabajo de investigación descrito en la presente tesis doctoral:

"The project scheduling problem with non-deterministic activities duration: A literature review", publicado en: Journal of Industrial Engineering and Management, Año 2018, Volumen: 11(1), páginas: 116-134. DOI: http://dx.doi.org/10.3926/jiem.2492

"Relative Average Deviation as Measure of Robustness in the Stochastic Project Scheduling Problem", publicado en: Revista Facultad De Ingeniería, Año 2019, volumen: 28(52), páginas: 77-97. DOI: https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n52.2019.9756

"A comparison of different redundancy based methods to solve the project scheduling problem with random activivies duration". Artículo publicado en la revista: Management and Production Engineering Review (MPER), Año 2019, volumen:10(3), páginas: 73-80. DOI: 10.24425/mper.2019.129600 .

"An optimization model to solve the resource constrained project scheduling problem RCPSP in new product development projects". Artículo publicado en la revista: DYNA, Año 2020, volumen 87, Número 212, páginas 179-188 DOI: https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.81269.

7.2 Trabajo futuro

El trabajo de investigación realizado en esta tesis doctoral podrá ser el punto de partida para la realización de nuevos estudios que complementen el modelo de optimización propuesto, sugieran cambios y/o mejoren su desempeño.

Las posibilidades de investigación futura son amplias y podrían comenzar con el análisis de sensibilidad que relaciona costos e inversiones con la duración total del proyecto. En este sentido, el siguiente avance podría enfocarse en el problema multi-modo (MRCPSP), ya que será interesante analizar el comportamiento de un proyecto de desarrollo de nuevos productos cuando existe la posibilidad de ejecutar de manera diferente una misma actividad y al mismo tiempo evaluar las limitaciones presupuestales. De manera similar vale la pena estudiar el problema de compensación tiempo-costo.

Otras opciones de investigación están relacionadas con las estrategias de compresión (Crashing), interrupción (Preemption), y traslape (Overlap / Time-Lags) de actividades; útiles cuando se desea cumplir con la fecha de finalización de un proyecto, y analizado en un contexto probabilístico para la duración de las actividades y la inserción de nuevas tareas. En todo caso no se excluye la posibilidad de llevar a cabo el proceso de modelado en un contexto de incertidumbre.

El modelo de optimización propuesto en esta investigación solo incluye recursos de tipo renovable, por tal razón, una alternativa adicional consiste en incorporar recursos no renovables y recursos doblemente restringidos.

Las posibilidades descritas anteriormente pueden extenderse a redes de proyecto más complejas, en donde sean analizados los tipos de riesgos no contemplados en el modelo actual. Este análisis seguramente generará redes con actividades cíclicas, y/o redes con rutas alternas.

Finalmente, se recomienda la incorporación de técnicas metaheurísticas en la etapa 3 del modelo propuesto, debido a que el proceso de solución de problemas de gran complejidad y tamaño exigirá dicho ajuste.

A. Anexo: Complejidad de la red que soporta el modelo propuesto

El problema del caso de estudio analizado en esta tesis contiene 24 actividades. Sin embargo, para analizar la complejidad de la red que soporta el modelo propuesto, se han trabajado 4 problemas adicionales de diferente tamaño (seleccionados aleatoriamente de la librería PSPLIB para el problema RCPSP):

El primero seleccionado aleatoriamente corresponde al problema número 382 de la lista de problemas j30, el segundo es el problema número 19 de la lista de problemas j60, el tercero, el problema j904-7 de la lista de problemas j90, y el cuarto, el problema j12043-9 de la lista j120. Cada uno de estos problemas fue analizado contemplando tres recursos renovables.

Para desarrollar las pruebas, fue necesario adaptar los problemas de acuerdo con las características particulares del PSP con duración de actividades aleatorias, teniendo en cuenta que estos problemas fueron desarrollados para problemas determinísticos. Los ajustes realizados fueron los siguientes:

- Duración básica de la actividad (bi) fue asumida como una distribución de probabilidad normal, con una media igual a la duración determinística en el problema original. La desviación estándar fue generada aleatoriamente a partir de una distribución uniforme definida en un intervalo que oscila entre el 10% y el 20% de la duración determinística. Este intervalo permite crear escenarios con baja variabilidad, tal y como ocurre con actividades libres de riesgos.

- La duración de las Tareas Extra (h_{ki}), fueron asumidas como distribuciones de probabilidad normales con medias generadas aleatoriamente (distribución uniforme) en un

intervalo que oscila entre el 1% y el 33% de la duración determinística. Las desviaciones estándar también fueron generadas aleatoriamente (distribución uniforme) y sus valores oscilaron entre el 10% y el 20% de la media obtenida para cada tarea extra.

- El número de riesgos asignados a cada actividad osciló entre cero y tres.

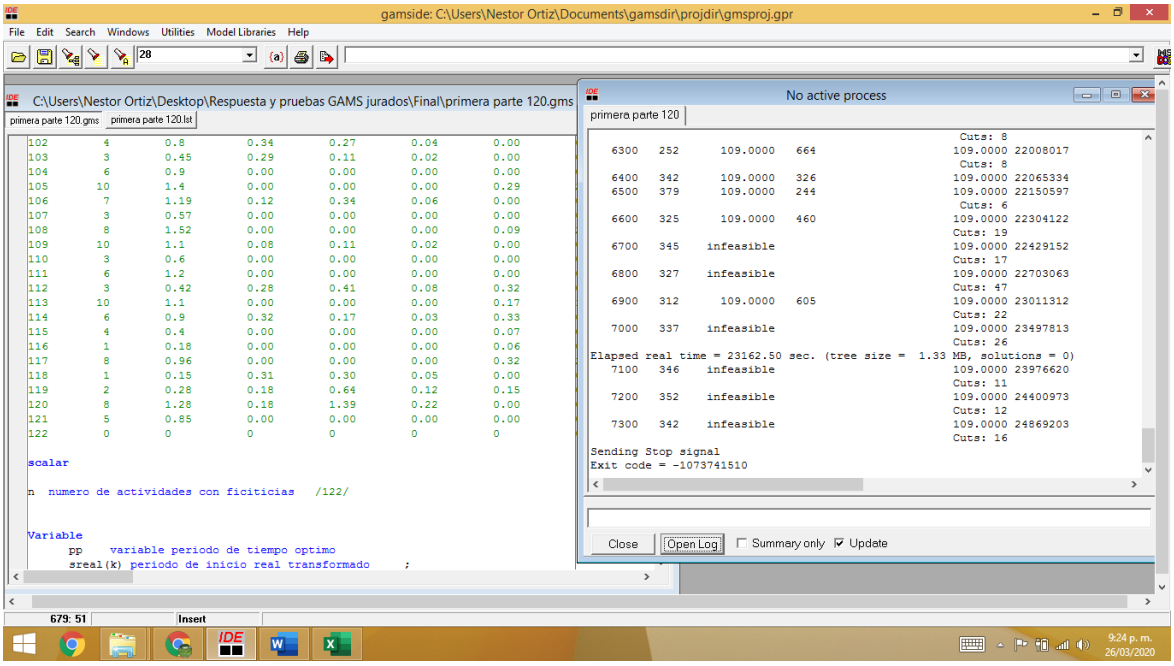
- La probabilidad de ocurrencia de cada riesgo fue generada aleatoriamente por medio de una distribución uniforme comprendida entre 0,05 y 0,5.

Con base en lo anterior, se procede a probar el modelo diseñado:

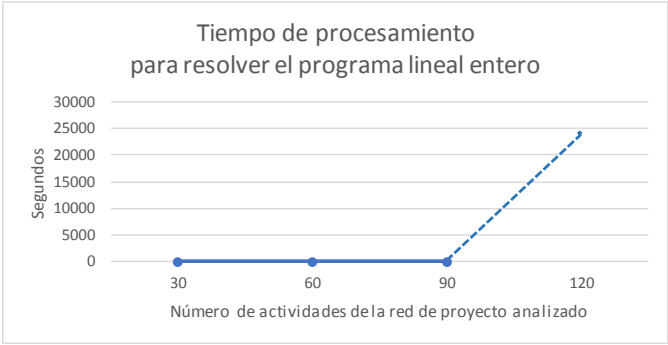
Inicialmente se ejecuta la etapa 3 del modelo propuesto: se utiliza el programa lineal entero (PLE) para establecer los tiempos de inicio de cada actividad del proyecto. Posteriormente con esta información se ejecuta la etapa 4 del modelo (simulación de Monte Carlo y el sistema generador de secuencias en paralelo) para analizar la robustez. Los dos algoritmos fueron escritos en GAMS.

Al resolver el PLE para el problema j30, j60 y j90, fueron obtenidos los tiempos de inicio de las actividades para los 4 procedimientos que evalúa del modelo (pueden observarse al final de este documento). El tiempo de procesamiento consumido por el PLE fue: 2,10 segundos, 5,79 segundos, y 7,24 segundos respectivamente para el problema j30, el j60 y el j90.

Para el problema j12043-9 no se presenta la solución debido a que el PLE en GAMS tardó mucho tiempo sin encontrar respuesta. El procesamiento se interrumpió después de 6 horas 53 minutos y 34 segundos (ver imagen).



Como consecuencia de lo anterior, la etapa 4 del modelo no se pudo ejecutar para el problema j12043-9.



Etapa 4: durante la simulación de los 10.000 escenarios para los 3 problemas restantes, apareció un inconveniente relacionado con la capacidad del software licenciado, ya que el procesamiento se detuvo. Sin embargo, esta situación puede ser superada si solo son simulados 100 escenarios por corrida. En este caso, deberá ejecutarse el proceso 100 veces (cambiando la semilla de aleatoriedad) hasta completar los 10.000 escenarios. Posteriormente se podría calcular la robustez sumando los resultados parciales. A continuación, se presenta el tiempo de procesamiento para ejecutar el proceso de simulación de 100 escenarios utilizando el esquema generador de secuencias en paralelo para los problemas j30, j60, y j90:

Problema	Tiempo de procesamiento Etapa 4	
	Valor real para la ejecución de 100 escenarios	**Valor estimado para 10.000 escenarios**
J30	2,82 segundos	18,8 minutos
J60	5,99 segundos	39,93 minutos
J90	11,36 segundos	75,73 minutos

B. Anexo: Cantidad de escenarios simulados en la etapa 4 del modelo propuesto

El análisis que se presenta a continuación permite identificar la cantidad de escenarios requeridos para llevar a cabo un adecuado proceso de simulación, teniendo como referente el caso de estudio descrito en esta tesis doctoral.

Para realizar el análisis, se correrá el modelo propuesto bajo el mismo esquema que se presentó en el capítulo 6, pero cambiando solamente el número de escenarios generados en la etapa 4 (se recuerda que en esta etapa se realiza un proceso de simulación con el fin de seleccionar la mejor línea-base del proyecto a partir de dos indicadores de robustez).

Inicialmente se calcularán los índices de robustez para el proyecto teniendo en cuenta la generación 10, 20 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 escenarios. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

	No inclusion - Robustez de Solución				Inserción total - Robustez de Solución				Insercion parcial - Robustez de Solución			
Cantidad de escenarios	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B
10	84,70	132,40	121,90	116,80	118,50	102,00	158,70	150,20	93,00	66,80	112,00	149,60
20	111,20	101,35	130,65	123,85	147,15	119,20	145,80	155,45	94,65	139,35	124,25	119,90
30	109,17	139,00	111,90	129,20	136,20	137,10	137,57	161,47	110,77	111,50	120,20	135,17
40	109,95	120,73	134,15	133,23	133,43	112,30	141,33	171,35	104,45	109,65	129,40	133,20
50	106,38	110,72	135,12	131,24	117,38	110,06	152,66	177,50	96,74	92,14	108,48	138,00
60	110,18	127,52	119,33	124,23	135,23	111,87	148,60	162,42	114,20	121,87	128,58	125,00
70	113,10	121,20	106,13	131,74	134,91	110,77	148,51	185,79	109,77	97,53	122,63	131,57
80	115,20	106,70	128,06	145,63	135,89	118,68	148,34	169,31	102,65	96,71	115,58	138,61
90	113,12	123,32	121,54	131,18	117,11	113,04	153,24	179,78	110,18	126,06	130,50	117,47
100	109,31	134,55	118,11	133,51	124,36	125,29	151,77	175,65	101,59	124,25	118,03	137,73
Diferencia (máx-mín)	30,50	37,65	28,99	28,83	30,04	35,10	21,13	35,59	21,20	72,55	22,02	32,13

En la tabla anterior se comparan los indicadores de robustez de la solución para las tres alternativas de inserción de nuevas actividades (No inclusión, Inserción total, Inserción parcial). Adicionalmente se evalúan los 4 procedimientos presentados en la etapa 2 (A, B, C, D).

De acuerdo con los resultados, los indicadores de robustez de la solución, analizados para cada alternativa de inserción y para cada procedimiento (análisis por columna) presentan grandes diferencias entre ellos. En otras palabras, estos indicadores presentan alta variabilidad. De otra parte, se ha calculado la máxima diferencia entre los indicadores de robustez (la última fila de la tabla); esta diferencia es muy alta comparada con cualquier valor de la tabla.

La misma situación se presenta con el indicador de robustez de la calidad:

	No inclusion - Robustez de Calidad				Inserción total - Robustez de Calidad				Inserción parcial - Robustez de Calidad			
Cantidad de escenarios	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B
10	4,30	9,40	7,10	6,30	9,70	8,20	15,10	11,10	5,30	5,50	6,90	8,30
20	6,60	6,60	8,05	5,65	9,75	7,25	11,05	10,30	6,55	9,30	6,35	8,55
30	6,97	9,43	6,47	6,67	10,00	9,60	12,20	13,37	6,80	6,27	6,77	8,33
40	7,12	7,58	8,50	7,20	10,08	8,28	10,85	13,23	7,03	7,58	7,98	8,08
50	6,84	6,42	8,80	7,38	8,70	7,54	13,22	13,88	6,00	7,18	6,40	7,62
60	7,03	8,58	6,63	6,88	10,80	7,40	11,90	12,05	6,92	8,45	7,67	7,20
70	7,14	8,50	5,96	7,37	11,11	8,93	12,10	14,23	6,84	6,36	7,44	7,87
80	7,19	7,50	7,80	8,64	10,40	9,30	12,09	13,26	6,76	6,58	7,04	7,88
90	7,16	8,56	7,27	7,28	9,14	9,12	12,54	14,08	7,19	8,11	8,04	6,26
100	7,07	9,53	7,22	7,42	9,71	8,62	12,36	13,93	6,68	7,65	7,28	8,39
Diferencia (máx-mín)	2,89	3,11	2,84	2,99	2,41	2,35	4,25	3,93	1,89	3,80	1,69	2,29

Lo anterior demuestra que se requiere generar más de 100 escenarios para calcular indicadores de robustez más confiables. Por lo tanto, se realiza un nuevo análisis mediante la generación de por lo menos 1000 escenarios. La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos para los indicadores de robustez de la solución y robustez de la calidad:

	No inclusion - Robustez de Solución				Inserción total - Robustez de Solución				Insercion parcial - Robustez de Solución			
Cantidad escenarios	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B
1010	114,69	115,78	120,38	130,43	131,54	122,37	148,92	169,49	112,71	113,15	115,58	135,85
1020	114,79	115,22	119,78	131,89	131,98	123,63	148,50	170,67	113,40	112,36	114,69	134,15
1030	114,87	115,03	119,75	129,69	132,00	123,34	147,95	171,12	113,33	114,55	116,96	132,32
1040	114,60	113,68	119,73	127,85	132,05	122,03	147,64	170,98	113,39	114,82	118,99	132,15
1050	114,37	116,58	119,54	129,13	131,26	122,19	146,20	172,86	111,96	115,10	118,47	132,33
1060	114,28	119,71	120,22	130,57	131,19	122,47	145,89	171,31	112,26	114,98	117,85	134,51
1070	114,47	119,96	122,18	130,46	130,92	122,45	144,32	172,54	112,43	114,21	119,12	133,78
1080	114,26	119,51	123,67	129,67	131,54	122,60	144,93	168,36	111,31	113,28	119,19	134,37
1090	114,22	120,41	123,68	128,20	131,63	122,19	145,56	167,48	111,14	113,26	120,57	136,27
1100	114,53	120,72	124,47	129,14	131,08	121,14	147,01	167,21	111,55	114,53	119,13	136,34
Diferencia (máx-mín)	0,65	7,05	4,93	4,04	1,12	2,50	4,60	5,65	2,26	2,74	5,87	4,19

	No inclusion - Robustez de Calidad				Inserción total - Robustez de Calidad				Inserción parcial - Robustez de Calidad			
Cantidad escenarios	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B
1010	7,46	7,81	7,12	7,04	10,05	9,05	11,97	12,83	7,03	7,37	6,82	7,81
1020	7,48	7,78	6,95	7,21	10,20	9,12	11,81	12,85	7,11	7,36	6,76	7,70
1030	7,50	7,81	6,98	7,02	10,19	9,09	11,98	12,94	7,11	7,50	6,88	7,56
1040	7,48	7,77	6,98	6,93	10,22	9,03	12,09	12,91	7,15	7,48	7,04	7,46
1050	7,46	7,80	7,02	7,05	10,10	8,93	11,92	12,98	7,01	7,48	6,98	7,44
1060	7,46	7,95	7,07	7,18	10,08	8,93	11,83	12,99	7,03	7,47	6,90	7,66
1070	7,47	8,00	7,26	7,09	10,03	8,87	11,64	13,06	7,02	7,42	7,06	7,60
1080	7,46	8,05	7,38	7,00	10,05	8,99	11,69	12,71	6,96	7,34	7,07	7,58
1090	7,46	8,09	7,37	6,83	10,04	8,88	11,79	12,61	6,94	7,35	7,22	7,71
1100	7,48	8,09	7,44	6,95	10,05	8,81	11,99	12,47	7,01	7,41	7,16	7,80
Diferencia (máx-mín)	0,04	0,32	0,49	0,38	0,19	0,31	0,44	0,59	0,22	0,16	0,47	0,37

De acuerdo con los resultados anteriores, la variación entre los indicadores de robustez mejoró notablemente. Sin embargo, la Diferencia máxima para algunos indicadores de robustez representa un valor mayor al 5% (por ejemplo, en la columna de No inclusión-Robustez de la solución para el procedimiento D, al dividir 7,05 entre 113,68 se obtiene 6,2%). Por esta razón, se analizará el modelo propuesto generando un mayor número de escenarios.

Las siguientes tablas presentan resultados al generar por lo menos 3000 escenarios:

	No inclusion - Robustez de Solución				Inserción total - Robustez de Solución				Insercion parcial - Robustez de Solución			
Cantidad de escenarios	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B
3010	117,43	120,58	122,03	132,86	129,69	124,09	150,66	170,96	113,23	117,04	120,69	132,74
3020	117,33	122,62	122,09	132,12	129,10	124,41	150,61	171,91	113,15	116,57	120,59	132,06
3030	117,30	121,89	122,35	132,67	129,72	124,96	150,81	172,32	113,08	116,05	120,09	132,38
3040	117,53	122,80	122,02	131,36	129,07	124,15	150,77	171,36	112,67	116,91	121,05	132,58
3050	117,61	122,17	122,28	131,93	128,92	124,44	150,97	171,62	112,42	115,97	120,30	132,04
3060	117,58	121,10	122,23	131,66	128,64	124,33	150,64	170,00	112,54	116,14	120,38	131,92
3070	117,49	121,43	122,59	131,56	128,60	124,57	150,77	169,83	112,62	115,87	120,72	130,91
3080	117,37	121,47	123,14	132,06	128,70	124,43	150,71	170,53	112,49	114,86	120,48	131,33
3090	117,32	121,85	123,03	132,12	128,73	124,13	150,97	169,94	112,69	115,34	119,81	131,50
3100	117,26	121,01	122,60	132,59	128,78	123,80	150,92	169,67	112,86	115,84	119,47	131,73
Diferencia (máx-mín)	0,34	2,22	1,11	1,50	1,12	1,16	0,36	2,65	0,81	2,18	1,58	1,83

	No inclusion - Robustez de Calidad				Inserción total - Robustez de Calidad				Inserción parcial - Robustez de Calidad			
Cantidad de escenarios	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B
3010	7,55	8,13	7,29	7,14	9,93	8,92	11,97	12,92	7,29	7,59	7,33	7,61
3020	7,55	8,28	7,29	7,09	9,92	8,93	11,95	13,02	7,28	7,58	7,30	7,57
3030	7,55	8,24	7,30	7,13	9,94	8,97	11,96	13,02	7,28	7,54	7,27	7,60
3040	7,56	8,30	7,29	7,02	9,90	8,90	11,95	12,97	7,25	7,61	7,34	7,60
3050	7,57	8,25	7,30	7,06	9,87	8,88	11,95	13,01	7,22	7,57	7,27	7,56
3060	7,56	8,17	7,28	7,05	9,86	8,87	11,95	12,85	7,24	7,59	7,26	7,54
3070	7,55	8,20	7,30	7,02	9,85	8,93	11,97	12,86	7,24	7,56	7,29	7,46
3080	7,54	8,20	7,33	7,09	9,87	8,90	11,99	12,88	7,23	7,48	7,26	7,51
3090	7,54	8,23	7,29	7,10	9,89	8,86	12,01	12,83	7,24	7,53	7,20	7,51
3100	7,54	8,19	7,25	7,13	9,91	8,85	12,01	12,86	7,24	7,56	7,17	7,51
Diferencia (máx-mín)	0,03	0,17	0,08	0,12	0,09	0,12	0,06	0,19	0,07	0,13	0,17	0,16

De acuerdo con los resultados anteriores, para 3000 escenarios, la variación de los indicadores de robustez es mínima, ya que la diferencia máxima comparada con cualquier valor de la tabla es menor al 5%. Por lo tanto, puede deducirse para el caso de estudio presentado en esta tesis, que basta con generar 3000 escenarios con el fin de realizar el proceso de simulación de la etapa 4. El modelo tal y como está planteado contempla la realización de 10000 escenarios, lo cual permite abordar redes de proyecto más complejas.

Bibliografía

Adida, E., & Joshi, P. (2009). A Robust optimisation approach to project scheduling and resource allocation. *International Journal of Services Operations and Informatics*, *4*(2), 169–193. https://doi.org/10.1504/IJSOI.2009.023421

Archer, S., Armacost, R. L., & Pet-armacost, J. (2009). Effectiveness of resource buffers for the Stochastic Task Insertion Problem. *The Journal of Management and Engineering Integration*, *2*(2), 14–21.

Artigues, C., Demassey, S., & Néron, E. (2008). The Resource Constrained Project Scheduling Problem. In *Resource-Constrained Project Scheduling: Models, Algorithms, Extensions and Applications* (pp. 21–34). https://doi.org/10.1080/05695557108974820

Artigues, C., Koné, O., Lopez, P., & Mongeau, M. (2015). Mixed-integer linear programming formulations. In *Handbook on Project Management and Scheduling* (Vol. 1, pp. 17–41). https://doi.org/10.1007/978-3-319-05443-8

Ash, R. C., & Pittman, P. H. (2008). Towards holistic project scheduling using critical chain methodology enhanced with PERT buffering chain methodology enhanced with PERT buffering. *International Journal of Organisation and Management*, *1*(2), 185–203. https://doi.org/10.1504/IJPOM.2008.022191

Ashtiani, B., Jalali, G., Aryanezhad, M. B., & Makui, A. (2007). A new approach for buffer sizing in Critical Chain scheduling. In *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (pp. 1037–1041). https://doi.org/10.1109/IEEM.2007.4419350

Ashtiani, B., Leus, R., & Aryanezhad, M. B. (2011). New competitive results for the Stochastic Resource-Constrained Project Scheduling Problem: Exploring the benefits of pre-processing. *Journal of Scheduling*, *14*(2), 157–171. https://doi.org/10.1007/s10951-009-0143-7

Ballestin, F., & Leus, R. (2007). Resource-Constrained Project Scheduling for timely project completion with stochastic activity durations. *Katholieke Universiteit Leuven*, 1–34.

Behnam, A., Harfield, T., & Kenley, R. (2016). Construction management scheduling and control: The familiar historical overview. In N. A. & S. L. Kamaruzzaman., A. Ali. (Ed.), *The 4th International Building Control Conference* (pp. 754–759). Kuala Lumpur. https://doi.org/10.1051/00101

Bie, L., Cui, N., & Zhang, X. (2011). Buffer sizing approach with dependence assumption between activities in critical chain scheduling. In *POMS 22nd Annual Conference*.

Błażewicz, J., Ecker, K. H., Pesch, E., Schmidt, G., & Weglarz, J. (2007). Scheduling under resource constraints. In *Handbook on Scheduling: From Theory to Applications* (pp. 425–475). https://doi.org/10.1007/978-3-540-32220-7_12

Böttcher, J., Drexl, A., Kolisch, R., & Salewski, F. (2008). Project Scheduling under partially renewable resource constraints. *Management Science*, *45*(4), 543–559. https://doi.org/10.1287/mnsc.45.4.543

Brčić, M., Kalpic, D., & Fertalj, K. (2012). Resource Constrained Project Scheduling under uncertainty: A Survey. In *23rd Central European Conference on Information and Intelligent Systems* (pp. 401–409).

Brcic, M., Kalpic, D., & Katic, M. (2014). Proactive Reactive Scheduling in Resource Constrained Projects with flexibility and Quality Robustness requirements. In *Combinatorial Optimization* (pp. 112–124). https://doi.org/10.1007/978-3-662-21711-5

Browning, T. R., & Yassine, A. A. (2010). A random generator of resource-constrained multi-project network problems. *Journal of Scheduling*, *13*(2), 143–161. https://doi.org/10.1007/s10951-009-0131-y

Bruni, M. E., Puglia, L. Di, Beraldi, P., & Guerriero, F. (2017). An adjustable robust optimization model for the resource-constrained project scheduling problem with uncertain activity durations. *Omega*, *71*, 66–84. https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.09.009

Bruni, M. E., Pugliese, L. D. P., Beraldi, P., & Guerriero, F. (2018). A computational study of exact approaches for the adjustable robust resource-constrained project scheduling problem. *Computers and Operations Research*, *99*, 178–190. https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.06.016

Capa, C., & Ulusoy, G. (2015). Proactive project scheduling in an R&D department: A bi

Objective genetic algorithm. In *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)* (pp. 1–6). https://doi.org/10.1109/IEOM.2015.7093733

Chakrabortty, R. K., Sarker, R. A., & Essam, D. L. (2017). Resource constrained project scheduling with uncertain activity durations. *Computers & Industrial Engineering*. https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.040

Chen, Y., Xiong, J., & Zhou, Z. (2016). Resilence Analysis for Projects Scheduling with Renewable Resource Constraint and Uncertain Activity Durations. *Journal of Industrial and Management Optimization*, *12*(2), 719–737. https://doi.org/10.3934/jimo.2016.12.719

Cheng, J., Fowler, J., & Kempf, K. (2012). Simulation-based multi-mode resource-constrained project scheduling of semiconductor equipment installation and qualification. In *Proceedings - Winter Simulation Conference*. https://doi.org/10.1109/WSC.2012.6465247

Cho, S.-H., & Eppinger, S. D. (2005). A Simulation-Based Process Model for Managing Complex Design Projects. *IEEE Transactions on Engineering Management*, *52*(3), 316–328. https://doi.org/10.1109/TEM.2005.850722

Choi, J., Lee, J. H., & Realff, M. J. (2003). Simulation based approach for improving heuristics in stochastic resource constrained project scheduling problem. In *Process Systems Engineering 2003, 8th International Symposium on Process Systems Engineering* (Vol. 15, pp. 439–444). https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Choi, J., Realff, M. J., & Lee, J. H. (2004). Dynamic programming in a heuristically confined state space: A stochastic resource-constrained project scheduling application. *Computers and Chemical Engineering*, *28*(6–7), 1039–1058. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.09.024

Chtourou, H., & Haouari, M. (2008). A two-stage-priority-rule-based algorithm for robust resource-constrained project scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, *55*(1), 183–194. https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.11.017

Creemers, S. (2014). The Resource-constrained Project Scheduling Problem with Stochastic Activity Durations. In *IEEE International Conference onIndustrial Engineering and Engineering Management* (pp. 453–457).

Creemers, S. (2015). Minimizing the expected makespan of a project with stochastic activity durations under resource constraints. *Journal of Scheduling*, *18*(3), 263–273.

https://doi.org/10.1007/s10951-015-0421-5

Creemers, S. (2019). The preemptive stochastic resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, *277*(1), 238–247. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.02.030

Creemers, S., De Reyck, B., & Leus, R. (2015). Project planning with alternative technologies in uncertain environments. *European Journal of Operational Research*, *242*(2), 465–476. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.014

Creemers, S., Leus, R., & De Reyck, B. (2010). Project scheduling with alternative technologies: Incorporating varying activity duration variability. In *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (pp. 641–645). https://doi.org/10.1109/IEEM.2010.5674523

Davari, M., & Demeulemeester, E. (2017). The proactive and reactive resource-constrained project scheduling problem. *Journal of Scheduling*, *faltaaaaa*, 1–27. https://doi.org/10.1007/s10951-017-0553-x

Davari, M., & Demeulemeester, E. (2019). Important classes of reactions for the proactive and reactive resource-constrained project scheduling problem. *Annals of Operations Research*, *274*(1), 187–210. https://doi.org/10.1007/s10479-018-2899-7

De Reyck, B., & Herroelen, W. (1996). On the use of the complexity index as a measure of complexity in activity networks. *European Journal of Operational Research*, *91*(2), 347–366. https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00344-0

Deblaere, F., Demeulemeester, E., & Herroelen, W. (2011). Proactive policies for the stochastic resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, *214*(2), 308–316. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.04.019

Elmaghraby, S. E. (2005). On the fallacy of averages in project risk management. *European Journal of Operational Research*, *165*, 307–313. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.003

Fallah, M., & Ashtiani, B. (2010). Critical Chain Project Scheduling: Utilizing Uncertainty for Buffer Sizing. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, *3*(June), 280–289.

Fernandez, A. A., Armacost, R. L., & Pet-Edwards, J. J. (1998). Understanding simulation solutions to resource constrained project scheduling problems with stochastic task

durations. *EMJ Engineering Management Journal*, *10*(4), 5–13. https://doi.org/10.1080/10429247.1998.11415002

Fu, N., Lau, H. C., & Xiao, F. (2008). Generating robust schedules subject to resource and duration uncertainties. In *Proceedings of the 18th International Conference on Automated Planning and Scheduling* (pp. 83–90).

Gan, L., & Xu, J. (2015). Control risk for multimode resource-constrained project scheduling problems under hybrid uncertainty. *Journal of Management in Engineering*, *31*(3), 1–16. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000243

Gao, F., Chen, Y., Jiang, G., & Liu, Y. (2005). Model and heuristic algorithm of R&D project scheduling problem with stochastic number of activity iterations. In *IEEE International Conference on Information Reuse and Integration* (pp. 276–281). https://doi.org/10.1109/IRI-05.2005.1506486

Ghoddousi, P., Ansari, R., & Makui, A. (2017). An improved robust buffer allocation method for the project scheduling problem. *Engineering Optimization*, *49*(4), 718–731. https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1206534

Goldratt, E. M. (1997). *Critical Chain*. The North River Press Publishing Corporation. https://doi.org/10.2307/3009987

Golenko-Ginzburg, D., & Gonik, A. (1997). Stochastic network project scheduling with non-consumable limited resources. *International Journal of Production Economics*, *48*(1), 29–37. https://doi.org/10.1016/S0925-5273(96)00019-9

Golenko-Ginzburg, D., & Gonik, A. (1998). A heuristic for network project scheduling with random activity durations depending on the resource allocation. *International Journal of Production Economics*, *55*(2), 149–162. https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00044-9

Golenko-Ginzburg, D., Gonik, A., & Baron, A. (2006). Resource Constrained Project Scheduling Models Under Random Disturbances. In *Perspectives in Modern Project Scheduling* (pp. 53–78). Springer US.

Golenko-Ginzburg, D., Gonik, A., & Laslo, Z. (2003). Resource constrained scheduling simulation model for alternative stochastic network projects. *Mathematics and Computers in Simulation*, *63*(2), 105–117. https://doi.org/10.1016/S0378-4754(03)00050-8

Gutjahr, W. J. (2015). Bi-objective multi-mode project scheduling under risk aversion. *European Journal of Operational Research*, *246*(2), 421–434.

https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.004

Habibi, F., Barzinpour, F., & Sadjadi, S. J. (2018). Resource-constrained project scheduling problem: review of past and recent developments. *Journal of Project Management*, *3*, 55–88. https://doi.org/10.5267/j.jpm.2018.1.005

Hartmann, S. (1999). Project Scheduling Models. In *Project Scheduling under Limited Resources* (Vol. 478, pp. 5–10). https://doi.org/10.1007/978-3-642-58627-9

Hazir, O., Haouari, M., & Erel, E. (2010). Robust scheduling and robustness measures for the discrete time/cost trade-off problem. *European Journal of Operational Research*, *207*(2), 633–643. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.05.046

Heldman, K. (2005). *Risk Management: Project Managers Spotlight on*. *Project Managers Spotlight on:*

Herroelen, W., & Leus, R. (2004). The construction of stable project baseline schedules. *European Journal of Operational Research*, *156*(3), 550–565. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00130-9

Huang, M., Yuan, J., & Xiao, J. (2015). An Adapted Firefly Algorithm for Product Development Project Scheduling with Fuzzy Activity Duration. *Mathematical Problems in Engineering*, *2015*, 1–11. https://doi.org/10.1155/2015/973291

Iranmanesh, H., Mansourian, F., & Kouchaki, S. (2016). Critical chain scheduling : a new approach for feeding buffer sizing. *Int. J. Operational Research*, *25*(1), 114–130. https://doi.org/https://doi.org/10.1504/IJOR.2016.073254

Karam, A., & Lazarova-Molnar, S. (2013). Recent trends in solving the deterministic resource constrained Project Scheduling Problem. In *2013 9th International Conference on Innovations in Information Technology, IIT 2013* (pp. 124–129). IEEE. https://doi.org/10.1109/Innovations.2013.6544405

Klein, R. (2000). Resource-Constrained Scheduling Problems. In *Scheduling of resource-constrained projects* (pp. 73–109). https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4629-0

Kolisch, R., & Hartmann, S. (2006). Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: An update. *European Journal of Operational Research*, *174*(1), 23–37. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.01.065

Kolisch, R., Sprecher, A., & Drexl, A. (1995). Characterization and Generation of a General Class of Resource-Constrained Project Scheduling Problems. *Management Science*,

41(10), 1693–1703. https://doi.org/10.1287/mnsc.41.10.1693

Leon, V. J., Wu, S. D., & Storer, R. H. (1994). Robustness measures and robust scheduling for job shops. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, *26*(5), 32–43. https://doi.org/10.1080/07408179408966626

Lertapiruk, V. (2014). *Process improvement for new product development case study: integrated circuits chip*. Chulalongkorn University.

Leus, R., & Herroelen, W. (2002). *Stability and resource allocation in project planning*. *IIE Transactions* (Vol. 2376). https://doi.org/10.1080/07408170490447348

Li, H., & Womer, N. K. (2015). Solving stochastic resource-constrained project scheduling problems by closed-loop approximate dynamic programming. *European Journal of Operational Research*, *246*(1), 20–33. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.015

Liu, D., Chen, J., & Peng, W. (2012). A new buffer setting method based on activity attributes in construction engineering. *Applied Mechanics and Materials*, *177*, 3274–3281. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.174-177.3274

Liu, F., Luh, P. B., & Moser, B. (1998). Scheduling and Coordination of Distributed Design Project. *Annals of CIRP*, *47*(1), 111-114 (0-4). https://doi.org/Doi: 10.1016/s0007-8506(07)62797-8

Liu, X., Yang, Y., Chen, J., Wang, Q., & Li, M. (2009). Achieving on-time delivery: A two-stage probabilistic scheduling strategy for software projects. *Trustworthy Software Development Processes*, *5543 LNCS*, 317–319. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01680-6_29

Mansoorzadeh, S., & Mohd Yusof, S. (2011). Reliable project scheduling with combination of risk management and critical chain schedule. In *IEEE Student Conference on Research and Development* (pp. 442–447). https://doi.org/10.1109/SCOReD.2011.6148780

Mansoorzadeh, S., Yusof, S. M., Mansoorzadeh, S., & Zeynal, H. (2014). A Comprehensive and Practical Framework for Reliable Scheduling in Project Management. *Advanced Materials Research*, *903*, 378–383. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.903.378

Mizuyama, H. (2006). A time quality tradeoff problem of a project with nonstandardized activities. In *36th International Conference on Computers and Industrial Engineering, ICC and IE* (pp. 3039–3049). https://doi.org/10.1057/jors.1988.132

Mogaadi, H., & Chaar, B. F. (2015). Scenario-based evolutionary approach for robust

RCPSP. In *Proceedings of the second international Afro-European conference for industrial advancement AECIA 2015* (pp. 45–55). https://doi.org/10.1007/978-3-319-29504-6

Mohammadi, M., Sayed, M., & Mohammad, M. (2014). Scheduling new product development projects using simulation-based dependency structure matrix. *International Journal of Logisctics Systems and Management*, *19*(3), 311–328. https://doi.org/https://doi.org/10.1504/IJLSM.2014.065499

Morillo, D., Moreno, L., & Díaz, J. (2014a). Metodologías analíticas y heurísticas para la solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPSP): una revisión. Parte 1. *Ingeniería y Ciencia - Ing.Cienc.*, *10*(20), 203–227.

Morillo, D., Moreno, L., & Díaz, J. (2014b). Metodologías analíticas y heurísticas para la solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPSP): una revisión. Parte 2. *Ingeniería y Ciencia - Ing.Cienc.*, *10*(20), 203–227.

Morrison, D. R., Jacobson, S. H., Sauppe, J. J., & Sewell, E. C. (2016). Branch-and-bound algorithms: A survey of recent advances in searching, branching, and pruning. *Discrete Optimization*, *19*, 79–102. https://doi.org/10.1016/j.disopt.2016.01.005

Muñoz Martos, M. del M., Cerdá, E., & Caballero, R. (1998). *Programación Estocástica: Algunas Aportaciones Teóricas y Computacionales*. Universidad Complutensse de madrid.

Narendra, P. M., & Fukunaga, K. (1977). A Branch and Bound Algorithm for Feature Subset Selection. *IEEE Transactions on Computers*, *C–26*(9), 917–922. https://doi.org/10.1109/TC.1977.1674939

Nasr, W., Yassine, A., & Abou Kasm, O. (2016). An analytical approach to estimate the expected duration and variance for iterative product development projects. *Research in Engineering Design*, *27*(1), 55–71. https://doi.org/10.1007/s00163-015-0205-0

Nelson, R. G., Azaron, A., & Aref, S. (2016). The use of a GERT based method to model concurrent product development processes. *European Journal of Operational Research*, *250*(2), 566–578. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.040

Ning, M., He, Z., Jia, T., & Wang, N. (2017). Metaheuristics for multi-mode cash fl ow balanced project scheduling with stochastic duration of activities. *Automation in Construction*, *81*(June), 224–233. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.06.011

Ökmen, Ö., & Özta, A. (2005). Judgmental risk analysis process development in construction projects. *Building and Environment*, *40*(9), 1244–1254. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.10.013

Ortiz-Pimiento, N. R., & Diaz-Serna, F. J. (2018). The project scheduling problem with non-deterministic activities duration: A literature review. *Journal of Industrial Engineering and Management*, *11*(1), 116–134. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3926/jiem.2492

Palpant, M., Artigues, C., & Michelon, P. (2004). LSSPER: Solving the Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Large Neighbourhood Search. *Annals of Operations Research*, *131*, 237–257. https://doi.org/https://doi.org/10.1023/B:ANOR.0000039521.26237.62

Park, Y. H., & Park, Y. H. (2010). A study of risk management and performance measures on new product development. *Asian Journal on Quality*, *11*(1), 39–48. https://doi.org/10.1108/15982681011051813

Pellerin, R., Perrier, N., & Berthaut, F. (2019). A survey of hybrid metaheuristics for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*.

Pet-Edwards, J. J., & Mollaghesemi, M. (1996). A simulation and genetic algorithm approach to stochastic research constrained project scheduling. In *Southcon/96 Conference Record* (pp. 333–338). https://doi.org/10.1109/SOUTHC.1996.535089

Rabbani, M., Baradaran, S., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Hashemin, S. S. (2008). Development of a Constructive Heuristics Rule for Constrained Resource Allocation in Stochastic Networks. *Journal of Applied Sciences*, *8*(21), 3917–3923.

Rabbani, M., Fatemi Ghomi, S. M. T., Jolai, F., & Lahiji, N. S. (2007). A new heuristic for resource-constrained project scheduling in stochastic networks using critical chain concept. *European Journal of Operational Research*, *176*(2), 794–808. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.09.018

Ramat, E., Lente, C., Slimane, M., Tacquard, C., & Venturini, G. (1996). Stochastic Project Scheduling Based on Time Lag. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (pp. 2916–2921).

Rezaie, K., Manouchehrabadi, B., & Shirkouhi, S. N. (2009). Duration estimation, a new approach in critical chain scheduling. In *Proceedings - 2009 3rd Asia International Conference on Modelling and Simulation, AMS 2009* (pp. 481–484). https://doi.org/10.1109/AMS.2009.67

Saihjpal, V., & Singh, S. B. (2014). New Placement Strategy for Buffers in Critical Chain. In *Proceedings of the Second International Conference on Soft Computing for Problem Solving (SocProS 2012), December 28-30, 2012* (pp. 429–436). https://doi.org/10.1007/978-81-322-1602-5

Schmidt, C. W., & Grossmann, I. E. (1996). A mixed integer programming model for stochastic scheduling in new product development. *Computers & Chemical Engineering*, *20*(96), S1239-SI244. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0098-1354(96)00214-1

Shi, Q., & Gong, T. (2009). An improved project buffer sizing approach to critical chain management under resources constraints and fuzzy uncertainty. In *International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence* (pp. 486–490). https://doi.org/10.1109/AICI.2009.192

Shou, Y., & Wang, W. (2012). Robust optimization-based genetic algorithm for project scheduling with stochastic activity durations. *International Journal on Information*, *15*(10), 4049–4064.

Song, W., Kang, D., Zhang, J., & Xi, H. (2018). Risk-aware proactive scheduling via conditional value-at-risk. In *32nd Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2018* (pp. 6278–6285).

Song, W., Xi, H., Kang, D., & Zhang, J. (2018). An agent-based simulation system for multi-project scheduling under uncertainty. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *86*(November 2017), 187–203. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.05.009

Subhy, E. S., Georgy, M. E., & Ibrahim, M. E. (2014). Incorporating Uncertainty into Project Schedule Crashing : An Algorithm. In *Proceedings of the 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2014* (pp. 404–409).

Subramanian, D., Pekny, J. F., & Reklaitis, G. V. (2001). A simulation-optimization framework for research and development pipeline management. *AIChE Journal*, *47*(10), 2226–2242. https://doi.org/10.1002/aic.690471010

Tabrizi, B. H., & Ghaderi, S. F. (2016). A robust bi-objective model for concurrent planning of project scheduling and material procurement. *Computers & Industrial Engineering*, *98*, 11–29. https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.05.017

Tereso, A. P., Araujo, M., & Elmaghraby, S. E. (2004). Adaptive resource allocation in

multimodal activity networks. *International Journal of Production Economics*, *92*(1), 1–10. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.09.005

Tukel, O. I., Rom, W. O., & Eksioglu, S. D. (2006). An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling. *European Journal of Operational Research*, *172*, 401–416. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.10.019

Tysiak, W. (2017). Monte Carlo simulation and critical chains. In *9th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2017* (Vol. 1, pp. 471–474). https://doi.org/10.1109/IDAACS.2017.8095125

Van De Vonder, S., Demeulemeester, E., Herroelen, W., & Leus, R. (2005). The use of buffers in project management : The trade-off between stability and makespan. *Int. J. Production Economics*, *97*, 227–240. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.08.004

Van De Vonder, S., Demeulemeester, E., Herroelen, W., & Leus, R. (2006). The trade-off between stability and makespan in resource-constrained project scheduling. *International Journal of Production Research*, *44*(2), 215–236. https://doi.org/10.1080/00207540500140914

Varakantham, P., Fu, N., & Lau, H. C. (2016). A Proactive Sampling Approach to Project Scheduling under Uncertainty. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* (pp. 3195–3201).

Vaziri, K., Carr, P. G., & Nozick, L. K. (2007). Project Planning for Construction under Uncertainty with Limited Resources. *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, *133*(April), 268–277.

Wale, K. (2015). Risk-Aware Project Scheduling for Projects with Varied Risk Levels. *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence Risk-Aware*, 1642–1649. https://doi.org/10.1109/SSCI.2015.231

Wang, J. (2002). A fuzzy project scheduling approach to minimize schedule risk for product development. *Fuzzy Sets and Systems*, *127*(2), 99–116. https://doi.org/10.1016/S0165-0114(01)00146-4

Wang, J. (2004). A fuzzy robust scheduling approach for product development projects. *European Journal of Operational Research*, *152*(1), 180–194. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00701-4

Wang, J. R. (1999). A fuzzy set approach to activity scheduling for product development. *Journal of the Operational Research Society*, *50*(12), 1217–1228.

https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600814

Ward, L. (2004). Managing portfolios of projects under uncertainty. *Annals of Operations Research*, *132*, 243–256.

Weaver, P. (2006). A brief history of scheduling: Back to the future. *MyPrimavera Conference*, (April), 24. https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2011.11.004

Wei-xin, W., Xu, W., Xian-long, G., & Lei, D. (2014). Multi-objective optimization model for multi-project scheduling on critical chain. *Advances in Engineering Software*, *68*, 33–39. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.11.004

Xiong, J., Chen, Y., Liu, J., & Abbass, H. A. (2011). An evolutionary multi-objective scenario-based approach for Stochastic Resource Investment Project Scheduling. In *IEEE Congress of Evolutionary Computation, CEC 2011* (pp. 2767–2774). https://doi.org/10.1109/CEC.2011.5949965

Xiong, J., Liu, J., Chen, Y., & Abbass, H. A. (2011). A Knowledge-Based Evolutionary Multiobjective Approach for Stochastic Extended Resource Investment Project Scheduling Problems. *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, *18*(5), 742–763. https://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2283916

Yaghoubi, S., Noori, S., & Azaron, A. (2015). The Markovian Multi-Criteria Multi-Project Resource-Constrained Project Scheduling Problem. In *Handbook on Project Management and Scheduling Vol. 2* (Vol. 2, pp. 837–862). https://doi.org/10.1007/978-3-319-05915-0

Yang, L., Fu, Y., Li, S., Huang, B., & Tao, P. (2008). A buffer sizing approach in critical chain scheduling with attributes dependent. In *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2008* (pp. 1–4). https://doi.org/10.1109/WiCom.2008.1805

Yi, C. S., Gao, J. B., & Guan, X. Bin. (2014). A Fuzzy Scheduling Methodology for Energy R&D Projects. *Applied Mechanics and Materials*, *521*, 806–809. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.521.806

Yu, J., Xu, Z., & Hu, C. (2013). Buffer Sizing Approach in Critical Chain Project Management under Multiresource Constraints. In *6th International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering* (pp. 71–75). https://doi.org/10.1109/ICIII.2013.6703669

Zafra-Cabeza, Ascension, Ridao, M. A., & Camacho, E. F. (2008). Using a risk-based approach to project scheduling: A case illustration from semiconductor manufacturing. *European Journal of Operational Research*, *190*(3), 708–723. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.021

Zafra-Cabeza, Ascensión, Ridao, M. A., & Camacho, E. F. (2007). A model predictive control approach for project risk management. In *Proceedings of the European Control Conference 2007* (pp. 3337–3343). https://doi.org/10.23919/ECC.2007.7068825

Zhang, J., Jia, S., & Díaz, E. (2015). A new buffer sizing approach based on the uncertainty of project activities. *Concurrent Engineering: Research and Applications*, *23*(1), 3–12. https://doi.org/10.1177/1063293X14561871

Zhang, J., Shi, R., & Díaz, E. (2015). Dynamic monitoring and control of software project effort based on an effort buffer. *Journal of the Operational Research Society*, *66*(9), 1555–1565. https://doi.org/10.1057/jors.2014.125

Zhang, J., Song, X., & Díaz, E. (2016). Project buffer sizing of a critical chain based on comprehensive resource tightness. *European Journal of Operational Research*, *248*(1), 174–182. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.009

Zhang, X., Cui, N., Bie, L., & Chai, Y. (2011). Timely project completion probability and stability cost on the interaction among uncertainty of random duration, service level and feeding buffer in a RCPSP environment. In *2011 International Conference on Management and Service Science* (pp. 2–5). https://doi.org/10.1109/ICMSS.2011.5998239

Zhang, Z., Liu, M., Zhou, X., & Chen, L. (2015). A multi-objective DCP model for bi-level resource-constrained project scheduling problems in grounding grid system project under hybrid uncertainty. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *20*, 1631–1641. https://doi.org/10.1007/s12205-015-0615-6

Zhang, Z., & Xu, J. (2015). Bi-level multiple mode resource-constrained project scheduling problems under hybrid uncertainty. *Journal of Industrial and Management Optimization*, *12*(2), 565–593. https://doi.org/10.3934/jimo.2016.12.565