

Información Importante

La Universidad de La Sabana informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea de la Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad de La Sabana.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan finalidad académica, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, La Universidad de La Sabana informa que los derechos sobre los documentos son propiedad de los autores y tienen sobre su obra, entre otros, los derechos morales a que hacen referencia los mencionados artículos.

BIBLIOTECA OCTAVIO ARIZMENDI POSADA
UNIVERSIDAD DE LA SABANA
Chía - Cundinamarca



El presente formulario debe ser diligenciado en su totalidad como constancia de entrega del documento para ingreso al Repositorio Digital (Dspace).

TITULO	Diseño de un método de solución, basado en un algoritmo memético, para el problema determinístico de programación de proyectos con recursos restringidos (RCPSP) asociado a la minimización del costo total de las actividades del proyecto.		
SUBTITULO			
AUTOR(ES) Apellidos, Nombres (Completo) del autor(es) del trabajo	Durán Cantor, Mercedes Consuelo		
PALABRAS CLAVE (Mínimo 3 y máximo 6)			
RESUMEN DEL CONTENIDO (Mínimo 80 máximo 120 palabras)	La programación de proyectos con recursos restringidos (RCPSP, por su nombre en inglés) es un problema clásico e importante en la gerencia de proyectos, y que ha recibido mucha atención por parte de los investigadores. Este trabajo de investigación considera el caso en el cual se desea minimizar el costo de las actividades. Esta variante del problema se encuentra principalmente en la gerencia de cadenas de suministro para proyectos de construcción. Sus características muestran que la función es no regular y que el problema es NP-completo. En este trabajo se presenta un algoritmo memético para resolver el problema. Experimentos computacionales son ejecutados empleando las famosas instancias de la librería PSPLIB. Los resultados obtenidos validan la efectividad y eficiencia del algoritmo propuesto.		

Autorizo (amos) a la Biblioteca Octavio Arizmendi Posada de la Universidad de La Sabana, para que con fines académicos, los usuarios puedan consultar el contenido de este documento en las plataformas virtuales de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

**DISEÑO DE UN MÉTODO DE SOLUCIÓN, BASADO EN UN ALGORITMO
MEMÉTICO, PARA EL PROBLEMA DETERMINÍSTICO DE
PROGRAMACIÓN DE PROYECTOS CON RECURSOS RESTRINGIDOS
(RCPS) ASOCIADO A LA MINIMIZACIÓN DEL COSTO TOTAL DE LAS
ACTIVIDADES DEL PROYECTO**

MERCEDES CONSUELO DURÁN CANTOR

**UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CHÍA, CUNDINAMARCA
2013**

**DISEÑO DE UN MÉTODO DE SOLUCIÓN, BASADO EN UN ALGORITMO
MEMÉTICO, PARA EL PROBLEMA DETERMINÍSTICO DE
PROGRAMACIÓN DE PROYECTOS CON RECURSOS RESTRINGIDOS
(RCPS) ASOCIADO A LA MINIMIZACIÓN DEL COSTO TOTAL DE LAS
ACTIVIDADES DEL PROYECTO**

**Trabajo de investigación para optar el título de
Magíster en Diseño y Gestión de Procesos**

MERCEDES CONSUELO DURÁN CANTOR

**Director: JAIRO RAFAEL MONTOYA TORRES, Ph.D.
Co-director: ELYN LIZETH SOLANO CHARRIS, M.Sc.
Co-director: EDGAR HERNÁN ALFONSO LIZARAZO, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CHÍA, CUNDINAMARCA
2013**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Chía, 9 de febrero de 2013

“A Dios y a mi Madre Santísima, por amarme, guiarme y brindarme la salud, fortaleza y sabiduría necesarias para llevar a feliz término mi trabajo de grado... Señor y Virgencita: gracias por estar presentes en mi vida, por conspirar con el universo y darme el regalo de esta Maestría, así como por iluminar el camino del conocimiento y la esperanza durante mis estudios.

A mis Padres, forjadores de mi vida y de mis logros, por sus oraciones, sus sabios consejos, por todo su amor, apoyo, comprensión, tolerancia y perseverancia... lo que soy se lo debo a ellos.

A la memoria de mi Madre, María Oliva, quien con su amor, sacrificio, entrega y paciencia me enseñó que la vida misma encierra dificultades que solamente son posibles de sobrellevar con la comprensión de quienes verdaderamente te aman y sirviendo a los que te necesitan... Madrecita: te amo con todo mi ser y te agradezco con toda mi alma por la constancia de un amor infinito, desinteresado y sincero... siempre estarás en mi corazón.

A mi Padre, Héctor, quien con su amor, dedicación y sabiduría me ha permitido cultivar los valores que fortalecen las ganas de vivir y de ser mejor cada día... Pa: gracias por estar siempre de manera incondicional para extenderme tú mano... mi amor y gratitud eternamente.

A mis hermanos, Carmen Sofía, Héctor Bernardo, Ángel y Liliana, quienes a pesar de las adversidades me muestran siempre lo hermosa que es la vida y la importancia de luchar por lo que se quiere con dedicación y esfuerzo... Hermanos: gracias por su lealtad, buen humor y apoyo absoluto y, además, por ser mis cómplices de anhelos y de divagaciones sobre la nostalgia de lo que algún día será... los llevo en el alma”.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis agradecimientos a las personas y entidades que colaboraron para que este trabajo de grado se realizara con éxito.

A mi director, Jairo Montoya Torres, Ph.D., a quien le profesó respeto y admiración por todo lo que aprendí y por su rigurosidad en la investigación, por su aporte a mi formación en este ámbito; por su confianza, orientación, apoyo y contribuciones académicas tanto de forma como de fondo para llevar a cabo este trabajo.

A mis codirectores, Elyn Solano Charris, M.Sc., y Edgar Alfonso Lizarazo, M.Sc., por su receptividad, apoyo y aporte académico, orientando y corrigiendo a través de sus experiencias, logrando así enriquecer cada vez más mi proceso de formación.

A Bernardo Steven Martínez, M.Sc., y Daniel Moya, estudiantes de la Universidad de Los Andes por su colaboración y consejos para un desarrollo satisfactorio del algoritmo de solución propuesto en mi trabajo de grado.

A los grupos de investigación de “Logística y Mercadeo” (actualmente Logística y Negocios Internacionales) de la Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas, así como de “Sistemas Logísticos” de la Facultad de Ingeniería, ambos pertenecientes a la Universidad de La Sabana, por proporcionar los recursos necesarios para efectuar este trabajo, los cuales fueron financiados por el Contrato CEA-24-2008 del Fondo de Investigación de dicha Institución.

Al Banco de la República por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

A todas y cada una de las personas que de alguna manera me colaboraron para lograr los objetivos de este trabajo de investigación, especialmente a Jorge Alberto Gil Peñaloza, Director General de Logística e Infraestructura del Banco de la República.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. CONCEPTOS RELEVANTES DE PROGRAMACIÓN DE PROYECTOS	16
1.1 TIPOS DE PROYECTOS	16
1.1.1 Deterministas.	16
1.1.2 Estocásticos.	16
1.2 ELEMENTOS DE LOS PROBLEMAS DE PROGRAMACIÓN DE PROYECTOS	16
1.2.1 Actividades.	17
1.2.2 Relaciones de precedencia.	17
1.2.3 Recursos.	18
1.2.4 Función Objetivo.	19
1.3 TIPOS DE PROBLEMAS	21
2. PROBLEMAS DE PROGRAMACIÓN DE PROYECTOS CON RECURSOS RESTRINGIDOS (RCPSP)	22
2.1.1 RCPSP con un solo modo.	26
2.1.2 RCPSP Multi-Modo.	34
2.1.3 RCPSP con funciones objetivo no regulares.	42
2.1.4 RCPSP Estocástico.	44
2.2 MÉTODOS DE SOLUCIÓN	44
2.2.1 Métodos exactos.	44
2.2.2 Métodos heurísticos.	45
2.2.3. Métodos meta-heurísticos.	47
3. PROBLEMA RCPSP DE MINIMIZACIÓN DEL COSTO TOTAL DE LAS ACTIVIDADES DEL PROYECTO	50
3.1 EL MODELO MATEMÁTICO Y SUS CARACTERÍSTICAS	50
3.1.1 Características del problema.	51
4. DISEÑO DEL ALGORITMO MEMÉTICO DE SOLUCIÓN	53
4.1 MARCO METODOLÓGICO	53
4.2 PROCEDIMIENTO DE PROGRAMACIÓN PROPUESTO	55
4.1.1 Cargue de datos.	57
4.1.2 Generación de la población inicial.	57
4.1.3 Representación de la solución.	58
4.1.4 Tareas comunes.	60
4.1.5 Nueva generación.	63
4.1.6 Operadores de recombinación genética o crossover.	65
4.1.7 Operador de mutación.	68
4.1.8 Búsqueda Local.	69
4.1.9 Obtención de resultados.	69

5. PRUEBAS COMPUTACIONALES	73
5.1 CONTEXTO DE LAS INSTANCIAS	73
5.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL ALGORITMO	75
5.2.1 Análisis para la probabilidad de cruce y mutación para las instancias evaluadas.	75
5.3 COMPARACIÓN CON EL ÓPTIMO	98
6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	100
6.1 CONCLUSIONES	100
6.2 LÍNEAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	101
BIBLIOGRAFÍA	102
BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	105
ANEXO 1. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS COMPUTACIONALES POR INSTANCIA	107
ANEXO 2. ARTÍCULO “MEMETIC ALGORITHM TO MINIMIZE COSTS OF ACTIVITIES IN RCPSP”	132

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del SM-RCPSP	27
Tabla 2. Clasificación del MM-RCPSP	35
Tabla 3. Reglas de prioridad para enfoque de un solo proyecto	46
Tabla 4. Factores y niveles para los experimentos.....	73
Tabla 5. Datos instancia J30100-100	75
Tabla 6. Análisis de la varianza instancia J30100-100	76
Tabla 7. Datos instancia J30150-100	77
Tabla 8. Análisis de la varianza instancia J30150-100	78
Tabla 9. Datos instancia J30200-50	79
Tabla 10. Análisis de la varianza instancia J30200-50	80
Tabla 11. Datos instancia J60100-100	81
Tabla 12. Análisis de la varianza instancia J60100-100	82
Tabla 13. Datos instancia J60150-100	83
Tabla 14. Análisis de la varianza instancia J60150-100	84
Tabla 15. Datos instancia J60200-50	85
Tabla 16. Análisis de la varianza instancia J60200-50	86
Tabla 17. Datos instancia J90100-100	87
Tabla 18. Análisis de la varianza instancia J90100-100	88
Tabla 19. Datos instancia J90150-100	89
Tabla 20. Análisis de la varianza instancia J90150-100	90
Tabla 21. Datos instancia J90200-50	91
Tabla 22. Análisis de la varianza instancia J90200-50	92
Tabla 23. Datos instancia J120100-100	93
Tabla 24. Análisis de la varianza instancia J120100-100	94
Tabla 25. Datos instancia J120150-100	95
Tabla 26. Análisis de la varianza instancia J120150-100	96
Tabla 27. Datos instancia J120200-50	97
Tabla 28. Análisis de la varianza instancia J120200-50	98
Tabla 29. Valores promedio del costo óptimo y del costo con el algoritmo <i>MAPS/Prec/Cost</i>	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo RCPSP.....	25
Figura 2. Solución óptima para el proyecto	25
Figura 3. Conversión de las relaciones de precedencia	31
Figura 4. Estructura de un algoritmo memético.....	49
Figura 5. Esquema metodológico	54
Figura 6. Estructura del algoritmo <i>MAPS/Prec/Cost</i>	56
Figura 7. Estructura de un agente (cromosoma)	59
Figura 8. Diagrama de flujo para el cálculo de la función objetivo.....	60
Figura 9. Diagrama de flujo para crear la población inicial.....	62
Figura 10. Diagrama de flujo del ciclo principal del algoritmo <i>MAPS/Prec/Cost</i>	64
Figura 11. Crossover de un punto	65
Figura 12. Crossover de dos puntos	66
Figura 13. Diagrama de flujo operadores de crossover	67
Figura 14. Operador de mutación	68
Figura 15. Diagrama de flujo operador de mutación	69
Figura 16. Diagrama de flujo Búsqueda Local	70
Figura 17. Diagrama de Gantt de las generaciones inicial y de la mejor.....	71
Figura 18. Informe de la mejor generación.....	72
Figura 19. Diagrama para el tiempo de ejecución	74

RESUMEN

La programación de proyectos con recursos restringidos (RCPSP, por su nombre en inglés) es un problema clásico e importante en la gerencia de proyectos, y que ha recibido mucha atención por parte de los investigadores. Este trabajo de investigación considera el caso en el cual se desea minimizar el costo de las actividades. Esta variante del problema se encuentra principalmente en la gerencia de cadenas de suministro para proyectos de construcción. Sus características muestran que la función es no regular y que el problema es NP-completo. En este trabajo se presenta un algoritmo memético para resolver el problema. Experimentos computacionales son ejecutados empleando las famosas instancias de la librería PSPLIB. Los resultados obtenidos validan la efectividad y eficiencia del algoritmo propuesto.

ABSTRACT

The resource-constrained project scheduling problem (RCPSP) is a classic and important problem in project management and has gotten much attention from researchers. In this research work, we consider the case in which the cost of activities has to be minimized. This variant of the problem can be found mainly in construction management supply chains. Its characteristics show that this objective function is non-regular and that the problem is NP-hard. This research work presents a memetic algorithm to solve this problem. Computational experiments are carried out using well-known instances from the PSPLIB. Results obtained validate the effectiveness of the proposed algorithm and allow us to understand the algorithm's behavior.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado hace parte del proyecto de investigación titulado “Análisis Relacional de los Problemas de Programación de Máquinas, Programación de Proyectos y Optimización Combinatoria en Ambiente Determinístico”, cofinanciado por el Fondo de Investigaciones de la Universidad de La Sabana bajo contrato número CEA-24-2008. Este proyecto es ejecutado por el Grupo de Logística y Negocios Internacionales (anteriormente Logística y Mercadeo) de la Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas en conjunto con el Grupo de Sistemas Logísticos de la Facultad de Ingeniería, ambos pertenecientes a la Universidad de La Sabana. Adicionalmente, este trabajo de investigación se articula con otros proyectos de grado realizados en el marco del proyecto de dicho investigación sobre programación de proyectos con recursos restringidos. A continuación se explicarán los conceptos fundamentales que definen el problema de investigación bajo estudio. Estos conceptos se ampliarán en los diferentes capítulos de este documento.

La programación de proyectos con recursos restringidos (en inglés, *Resource-Constrained Project Scheduling* -RCPS-) es uno de los problemas más estudiados en el contexto de la investigación de operaciones, así como en la gerencia de proyectos. El RCPS consiste en realizar un proyecto o conjunto de actividades sujetas a dos tipos de restricciones. Por una parte, las relaciones de precedencia obligan a que algunas actividades comiencen después de la finalización de otras. De otra parte, procesar cada actividad requiere consumir recursos, los cuales están disponibles en una cantidad fija y limitada en cada unidad de tiempo.

Dentro de los objetivos del RCPS clásico más estudiados está la minimización del tiempo de finalización del proyecto (*Cmax* o *Makespan*). Sin embargo, éste no es el único objetivo a considerar, ya que pueden interesar otros, como por ejemplo minimizar la tardanza de ciertas actividades que tienen establecidas fechas de entrega, maximizar la robustez del calendario, minimizar el costo total esperado, maximizar la calidad, entre otros.

En este trabajo se abordará el objetivo de la minimización del costo total esperado, el cual se pudo evidenciar que es muy poco estudiado. Cabe anotar, que el problema RCPS es un problema NP-duro (Blazewicz, 1983) y, en la actualidad, el límite de los algoritmos exactos se sitúa entre 30 y 60 actividades, lo que implica que son necesarios los algoritmos heurísticos para proporcionar soluciones de buena calidad para instancias grandes.

En Investigación de Operaciones, el término heurístico se aplica a un procedimiento para el que se tiene un alto grado de confianza en que encuentra soluciones de alta calidad con un costo computacional razonable, aunque no se garantice su optimalidad, e incluso, en algunos casos, no se llegue a establecer lo cerca que se está de dicha situación. Se usa el calificativo heurístico en contraposición a exacto, que se aplica a los procedimientos a los que se les exige que la solución aportada sea óptima.

Las metaheurísticas son estrategias inteligentes para diseñar o mejorar procedimientos heurísticos muy generales con un alto rendimiento (Brito et al, 2004). El término metaheurística apareció por primera vez en el artículo sobre Búsqueda Tabú de Fred Glover en 1986.

A partir de entonces han surgido multitud de propuestas de pautas para diseñar buenos procedimientos para resolver ciertos problemas que, al ampliar su campo de aplicación, han adoptado la denominación de metaheurísticas. Entre las mismas, se destacan los algoritmos evolutivos (AEs) (Araujo et al, 2009) por estar íntimamente relacionados con los algoritmos meméticos (AMs) que interesan para el desarrollo del presente trabajo, dado que no se han diseñado este tipo de algoritmos para el problema RCPSP relacionado con la minimización del costo de las actividades.

A pesar de que estas técnicas fueran consideradas en su momento por parte de la comunidad científica como un “reconocimiento de la derrota”, el tiempo ha demostrado su utilidad como punta de lanza tecnológica en la optimización de problemas reales (Cotta, 2007). Por supuesto, este éxito no es exclusivo de los AEs, sino que se extiende a otras técnicas relacionadas tales como el Recocido Simulado (en inglés, *Simulated Annealing*) (Kirkpatrick et al, 1983) y la Búsqueda Tabú (en inglés, *Tabu Search*) (Glover, 1989), entre otros. Parte de la justificación de los AMs se haya precisamente en el éxito de métodos de optimización tan diversos.

En 1989, Pablo Moscato presentó el término Algoritmo Memético para describir la combinación de algoritmos genéticos con métodos de optimización local. Se trata de algoritmos inspirados en los modelos de adaptación de los sistemas naturales que combinan la adaptación evolutiva de la población con el aprendizaje individual que tiene lugar durante su período de vida. El término “memético” se originó en la palabra “meme” que fue acuñada por Richard Dawkins (1976) en su libro “The Selfish Gene” para referirse a las “unidades de imitación” existentes en la transmisión cultural. Los memes se distinguen de los genes en que los segundos se transmiten intactos entre progenitor y descendiente, mientras que los primeros suelen sufrir adaptaciones de parte del individuo que los transmite, es decir, que se pasan alterados (Coello, 2001).

De otra parte, técnicas como PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) y CPM (*Critical Path Method*)¹ contemplan esencialmente asuntos asociados al tiempo. Dichas técnicas lo que buscan es minimizar la duración del proyecto, asumiendo que los recursos requeridos para la terminación del mismo están disponibles. No obstante, en la práctica para finalizar un proyecto se necesita del uso de varios recursos, cuya disponibilidad está limitada por los objetivos de la planeación, la estimación de tiempos, el costo de las actividades, la programación y el seguimiento.

Es por ello que, hoy en día, la maximización de la calidad (Icmeli y Rom, 1997 y 1998) y la minimización de los costos son objetivos de suma importancia en la programación de proyectos, debido a su presencia en las aplicaciones reales.

Los objetivos basados en los costos pueden ser de dos tipos: objetivos basados en los costos sobre las actividades y sobre los recursos. En los primeros, la manera en que se realizan las actividades resulta en costos directos que deben minimizarse, mientras que en los del segundo tipo, la secuenciación de las actividades influye indirectamente en el costo a través de los recursos (Ballestín, 2002).

¹ Método de la Ruta Crítica.

OBJETIVOS

Partiendo de todas las consideraciones anteriores, este trabajo de investigación pretende desarrollar un análisis de los elementos característicos del problema RCPSP, en términos de su clasificación, estructura, notación y representación, que permita diseñar un procedimiento metaheurístico basado en un algoritmo memético con el objetivo de minimizar el costo de las actividades.

Por consiguiente, los objetivos de este trabajo de investigación son:

Objetivo general

Determinar la configuración que, basada en un algoritmo memético, permita dar solución al problema de programación de proyectos con recursos restringidos para minimizar el costo de las actividades, a través de su desarrollo y validación experimental.

Objetivos específicos

- Identificar y analizar la estructura y características del problema de programación de proyectos con recursos restringidos para minimizar el costo de las actividades.
- Definir las potenciales combinaciones de elementos de Búsqueda Local y Algoritmo Genético para solucionar el problema RCPSP asociado a la minimización del costo de las actividades. Esto es, diseñar un algoritmo memético para resolver el problema de programación de proyectos definido.
- Determinar el impacto que tienen en la variación del costo, las combinaciones de elementos de Búsqueda Local y Algoritmo Genético seleccionadas.
- Diseñar y validar la efectividad del procedimiento heurístico de solución al problema objeto de estudio con base en las combinaciones de elementos de Búsqueda Local y Algoritmo Genético seleccionadas.

ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

Para efectos de presentación, este documento está organizado en siete partes, incluida esta introducción. En el primer capítulo se explican las características principales del problema de programación de proyectos. El capítulo dos presenta una descripción del problema RCPSP, al igual que una clasificación de los mismos, según la cantidad de modos de ejecución que tengan las actividades, la función objetivo y el componente de aleatoriedad. Adicionalmente, muestra una descripción de los métodos de solución empleados para resolver dicho problema, haciendo énfasis en los algoritmos meméticos.

En el capítulo tres se exponen las características del problema RCPSP asociado a la función objetivo de minimizar el costo total de las actividades del proyecto. Allí se brinda una explicación del modelo matemático y las características del problema citado.

A continuación, el capítulo cuatro contiene una descripción del algoritmo memético diseñado para solucionar el problema indicado en el párrafo anterior. En el capítulo cinco se presentan las pruebas computacionales y el análisis de los resultados obtenidos del algoritmo memético mencionado.

Para terminar, en el capítulo seis se recopilan los puntos fundamentales y se abordan los aspectos que podrían ser futuras líneas de investigación.

1. CONCEPTOS RELEVANTES DE PROGRAMACIÓN DE PROYECTOS

Se denomina proyecto a un conjunto de actividades relacionadas entre sí, que tienen puntos definidos de inicio y final, y cuyo resultado es un producto o servicio específico. Los problemas de programación de proyectos son muy comunes en cualquier tipo de industria u organización, ya que pueden ser aplicados en la programación de producción industrial, proyectos de construcción, prestación de servicios, actividades cotidianas y rutinarias, entre otras.

La programación de proyectos con recursos limitados es un ambiente en el cual se deben procesar un conjunto de actividades sujetas a restricciones de precedencias y recursos, siendo estos últimos compartidos por varias actividades. Así, el problema consiste en realizar tal asignación optimizando alguna función objetivo. A pesar de que la definición dada anteriormente es aparentemente tan sencilla y únicamente cualitativa, da origen a definiciones, formalizaciones y grandes discusiones de tipo matemático cuando se trata de resolver el problema general de programación de tareas.

1.1 TIPOS DE PROYECTOS

1.1.1 Deterministas. Cuando la información cuantitativa relacionada con un proyecto está determinada de forma exacta a priori (antes de realizar el proyecto) se define el proyecto como determinista. La información cuantitativa (datos) se refiere a características de los elementos constitutivos de un proyecto. Algunos ejemplos de dichas características son: duración de las actividades, requerimientos de recurso por actividad, disponibilidad de recurso por unidad de tiempo, costos asociados a los recursos o a las actividades.

1.1.2 Estocásticos. Trata problemas de programación matemática en los que algunos de los parámetros son variables aleatorias, bien estudiando las propiedades estadística del valor óptimo aleatorio o de otras variables aleatorias presentes en el problema o bien reformulando el problema en otro de decisión en el que se tiene en cuenta la distribución de probabilidad conjunta de los parámetros aleatorios (Prekopa, 1995). El caso más común y más abordado es cuando la duración de las actividades es incierta por lo cual se asume la misma como una variable aleatoria. Para estos proyectos la técnica más usada y estudiada es PERT, para la cual la distribución de probabilidad de cada actividad es especificada por tres estimaciones de la duración: la más probable, la optimista y la pesimista.

1.2 ELEMENTOS DE LOS PROBLEMAS DE PROGRAMACIÓN DE PROYECTOS

Las decisiones sobre programación de proyectos están sujetas a los elementos constitutivos de los mismos. En general, estos problemas están formados por un conjunto de actividades interrelacionadas, relaciones de precedencia, un conjunto de recursos disponibles y necesarios, y los objetivos administrativos (Slowinski et al., 1989).

Es pertinente aclarar que a lo largo de este documento se asume que todos los parámetros asociados con los elementos de un proyecto son determinísticos, están disponibles y son valores enteros.

1.2.1 Actividades. Los proyectos están conformados por actividades que deben ser ejecutadas para finalizar el proyecto de forma satisfactoria. Cada una de las actividades debe ser procesada según su duración y modo. Este último proporciona información detallada sobre la actividad como por ejemplo, si existe o no la posibilidad de interrupción de la durante su proceso de ejecución, la cantidad de recurso demandada, los posibles flujos de dinero en cada uno de los tiempos de ejecución, fechas de entrega y fechas de disponibilidad y demás información de relevancia que permita o no su secuenciación durante cada instante de la programación de las actividades (Ballestín, 2002).

El conjunto de todas las actividades a programar está definido por V , y cada una de las actividades que componen a V se denominan por j , de tal manera que $V = \{1, \dots, n\}$ con $j \in [1, n]$, y en donde 1 y n particularmente son las actividades ficticias de inicio y finalización.

1.2.2 Relaciones de precedencia. El enfoque del CPM desarrollado por Kelley y Walker (1959) introdujo el concepto básico de precedencia a la metodología de planeación y control de proyectos de gran escala. La precedencia refleja el orden parcial que existe entre las actividades de un proyecto debido a aspectos técnicos o lógicos.

En administración y gestión de proyectos, una ruta crítica es la secuencia de los elementos terminales de la red de proyectos con la mayor duración entre ellos, determinando el tiempo más corto en el que es posible completar el proyecto. La duración de la ruta crítica determina la duración del proyecto entero. Cualquier retraso en un elemento de la ruta crítica afecta a la fecha de término planeada del proyecto, y se dice que no hay holgura en la ruta crítica.

Un proyecto puede tener varias rutas críticas paralelas. Una ruta paralela adicional a través de la red con las duraciones totales menos cortas que la ruta crítica es llamada una sub-ruta crítica. Originalmente, el método de la ruta crítica consideró solamente dependencias entre los elementos terminales. Un concepto relacionado es la cadena crítica, la cual agrega dependencias de recursos. Cada recurso depende del manejador en el momento donde la ruta crítica se presente.

El método de la ruta crítica usa tiempos ciertos (reales o determinísticos). La elaboración de un proyecto basado en redes CPM consiste en: identificar todas las actividades que involucra el proyecto, lo que significa, determinar relaciones de precedencia, tiempos técnicos para cada una de las actividades; construir una red con base en nodos y actividades (o arcos, según el método más usado), que implican el proyecto; y analizar los cálculos específicos, identificando la ruta crítica y las holguras de las actividades que componen el proyecto.

Actualmente, se han incluido otros tipos de relaciones de precedencia entre las actividades. Los cuatro posibles tipos de relación que restringen los tiempos de inicio o fin de dos actividades son (Elmaghraby y Kamburowski, 1992):

1. *SS (Start-to-Start)*, inicio a inicio, esta relación expresa que las dos actividades deben comenzar simultáneamente.
2. *FF (Finish-to-Finish)*, fin a fin, las dos actividades deben ser terminadas al mismo tiempo.
3. *SF (Start-to-Finish)*, inicio a fin, el inicio de la actividad *i* restringe el final de la actividad *j*. Una actividad no puede ser terminada hasta que se comience la otra.
4. *FS (Finish-to-Start)*, fin a inicio, el final de la actividad *i* restringe el inicio de la actividad *j*. Una actividad no puede comenzar hasta que esté finalizada la otra.

Tal como se mencionó previamente, las relaciones de precedencia entre actividades se pueden visualizar representando el proyecto por medio de un grafo orientado (dirigido). En general, dos métodos han sido comúnmente usados para representar los proyectos en redes de actividad: el método AOA (*Activity-On-Arc*) y el método AON (*Activity-On-Node*), resultando representaciones basadas en eventos o en actividades, respectivamente (Kolisich y Padman, 2001). En la representación AOA la actividad es simbolizada por los arcos (aristas) y los eventos por los nodos; esta representación ofrece ventajas de visualización cuando es importante mostrar momentos de terminación de conjuntos de actividades (fases, etapas o partes de un proyecto). Un número reducido de tipos de problemas pueden ser modelados y analizados a través de esta representación entre estos CPM, algoritmos EST (*Early Start Time*) y LST (*Late Start Time*) (Elmaghraby, 1995). En la mayoría de los casos en estos diagramas es necesario incluir nodos y arcos ficticios para representar relaciones de precedencia, por lo cual no se obtiene unicidad en la representación (Ballestín, 2002).

1.2.3 Recursos. Cuando una actividad está siendo ejecutada genera un consumo de recurso. Este consumo ocasiona que el recurso como tal ya no pueda procesar en ese mismo instante de tiempo la cantidad de trabajo total, sino una capacidad igual a la restante de su original menos la capacidad de las actividades que están siendo ejecutadas en ese instante de tiempo.

Los recursos pueden ser de los siguientes tipos:

- **Renovables:** Son recursos que pueden ser utilizados durante todo el horizonte del proyecto y su restricción se basa en la disponibilidad de estos recursos en un instante de tiempo determinado. Ejemplo de este tipo de recursos son las horas-hombre disponibles, el uso de maquinaria, herramientas, entre otros.
- **No renovables:** Su disponibilidad es limitada sobre la duración total del proyecto, sin restricciones sobre cada periodo. Una vez consumidos, no hay posibilidad de recuperar la capacidad utilizada. Un ejemplo es el presupuesto para la realización de un proyecto.
- **Doblemente restringidos:** Estos recursos están limitados tanto en el horizonte de planeación como sobre cada periodo de tiempo. Talbot (1982) demostró que cada recurso de este tipo puede ser descompuesto en uno renovable y en uno no

renovable.

- **Parcialmente renovables:** Introducidos por Bottcher et al. (1996) definen que un recurso puede estar disponible según el periodo en el que se encuentre. Los autores demostraron que no importa qué tipo de recurso sea, renovable, no renovable o doblemente restringido, puede ser representado como un recurso parcialmente renovable.

Para un problema de RCPSP se cuenta con K tipos de recursos renovables de tal forma que $K=\{1,\dots,k\}$, y cada tipo de recurso k cuenta con una cantidad disponible de trabajo R_k . Así mismo, cada actividad j cuando está siendo ejecutada requiere de una cantidad $r_{j,k}$ de unidades del recurso k durante su duración d_j .

Sin pérdida de generalidad, los parámetros d_j , $r_{j,k}$ y R_k se suponen siempre enteros y conocidos al instante inicial de la programación.

1.2.4 Función Objetivo. El objetivo para cualquier problema de RCPSP es el de encontrar tiempos de inicio o de finalización para todas las actividades que conforman el proyecto respetando las relaciones de precedencia y las restricciones en la utilización de los recursos de tal forma que una función objetivo sea maximizada o minimizada.

La función objetivo en cualquier problema de programación es en sí una medición cuantitativa de la calidad de la solución, y es con la cual el método de solución que fue escogido puede ser comparado con respecto a otros métodos de solución previamente aplicados al mismo problema.

Probablemente, la minimización de la duración del proyecto (definida en inglés como makespan) es el objetivo más investigado y ampliamente aplicado en la teoría de la secuenciación de proyectos. La duración del proyecto se define como el tiempo transcurrido entre el comienzo y el final del proyecto; debido a que usualmente se asume que el inicio del proyecto es en el tiempo cero ($t = 0$), minimizar la duración del proyecto se simplifica en minimizar el máximo de todos los tiempos de finalización de las actividades (Kolisch y Padman, 2001).

Las funciones objetivo como medidas de desempeño se clasifican en regulares y no regulares. Una función objetiva se considera *regular* si el valor de la función para un calendario dado no desmejora al reducir el tiempo de terminación de una actividad sin cambiar (aumentar) el tiempo de terminación de cualquier otra actividad. Una función de evaluación se considera *no regular*, si no cumple con la anterior característica (Sprecher et al., 1995; Yang et al., 2001).

Las medidas regulares de desempeño más comúnmente consideradas en los problemas de programación de proyectos son la minimización de la duración del proyecto y la minimización del tiempo promedio de flujo o lapso (Sprecher et al., 1995). Otras medidas regulares de desempeño son la minimización de los tiempos de flujo (ponderados) de las actividades, o en el caso de existir fechas de entrega, la minimización de los retrasos (ponderados) (Slowinski, 1989, Sprecher y Drexel, 1998). En el caso de considerar solo flujos monetarios positivos, la maximización del valor

presente neto es también considerada como medida regular de desempeño (Herroelen et al., 1998).

Dentro del conjunto de medidas de desempeño no regulares que se han estudiado se encuentra la maximización del valor presente neto. La cual resulta ser una medida más apropiada cuando se consideran flujos monetarios negativos y positivos, representando gastos al comenzar actividades y pagos progresivos por la terminación de partes del proyecto, respectivamente (Bey et al., 1981; Özdamar y Gündüz, 1995; Kolisch y Padman, 2001). El objetivo de maximizar el Valor Presente Neto (VPN) es considerado por primera vez en el trabajo pionero de Russell (1970), donde modela las relaciones de precedencia a través de una formulación no lineal que ignora las restricciones de recursos, y la cual aproxima a un programa lineal. Muchas de las investigaciones en el problema de VPN en proyectos se han concentrado en diseñar enfoques de solución para el caso con restricciones de recursos, el cual consiste en maximizar el VPN del proyecto sujeto a restricciones de precedencia y a restricciones de recursos renovables. Otras extensiones del problema de VPN incluyen consideraciones de restricciones de material y capital, intercambios tiempo/costo y aspectos operacionales multi-modo.

Otra función de evaluación no regular es la maximización de la calidad, introducida de forma explícita por Icmeli y Rom (1997), como resultado de un estudio empírico que realizaron en Estados Unidos sobre las características de los proyectos en diversas industrias. Esta investigación muestra que maximizar la calidad es uno de los más importantes objetivos de los administradores de proyectos, por lo cual en su trabajo presentan un programa lineal entero mixto para secuenciar proyectos con este objetivo.

La minimización del costo también es una medida de desempeño no regular, la cual ha despertado bastante interés en la comunidad académica debido a su importancia práctica. Según Kolisch y Padman (2001), los objetivos basados en los costos se pueden dividir en objetivos basados en los costos de las actividades y en los costos de los recursos.

En los objetivos de minimización de los costos sobre las actividades, la forma como son ejecutadas las actividades (tiempo de inicio o el modo de ejecución) resultan en costos *directos*, los cuales se busca minimizar. Ejemplos representativos de este tipo son el problema tradicional de intercambio (compensación) tiempo/costo continuo (Kelley y Walker, 1959; Fulkerson, 1961, Moder y Phillips, 1964; Siemmens, 1971; Goyal, 1975; Johnson y Montgomery, 1974; Elmaghraby, 1977; Talbot, 1982; Kalenatic, 1987) y la extensión discreta de la relación tiempo/costo sobre el mismo problema cuya complejidad es mayor que en el caso continuo (De P, Dunne et al., 1995, De Reyck et al., 1998, Skutella, 1998). Otros trabajos recientes han combinado el problema multi-modo con recursos limitados y el de intercambio tiempo/costo para crear una extensión del problema multi-modo de calendarización de proyectos con modos acelerables, donde la duración dada por la ejecución de una actividad en un determinado modo puede ser reducida a cambio de un costo (Ahn y Ergenuec, 1995).

En los problemas con objetivos basados en costos sobre las actividades, la programación de las actividades interviene indirectamente en los costos por medio de

los recursos. Dentro de este grupo se encuentra el problema clásico de la nivelación de recursos, donde se minimiza la desviación entre los requerimientos de recursos y los niveles indicados (Bandelloni et al., 1994, Brinkmann y Neumann, 1996). Otro problema de calendarización de proyectos con esta clase de objetivos es el problema de inversión en recursos, donde se busca minimizar los costos asociados con el nivel constante de capacidad de recurso disponible para el proyecto (Mason y Moodie, 1971, Möhring, 1984, Demeulemeester, 1995).

1.3 TIPOS DE PROBLEMAS

Generalmente en la programación de proyectos se puede considerar que la estructura de los mismos está dada por una relación H transitiva y asimétrica de precedencia sobre el conjunto N de actividades que constituyen el proyecto. Cada actividad $j \in N$ tiene una duración fija y durante su desarrollo consume ciertos recursos, el consumo se asume constante para toda la duración de la actividad.

Dos actividades cualesquiera se pueden realizar al mismo tiempo si no existe ninguna relación de precedencia entre éstas y requieren una cantidad de recurso equivalente a la suma de consumos individuales de recurso si se realizan juntas. Por lo tanto, los recursos limitados pueden imponer relaciones de precedencia adicionales entre actividades que consumen el mismo recurso, de tal modo que posiblemente se incremente la duración del proyecto. Por otro lado, realizar actividades simultáneamente para ahorrarse tiempo dará lugar generalmente a costos más altos para el recurso consumido.

Estas consideraciones conllevan a los siguientes dos problemas de optimización en la programación de proyectos (Möhring, 1984):

- *El problema de recursos escasos*: dados unos límites constantes para la cantidad disponible de cada recurso, se busca encontrar cuál es la duración posible más corta del proyecto.
- *El problema del tiempo escaso*: dado un tiempo límite para la duración del proyecto (fecha de entrega específica), se busca determinar el menor costo para los recursos requeridos, si se asume que los recursos están disponibles en cantidades ilimitadas a un costo dado por unidad de recurso.

El primer problema es conocido como problema de programación de proyectos con recursos restringidos y ha sido ampliamente estudiado por la comunidad académica. El segundo problema es denominado por Demeulemeester (1995) como problema del costo de la disponibilidad del recurso, para otros autores como Kolisch y Padman (2001) es llamado problema de inversión en recursos (*Resource investment problem*).

2. PROBLEMAS DE PROGRAMACIÓN DE PROYECTOS CON RECURSOS RESTRINGIDOS (RCPSP)

El RCPSP es un problema de gran interés para la comunidad científica debido a su pertenencia a la clase de problemas NP-duro, lo cual quiere decir que no se ha encontrado un algoritmo eficiente para resolverlo de forma óptima en tiempo polinomial (Blazewicz et al., 1983).

El RCPSP es uno de los problemas básicos y clave en los problemas de programación de proyectos debido a su implicación práctica y por la gran cantidad de trabajos que se han desarrollado en torno a éste.

El RCPSP consiste en realizar un conjunto de actividades sujetas a dos tipos de restricciones. Por una parte las relaciones de precedencia fuerzan a algunas de estas actividades a comenzar después de la finalización de otras. Por otra parte, procesar cada actividad requiere consumir recursos, los cuales están disponibles en una cantidad fija y limitada en cada unidad de tiempo. El objetivo del RCPSP se fundamenta en encontrar tiempos de inicio para las actividades de manera que se minimice la diferencia entre la finalización de la actividad a secuenciarse más temprano.

Se tiene un conjunto X de n actividades y m recursos, donde cada recurso k ($k = 1, \dots, m$) tiene una disponibilidad b_k en cada unidad de tiempo. Cada actividad j ($j = 1, \dots, n$) tiene una duración d_j , y su ejecución requiere una cantidad constante r_{jk} del recurso k en cada unidad de tiempo. Todas las cantidades d_j , r_{jk} y b_k son números enteros no negativos. Cada actividad j está asociada a un conjunto de predecesores inmediatos: actividades que deben ser completadas antes de comenzar la ejecución de la actividad i . Las actividades están topológicamente ordenadas, es decir, cada predecesora de la actividad j tiene un número de actividad más pequeño que j (Mingozi et al., 1994).

El objetivo del RCPSP es asignar tiempos de inicio a cada una de las actividades de manera que se satisfagan todas las restricciones, de precedencias y recursos del sistema, y se minimice la duración total del proyecto o *makespan*.

El problema de programación de proyectos con recursos limitados (RCPSP) puede ser descrito matemáticamente de la siguiente manera (basado en la definición de Mingozi et al., 1994):

$$\text{Min } Z_p = \sum_{t=es_n}^{ls_n} t * \xi_m \quad (1)$$

s.a.

$$\text{Min } Z_p = \sum_{t=es_i}^{ls_i} \xi_{it} = 1 \quad (2)$$

$i \in X$

$$\sum_{t=es_j}^{ls_j} t^* \xi_{jt} - \sum t^* \xi_{it} \geq d_i \quad (3)$$

$$(i, j) \in H$$

$$\sum_{i \in X} r_{ik} \sum_{t=\sigma(t,j)} \xi_{it} \leq b_k \quad (4)$$

$$t = 0, \dots, T_{\max}; \quad k = 1, \dots, m$$

$$\xi_{it} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

$$i \in X, t = es_i, \dots, ls_i$$

donde:

ls_i = late start de la actividad i (tiempo de inicio más tardío).

es_i = early start de la actividad i (tiempo de inicio más temprano).

ξ_{it} = variable binaria, toma el valor 1 si y sólo si la actividad i empieza al principio del período t y 0 en caso contrario.

X = conjunto de actividades.

H = conjunto (i, j) de precedencias, donde (i, j) significa que i es predecesor de j .

r_{ik} = cantidad que la actividad i consume del recurso k durante su ejecución.

$\sigma(t, i) = \max(0, t - di + 1)$.

b_k = disponibilidad del recurso k (constante durante la duración del proyecto).

En este planteamiento siempre se consideran dos actividades artificiales (*dummy jobs*) que son la primera y la última (1 y n), con duración cero y con consumo cero de todos los recursos. El fin de estas actividades es representar el punto de inicio y el punto de terminación respectivamente, del proyecto.

La ecuación (1) es la función objetivo: *makespan* o duración total del proyecto.

Las ecuaciones (2) representan las restricciones de no interrupción (*non-preemption*), es decir, las que obligan a que una actividad debe continuarse hasta su terminación una vez iniciada.

Las ecuaciones (3) representan las restricciones de precedencia: una actividad solo puede iniciar una vez terminadas todas las predecesoras.

Las ecuaciones (4) representan las restricciones de recursos: en cualquier tiempo la cantidad de recursos utilizados por todas las actividades en ejecución no debe superar la disponibilidad de cada recurso correspondiente.

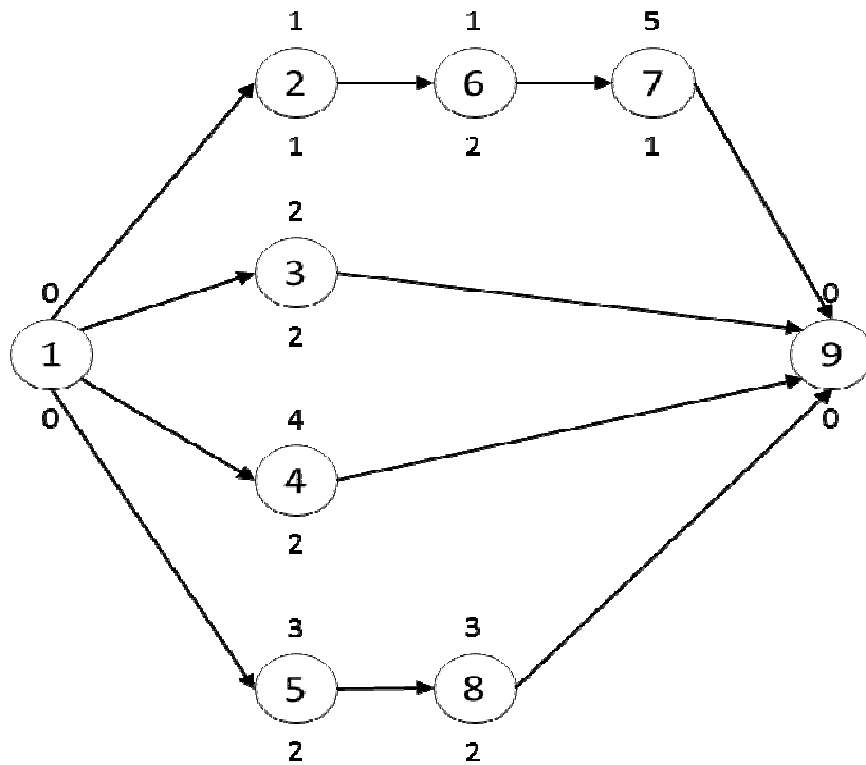
Aunque es fácil la solución del problema mediante cualquier programa de programación entera tal como XPRESS, Lingo o Lindo y también lo es la generación automática de todas las restricciones y la función objetivo en términos de las precedencias, los consumos de los recursos y sus disponibilidades, es notorio el deterioro del tiempo de ejecución cuando se incrementa el número de actividades. Cabe recordar que la dificultad del problema está más asociada con el número de actividades que con el

número de recursos, pues son las actividades las que dan origen a la explosión combinatoria del problema.

El planteamiento de programación entera entonces es útil para entender en qué consiste el problema y obtener conclusiones teóricas. Sin embargo, existe una característica adicional del planteamiento de programación entera, y es el hecho de que permite la obtención de cotas inferiores, mediante la técnica de relajación (ignorar algunas restricciones).

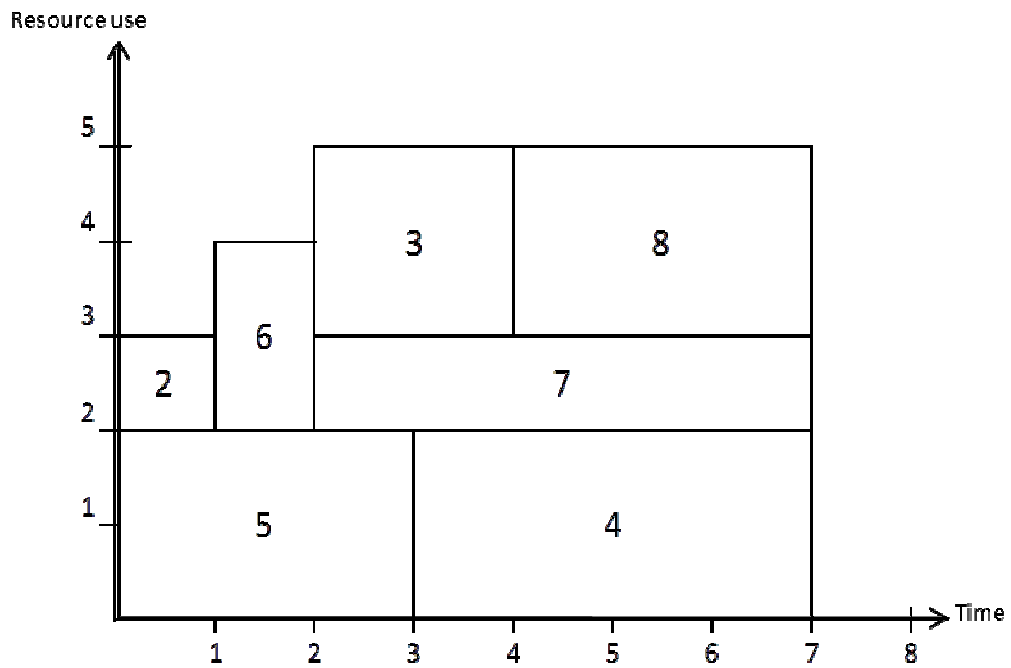
Un problema de ejemplo es presentado en la Figura 1. Los números arriba de cada nodo de la red del proyecto denotan las duraciones fijas de las actividades. Los números debajo de cada nodo denotan el requerimiento de recursos por nodo para el único tipo de recurso involucrado en la finalización de este proyecto. El único recurso requerido tiene una disponibilidad constante de 5 unidades por periodo. La única solución óptima para este proyecto es representado en la Figura 2 y tiene una duración de siete periodos. La mínima distancia de recursos restringidos para el proyecto es igual a la longitud de la ruta crítica. Esto es una simple coincidencia. Más frecuentemente, la adición de restricciones de recursos llevará a un incremento de la duración del proyecto por encima de la longitud de la ruta crítica.

Figura 1. Ejemplo RCPSP



Fuente: Herroelen et al. (1997).

Figura 2. Solución óptima para el proyecto



Fuente: Herroelen et al. (1997).

2.1 TIPOS DE PROBLEMAS RCPSP

Tal como se describió previamente, el problema de programación de proyectos con recursos restringidos corresponde a la asignación de actividades a un recurso o a un conjunto de recursos con capacidad limitada con el fin de alcanzar un objetivo predefinido. Existe gran cantidad de variedades del RCPSP, los problemas de un solo modo implican que cada actividad tiene una sola forma de ejecución (modo) y tanto la duración como los requerimientos de recursos se asumen fijos. En los problemas multi-modo cada actividad debe ser ejecutada de uno de los muchos modos posibles; cada modo implica una opción diferente en términos de duración y requerimiento de recursos.

Özdamar y Ulusoy (1995) proponen una categorización de los trabajos en RCPSP con base en seis características de los problemas:

- Número de proyectos: un proyecto o múltiples proyectos.
- Función tiempo-recurso:
 - Discreta: un solo modo (SM), múltiples modos (MM), un solo modo con requerimientos de recurso variables durante el tiempo (SM*), y modo agregado representando una parte del proyecto o el proyecto entero (AM).
 - Continua: modo infinito (IM).
- Método de solución: enfoque de optimización o enfoque heurístico.
- Objetivos.
- Especificaciones de las restricciones: solo restricciones de precedencia; restricciones de precedencia y recursos renovables; restricciones de precedencia, de recursos renovables y no renovables; o restricciones de precedencia, de recursos renovables, de no renovables, y doblemente restringidos.
- Tipo de secuenciación: con interrupciones o sin interrupciones.

Para efectos de este trabajo de investigación, se consideró la clasificación propuesta por Yang et al. (2001), quienes dividen el RCPSP en los siguientes cuatro tipos:

- RCPSP con un solo modo.
- RCPSP con múltiples modos.
- Problemas RCPSP con funciones objetivo no regulares.
- RCPSP estocástico.

2.1.1 RCPSP con un solo modo. Esta clase de problema es conocido como SM-RCPSP (por sus siglas en inglés *Single Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem*), la característica principal es que las actividades del proyecto solo tienen un único modo ejecución; tanto la duración de la actividad como los requerimientos de recursos se asumen que son fijos, y hay disponible solo un modo para cada actividad. Como se indicó en el apartado anterior, se asume que el proyecto es representado por una red de actividades. Se consideran dos tipos de condiciones de precedencia: el caso en que la actividad j puede comenzar en cualquier instante de tiempo siguiente a la finalización de la actividad i ; y el caso en que la actividad j debe comenzar dentro de un intervalo de tiempo (*time window*) siguiente a la finalización de la actividad i . Los recursos son caracterizados de acuerdo con su disponibilidad para ejecutar las actividades en cada uno de los intervalos de tiempo. La disponibilidad de un recurso

dado puede ser la misma para todos los períodos o puede variar período a período. Adicionalmente, si a una actividad es asignado un recurso durante múltiples períodos puede requerir la misma cantidad de recurso en todos los períodos o puede permitirse que el consumo de recurso varíe en los diferentes períodos. Finalmente, se pueden considerar los casos en que se requiere que una vez comenzada una actividad debe continuar su ejecución hasta completarse; o los casos en los cuales se puede parar una actividad en la mitad de su ejecución y reanudar su ejecución más tarde, permitir esta interrupción se conoce como *preemption*.

Dada las anteriores consideraciones, el SM-RCPSP puede ser dividido en cuatro subclases (Herroelen et al., 1998; Yang et al., 2001). En la Tabla 1 se resume una adaptación de la clasificación propuesta por Yang et al. (2001), donde se presentan cinco subclases con sus elementos característicos.

Tabla 1. Clasificación del SM-RCPSP

	SM-RCPSP Básico	SM-RCPSP con Preemption	SM-RCPSP Generalizado	SM-RCPSP con Precedencia General	SM-RCPSP General
Objetivo	Min Duración	Min Duración	Min Duración	Min Duración	Regular
Relaciones de Precedencia	P*	P	GPR modificado	GPR*	GPR
Disponibilidad de Recurso por período	Constante	Constante	Constante o Variando en el tiempo	Constante o Variando en el tiempo	Constante o Variando en el tiempo
Requerimientos de Recurso por período	Constante	Constante	Constante	Constante o Variando en el tiempo	Constante o Variando en el tiempo
Interrupción (Preemption)	No	Si	No	No	No
Restricciones temporales	No	No	Si	Si	Si

P*: Relaciones de precedencia estrictas (fin-inicio).

GPR*: Relaciones de precedencia generalizadas.

Fuente: Adaptado de Yang et al. (2001).

SM-RCPSP Básico (clásico)

Continuando con la notación introducida en el capítulo 2 y dadas las características presentadas en la Tabla 1; el SM-RCPSP básico se puede formular conceptualmente de la siguiente forma (Kolisch y Hartmann, 1999; Demeulemeester y Herroelen, 1992; Christofides et al., 1987):

$$\text{Min } f_{n+1} \quad (6)$$

s.a.

$$f_h \leq f_j - d_j \quad j = 1, \dots, n+1; h \in \mathcal{P}_j, \quad (7)$$

$$f_0 = 0 \quad (8)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{A}(t)} r_{jk} \leq R_k \quad k \in \mathcal{K}; t = 1, 2, \dots, f_{n+1}, \quad (9)$$

$$f_j \geq 0 \text{ y enteras} \quad j = 1, \dots, n+1 \quad (10)$$

Donde los parámetros del modelo son:

n : Número de actividades en el proyecto;

K : Conjunto de los tipos de recursos renovables disponibles $K = \{1, 2, \dots, K\}$;

d_j : Duración de la actividad j ;

P_j : Conjunto de actividades predecesoras inmediatas o directas de la actividad;

r_{jk} : Cantidad de recurso tipo k requerido por la actividad j ;

R_k : Disponibilidad total del recurso tipo k en cada unidad de tiempo;

Y donde las variables de decisión del problema son:

f_j : Tiempo de finalización de la actividad $j, j = 1, 2, \dots, n+1$;

$A(t) = \{j \in N \mid f_j - d_j < t \leq f_j\}$, es el conjunto de actividades que se están realizando (actividades activas) en el instante de tiempo t , cuya equivalencia es el intervalo de tiempo $]t - 1, t]$

Como la escala temporal es entera, el periodo t se representa como un intervalo de tiempo de la forma $]t - 1, t]$. Además como las variables de decisión (f_j o s_j) son instantes t , una actividad j se encuentra activa únicamente d_j intervalos de tiempo.

La convención sobre el tiempo utilizada en este modelo es que si la actividad j comenzó en el periodo $f_j - d_j + 1$, esta finaliza en el instante de tiempo f_j . Si la convención utilizada fuera que si la actividad j comenzó en el instante s_j , finaliza en el instante $s_j + d_j - 1$; el conjunto $A(t)$ se define como $\{j \mid s_j \leq t < f_j\}$ o $\{j \mid f_j - d_j \leq t < f_j\}$ y el índice t tomaría valores mayores o iguales a 0.

La función objetivo (6), minimiza el tiempo de finalización de la actividad $n+1$ (actividad ficticia que denota el final del proyecto), por ende, la duración total del proyecto (*makespan*). El conjunto de restricciones (7) representan las relaciones de precedencia fin-inicio de las actividades, indicando que la actividad j solo puede comenzar si todas las actividades predecesoras i fueron completadas. En el modelo se contempla que una vez comenzadas, las actividades son desarrolladas hasta su terminación (no se permite la interrupción de la actividad para realizar otra actividad). La restricción (8) asegura que el proyecto debe comenzarse en el instante 0, ya que la actividad 0 representa el inicio del proyecto. Las restricciones de recurso (9) indican que para cada periodo de tiempo $]t - 1, t]$ y para cada recurso tipo k , la cantidad de recurso requerida por las actividades en progreso no puede exceder la disponibilidad del recurso. Las restricciones (10) definen las variables de decisión como enteras no negativas.

El modelo presentado por las ecuaciones (6)-(10) es un modelo conceptual debido a que los conjuntos $A(t)$ de actividades en desarrollo en el periodo $]t - 1, t]$ son función de las variables de decisión. Por lo cual, si se desea resolver el RCPSP por medio de algún método de programación matemática debe ser formulado otro modelo el cual pueda ser resuelto.

Es de mencionar que el problema que se aborda en el presente trabajo de investigación corresponde al RCPSP clásico. Enseguida, se presenta el estado del arte de otros tipos de problemas RCPSP considerando elementos esenciales de los mismos.

SM-RCPSP con Interrupción

En este problema se permite que una actividad sea interrumpida en su ejecución para asignar el recurso a otra actividad y al finalizar la ejecución de la otra actividad el recurso nuevamente es asignado a la actividad original. La interrupción es en puntos enteros en el tiempo, la duración entera fija d_j de la actividad j puede ser fraccionada en unidades de proceso $i = 1, 2, \dots, d_j$, es decir en procesos de duración 1. Solo existen relaciones de precedencia FS como restricciones lógicas junto con las restricciones de disponibilidad de los recursos por período. Se define $f_{i,j}$ como el tiempo entero de finalización de la unidad de proceso i de la actividad j , y $f_{0,j}$ es el tiempo más temprano que la actividad j puede comenzar, donde $f_{0,j}$ es igual al tiempo de finalización más tardío de todas las actividades predecesoras de la actividad j . $A(t)$ denota el conjunto de actividades en progreso en el intervalo $]t - 1, t]$, la actividad j está en progreso si una de sus unidades de proceso $i = 1, 2, \dots, d_j$ está en progreso en el tiempo t . El conjunto P_j contiene todas las actividades que son predecesoras inmediatas de la actividad j , las cuales tienen relaciones de precedencia del tipo FS como se explicó anteriormente. El problema de minimizar la duración del proyecto cuando existe interrupción de las actividades puede formularse conceptualmente de la siguiente forma:

$$\text{Min } f_{0,n+1} \quad (11)$$

s.a.

$$f_{00} = 0 \quad (12)$$

$$f_{0,j} \geq f_{h,d_j} + 1 \quad j = 1, \dots, n+1; h \in P_j, \quad (13)$$

$$f_{i-1,j} + 1 \leq f_{ij} \quad i = 1, \dots, d_j; j = 1, \dots, n+1 \quad (14)$$

$$\sum_{j \in A(t)} r_{jk} \leq R_k \quad k \in K; t = 1, 2, \dots, f_{n+1}, \quad (15)$$

$$f_{i,j} \geq 0 \text{ y enteras} \quad i = 1, \dots, d_j; j = 1, \dots, n+1 \quad (16)$$

La función objetivo (11), minimiza el tiempo de inicio más temprano de la actividad $n+1$, como está actividad representa el final del proyecto se está minimizando la duración total del proyecto. La restricción (12) asegura que el inicio del proyecto (actividad 0) sea en el instante $t = 0$. El conjunto de restricciones (13) representan las relaciones de precedencia FS entre las actividades h y j , ya que el tiempo de inicio más temprano de la actividad j debe ser mayor o igual al siguiente período después del tiempo de finalización de la última unidad de proceso de la actividad h . El conjunto de restricciones (14) aseguran que las unidades de proceso de cada actividad j se ejecuten en orden y sin traslape. Las restricciones (15) simbolizan que la cantidad de recurso requerido por las actividades en progreso no puede ser mayor que la disponibilidad del recurso. Por último, las restricciones (16) definen las variables de decisión como enteras y no negativas. El modelo descrito también es conceptual debido a que los conjuntos $A(t)$ son función de las variables de decisión.

SM-RCPSP Generalizado

Este problema surge a partir de la relajación de algunos supuestos del SM-RCPSP básico. Específicamente, la inclusión de los cuatro tipos diferentes de relaciones de precedencia (...véase el numeral 1.2.2 ...), restricciones temporales en los tiempos de comienzo y finalización de las actividades y la disponibilidad variable de los recursos por período.

Los cuatro tipos de restricciones de precedencia son definidos de la siguiente forma (Demeulemeester y Herroelen, 1997):

SS_{ij} : Denota una restricción inicio a inicio, y es igual al *mínimo* número de unidades de tiempo que se deben completar de la actividad precedente i antes del comienzo de la actividad sucesora j .

FF_{ij} : Denota una restricción fin a fin, y es igual al *mínimo* número de unidades de tiempo que debe permanecer sin completar la actividad sucesora j después de la terminación de la actividad predecesora i .

FS_{ij} : Denota una restricción fin a inicio, es igual al *mínimo* número de unidades de tiempo que deben pasar desde la finalización de la actividad predecesora i antes del comienzo de la actividad sucesora j . Este es el tipo de relación usada en el SM-RCPSD básico con $FS_{ij}=0$.

SF_{ij} : Denota una restricción inicio a fin, y es igual al *mínimo* número de unidades de tiempo que deben pasar entre el comienzo de la actividad predecesora i y la finalización de la actividad sucesora j .

En las anteriores definiciones, solo se especifican time lags mínimos (*minimal time lags*) y son excluidos los time lags máximos (*maximal time lags*); los cuales son tenidos en cuenta en el problema SM-RCPSD con GPR, que es desarrollado en la siguiente sección.

Además de las restricciones de precedencia, las actividades tienen restricciones temporales en los tiempos de comienzo y finalización de las actividades. Estas restricciones se conocen como tiempo de disponibilidad y fecha de entrega, donde el tiempo de disponibilidad (g_i) indica que la actividad i no puede comenzar antes del tiempo g_i y la fecha de entrega (h_i) significa que la actividad i no puede finalizar después que el tiempo h_i . Por último, la disponibilidad de los recursos a lo largo del horizonte del proyecto se asume variable, por lo cual se incluyen los parámetros R_{kt} cuya notación significa la cantidad disponible del recurso tipo k durante el período $(t - 1, t]$. Siguiendo con la notación utilizada anteriormente e incluyendo los nuevos supuestos, el problema de minimizar la duración del proyecto bajo estas restricciones puede formularse de la siguiente forma (Demeulemeester y Herroelen, 1997):

$$\text{Min } f_{n+1} \quad (17)$$

s.a.

$$f_0 = 0 \quad (18)$$

$$f_i - d_i + SS_{ij} \leq f_j - d_j \quad \forall (i, j) \in H_1, i \neq j \quad (19)$$

$$f_i - d_i + SF_{ij} \leq f_j \quad \forall (i, j) \in H_2, i \neq j \quad (20)$$

$$f_i + FS_{ij} \leq f_j - d_j \quad \forall (i, j) \in H_3, i \neq j \quad (21)$$

$$f_i + FF_{ij} \leq f_j \quad \forall (i, j) \in H_4, i \neq j \quad (22)$$

$$f_i - d_i \geq g_i \quad i = 1, \dots, n+1 \quad (23)$$

$$f_i \leq h_i \quad i = 1, \dots, n+1 \quad (24)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{A}(t)} r_{jk} \leq R_{kt} \quad k \in K; t = 1, 2, \dots, f_{n+1}, \quad (25)$$

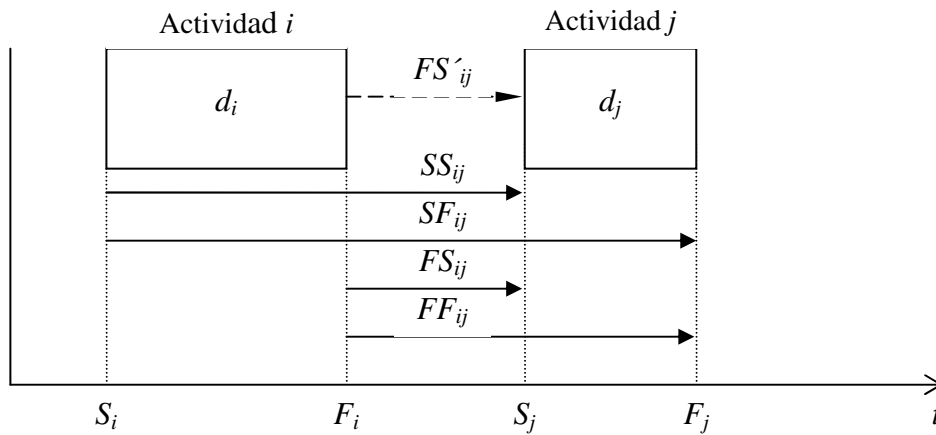
$$f_i \geq 0 \text{ y enteras} \quad i = 1, \dots, n+1 \quad (26)$$

Donde los nuevos parámetros que se incluyen en el modelo son:

- H_1 : Conjunto de pares de actividades indicando relaciones inicio-inicio con un lag de SS_{ij} ;
- H_2 : Conjunto de pares de actividades indicando relaciones inicio-fin con un lag de FS_{ij} ;
- H_3 : Conjunto de pares de actividades indicando relaciones fin-inicio con un lag de SF_{ij} ;
- H_4 : Conjunto de pares de actividades indicando relaciones fin-fin con un lag de FF_{ij} ;
- g_i : Tiempo de disponibilidad de la actividad i ;
- h_i : Fecha de entrega de la actividad i ;
- R_{kt} : Disponibilidad del recurso tipo k durante el período $(t - 1, t]$.

Todas las relaciones de precedencia pueden ser convertidas en relaciones fin-inicio con un time lag fijo. Esta conversión es siempre posible porque el supuesto de no interrupción une el inicio de una actividad con su fin. Para dos actividades que están unidas al menos por una relación de precedencia, como se muestra en la Figura 3, es posible expresar las relaciones de precedencia como una relación fin-inicio, aplicando la siguiente formula de conversión:

Figura 3. Conversión de las relaciones de precedencia



$$FS'_{ij} = \max \{SS_{ij} - d_i ; SF_{ij} - d_i - d_j ; FS_{ij} ; FF_{ij} - d_j\} \quad (27)$$

La ecuación (27) se deduce de manera lógica de la gráfica presentada en la Figura 3; por ejemplo la relación SS_{ij} puede ser fácilmente convertida en una relación FS_{ij} al restar la duración de la actividad i , d_i , del parámetro de la relación (lag). Para las actividades conectadas por las relaciones FS'_{ij} , aplica la definición común de actividad predecesora y sucesora. Con esta transformación de las relaciones de precedencia, el conjunto de restricciones (19)–(22) puede ser formulado de la siguiente forma:

$$f_i + FS'_{ij} \leq f_j - d_j \quad \forall (i, j) \in H, i \neq j \quad (28)$$

De igual manera las restricciones de los tiempos disponibles pueden ser modeladas por medio de relaciones de precedencia fin-inicio entre la actividad ficticia 0 y las demás actividades del proyecto. Esto es debido a que se asume que la actividad 0 comienza y

finaliza en $t = 0$ ($d_0 = 0$). Por lo anterior, para una actividad j con tiempo de disponibilidad g_j se establece la relación con parámetro FS_{0j} así:

$$FS'_{0j} = g_j \quad j = 1, \dots, n+1 \quad (29)$$

SM-RCPSP con Precedencias Generales (GPR)

En este problema se consideran restricciones temporales dadas por time lags mínimos y/o máximos² arbitrarios, entre los tiempos de inicio y/o tiempos de finalización de dos actividades. Por ejemplo, los time lags entre los tiempos de inicio de las actividades i y j tiene la siguiente forma (Bartusch et al., 1998):

$$s_i + l_{ij}^{\min} \leq s_j \leq s_i + l_{ij}^{\max} \quad (30)$$

En este caso l_{ij}^{\min} y l_{ij}^{\max} son el mínimo y máximo lag inicio a inicio de la actividad j en relación con la actividad i , respectivamente; y s_i denota el tiempo de inicio de la actividad i . La inecuación (30) permite definir $W_{ij} := [s_i + l_{ij}^{\min}, s_i + l_{ij}^{\max}]$ como la *ventana de tiempo* (ventana de tiempo) de s_j en relación con s_i . De una forma análoga, los lags inicio a fin, fin a inicio, y fin a fin; así como las ventanas asociadas a estos lags pueden ser definidos. Las restricciones temporales definidas anteriormente contienen las restricciones de precedencia más comunes en los ordenamientos parciales (precedencia estricta), como un caso especial por considerar solo ventanas de tiempo inicio a inicio de la forma $W_{ij} = [s_i + d_i, \infty]$. Igualmente los tiempos de disponibilidad y las fechas de entrega pueden ser fácilmente modelados con los anteriores resultados.

Debido a que se asume que las duraciones de las actividades y los time lags son fijos (deterministas); todas las diferentes clases de time lags pueden ser representadas en una *forma estandarizada* reduciéndolas a un solo tipo, lags inicio a inicio mínimos. Esto es logrado al remplazar los tiempos de finalización, f_i , por $s_i + d_i$; y transformando cada una de las inecuaciones en la forma $s_i + l_{ij} \leq s_j$, permitiendo que l_{ij} tome valores negativos. Todo esto junto nos permite obtener las siguientes *reglas de transformación*:

Lags inicio a inicio: (31)

$$s_i + l_{ij}^{\min} \leq s_j \rightarrow s_i + l_{ij} \leq s_j \quad \text{donde } l_{ij} = l_{ij}^{\min}$$

$$s_i + l_{ij}^{\max} \geq s_j \rightarrow s_j + l_{ji} \leq s_i \quad \text{donde } l_{ji} = -l_{ij}^{\max}$$

Lags inicio a fin: (32)

$$s_i + l_{ij}^{\min} \leq f_j \rightarrow s_i + l_{ij} \leq s_j \quad \text{donde } l_{ij} = l_{ij}^{\min} - d_j$$

$$s_i + l_{ij}^{\max} \geq f_j \rightarrow s_j + l_{ji} \leq s_i \quad \text{donde } l_{ji} = d_j - l_{ij}^{\max}$$

Lags fin a inicio: (33)

$$f_i + l_{ij}^{\min} \leq s_j \rightarrow s_i + l_{ij} \leq s_j \quad \text{donde } l_{ij} = d_i + l_{ij}^{\min}$$

$$f_i + l_{ij}^{\max} \geq s_j \rightarrow s_j + l_{ji} \leq s_i \quad \text{donde } l_{ji} = -d_i - l_{ij}^{\max}$$

Lags fin a fin: (34)

² Un time lag mínimo determina que una actividad solo puede comenzar o finalizar cuando la actividad predecesora ha sido iniciada (finalizada) durante cierto período de tiempo. Un time lag máximo establece que una actividad solo puede comenzar o terminar a mas tardar un cierto número de períodos de tiempo del inicio o final de otra actividad.

$$\begin{aligned}
f_i + l_{ij}^{\min} \leq f_j &\rightarrow s_i + l_{ij} \leq s_j && \text{donde } l_{ij} = d_i - d_j + l_{ij}^{\min} \\
f_i + l_{ij}^{\max} \geq f_j &\rightarrow s_j + l_{ji} \leq s_i && \text{donde } l_{ij} = d_j - d_i - l_{ij}^{\max}
\end{aligned}$$

Estas reglas (31)–(34) son semejantes a la regla deducida en la ecuación (27) incluyendo time lags máximos, por lo cual la Figura 3, ilustra de una manera esquemática las transformaciones propuestas. Esta reducción (conversión) permite representar las restricciones temporales por un dígrafo $G = (V, E)$, donde el grafo G tiene un vértice para cada actividad ($V = N$), y un arco dirigido (i, j) de la actividad i a la actividad j si hay una restricción de la forma $s_i + l_{ij} \leq s_j$ con $l_{ij} > -\infty$. El peso o longitud del arco (i, j) asignado es el máximo valor l_{ij} de todas las restricciones GPR transformadas entre las actividades i y j .

Se define $E \subseteq N \times N$ como el conjunto de las relaciones de precedencia, es decir los arcos (i, j) entre las actividades $i, j \in N$ determinados anteriormente. Y el conjunto de restricciones de la forma $s_i + l_{ij} \leq s_j$ entre dos actividades es reducido a una sola restricción. El problema de minimización de la duración de un proyecto puede ser formulado de manera conceptual como (Dorndorf et al., 2000; Yang et al., 2001):

$$\text{Min } f_{n+1} \quad (35)$$

s.a.

$$s_0 = 0 \quad (36)$$

$$s_i + l_{ij} \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E, \quad (37)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{A}(t)} r_{jk} \leq R_k \quad k \in K; t = 1, 2, \dots, f_{n+1}, \quad (38)$$

$$s_i \geq 0 \text{ y enteras} \quad i = 1, \dots, n+1 \quad (39)$$

SM-RCPSP General

Este problema considera medidas de desempeño regulares en su función objetivo, entre las cuales se incluyen:

Minimización de la duración total del proyecto (*makespan*)

$$\text{Minimizar } f_{n+1} \quad (40)$$

Minimización del retraso ponderado (*weighted delays*)

$$\text{Minimizar } \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (f_j - h_j) \quad (41)$$

Minimización del número total de actividades tardías

$$\text{Minimizar } |\{j \in N; f_j > h_j\}| \quad (42)$$

Minimización del tiempo promedio de flujo o paso

$$\text{Minimizar } \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (f_j - g_j) \quad (43)$$

Maximización del valor presente neto (VPN)

$$\text{Maximizar } \sum_{j=1}^n c_{j, f_j} * f_j \quad (44)$$

Donde c_{j,f_j} es el flujo de caja (positivo) o valor presente generado por terminar la actividad j en el período f_j ; el VPN es una medida regular de desempeño si $c_{j,f_j} > c_{j,f_{j+1}}$ para $j = 1, 2, \dots, n$ y $f_j = 1, 2, \dots, f_n$ (Sprecher y Drexl, 1996).

El problema SM-RCPSP General es obtenido al reemplazar la minimización del *makespan* por cualquier otra medida regular de desempeño (41)–(44) en los problemas SM-RCPSP Generalizado o SM-RCPSP con GPR.

2.1.2 RCPSP Multi-Modo. Este problema es conocido como MM-RCPSP (por sus siglas en inglés *Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem*) debido a que cada actividad tiene asociado un conjunto de modos de ejecución disponibles para realizar la actividad. Un modo refleja una combinación alternativa de cantidades de recursos utilizadas para desarrollar una actividad. La duración de cada actividad es una función discreta de las cantidades de recurso empleado o asignado, bajo este concepto, una actividad puede ser acelerada aumentando la cantidad de recurso dedicado para su ejecución (Sprecher y Drexl, 1996). Este supuesto es una versión generalizada del problema de intercambio tiempo/costo, donde la variable costo está relacionada implícitamente con la cantidad de recurso asignado. La posibilidad de acelerar las actividades se conoce como problema de intercambio tiempo/recurso, en algunos casos también se trata el problema de intercambio recurso/recurso donde existe la sustitución entre recursos (Sprecher y Drexl, 1996) ya que la diferencia de requerimiento de recursos entre dos modos puede resultar en valores positivos y negativos. Es decir mientras que el requerimiento de recurso k de un modo j es mayor que el de un modo h , es posible que para alguno de los otros recursos necesarios la situación sea contraria³.

En los problemas Multi-Modo el elemento recursos ha tenido gran atención por parte de los investigadores, ya que se contemplan los diferentes tipos de recursos necesarios para la ejecución de las actividades. Dentro de los trabajos desarrollados sobre el MM-RCPSP, generalmente solo se consideran tres de los cuatro tipos de recursos existentes. Se recuerda que los tipos de recursos se clasifican de acuerdo a la disponibilidad de los mismos a lo largo del proyecto. Para cada modo de ejecución de una actividad y un recurso dado, se define el contenido de trabajo como: el producto entre la duración de la actividad y la cantidad de recurso necesitado por unidad de tiempo. Este concepto es útil cuando se trabaja con recursos no renovables.

Con base en los trabajos realizados sobre el MM-RCPSP, este problema se divide en tres subclases generales de acuerdo a Yang et al. (2001). En la Tabla 2 se resume una adaptación de la clasificación propuesta por este autor, donde se presenta las subclases del problema con sus principales características.

³ El requerimiento de algún recurso l en el modo j es menor que en el modo h .

Tabla 2. Clasificación del MM-RCPSP

	MM-RCPSP con Recurso No Renovable	MM-RCPSP con Recurso Renovable	MM-RCPSP General
Objetivo	Min Duración	Min Duración	Regular
Tipo de Recurso	No Renovable	Renovable	No Renovable, Renovable, y Doblemente Restringido
Relaciones de Precedencia	P*	P	GPR*
Disponibilidad de Recurso por período	Constante	Constante	Constante o Variando en el tiempo
Requerimientos de Recurso por período	Constante dentro de un modo	Constante dentro de un modo	Constante o Variando en el tiempo
Interrupción (Preemption)	No	No	No
Intercambios (Trade Offs)	Tiempo/Recurso	Tiempo/Recurso	Tiempo/Recurso, Tiempo/Costo, Recurso/Recurso

P*: Relaciones de Precedencia estrictas (fin-inicio)

GPR*: Relaciones de Precedencia Generalizadas

Fuente: Adaptado de Yang et al. (2001)

MM-RCPSP con recurso no renovable

Como se explicó anteriormente, el problema de intercambio tiempo/costo está relacionado con los problemas MM-RCPSP, ya que este se puede conceptualizar como un caso particular del problema con recursos no renovables. El problema MM-RCPSP con recurso no renovable asigna un recurso no renovable a las actividades. En este problema los costos son unidades de agregación, por lo cual el costo del recurso k mientras que procesa la actividad j , c_{jk} , se asocia como un modo de ejecución. Para cada costo existe una duración, es decir la duración es función del costo y toda combinación costo-tiempo perteneciente a esta función es considerada un modo. Si el conjunto de modos para cada actividad se puede representar como un intervalo cerrado, y c_{jk} es una función decreciente de d_j , el problema resultante es un problema continuo⁴ de intercambio (compensación) tiempo/costo. De manera consecuente si los modos disponibles son un conjunto discreto y c_{jk} es decreciente en d_j , se tiene un problema discreto de intercambio tiempo/costo.

Es claro que para el problema continuo si se desea minimizar el tiempo, la solución puede ser obtenida fácilmente por el método CPM o cualquier otro método de recursión con el tiempo límite mínimo permitido; y si se busca minimizar el costo también se puede obtener la solución con el CPM utilizando la duración de cada actividad con el menor costo. De manera ideal se quisiera como objetivo minimizar el tiempo y el costo simultáneamente para un proyecto dado; desafortunadamente existe un intercambio entre estas dos variables, siendo las ejecuciones cortas las más costosas y las ejecuciones económicas las que toman más tiempo. Fijando cualquiera de las dos

⁴ Cuando el problema es continuo generalmente se supone linealidad entre la duración y el costo.

variables, costo o tiempo, se obtienen dos problemas de optimización relacionados con el objetivo de minimizar el otro parámetro.

El primero es el problema del presupuesto, dado un presupuesto no negativo, $B \geq 0$, se busca minimizar la duración total del proyecto. Si definimos $c_j(d_j)$ como la función de costo de la actividad j asociado a la duración d_j , s_j como la fecha de inicio de la actividad j , d_j como la duración de la actividad j , l_j y u_j como la duración mínima y máxima de la actividad j , respectivamente y P_j como el conjunto de actividades predecesoras de la actividad j . El problema del presupuesto puede ser formulado así:

$$\text{Min } s_{n+1} \quad (45)$$

s.a.

$$s_h + d_h \leq s_j \quad j = 1, \dots, n+1; h \in P_j, \quad (46)$$

$$d_j \geq l_j \quad j = 1, \dots, n+1 \quad (47)$$

$$d_j \leq u_j \quad j = 1, \dots, n+1 \quad (48)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} c_j(d_j) \leq B \quad (49)$$

$$s_j \geq 0 \text{ y enteras} \quad j = 1, \dots, n+1 \quad (50)$$

$$d_j \geq 0 \text{ y enteras} \quad j = 1, \dots, n+1 \quad (51)$$

La notación utilizada para la anterior formulación es consistente e igual a la utilizada en el apartado 3.1.1. nótese que en este problema d_j es una variable de decisión restringida en el intervalo $[l_j, u_j]$, los límites de este intervalo son parámetros conocidos y enteros. Dado que la actividad $n+1$ es ficticia (finalización del proyecto) por lo cual $d_{n+1} = l_{n+1} = u_{n+1} = 0$. En el caso en que la función $c_j(d_j)$ sea linealizada el problema 45-51 puede ser resuelto por medio de programación lineal entera realizando una transformación paramétrica en la inecuación (49); este caso especial es conocido como problema LTCT (*Linear Time-Cost Tradeoff Problem*), (Skutella, 1998).

El segundo problema es el problema del plazo, donde se fija un plazo máximo, $T \geq 0$, para terminar el proyecto y el objetivo que se busca es minimizar el costo total del proyecto. Análogamente, este problema puede ser formulado de la siguiente forma:

$$\text{Min } \sum_{j \in \mathcal{N}} c_j(d_j) \quad (52)$$

s.a.

$$s_h + d_h \leq s_j \quad j = 1, \dots, n+1; h \in P_j, \quad (53)$$

$$d_j \geq l_j \quad j = 1, \dots, n+1 \quad (54)$$

$$d_j \leq u_j \quad j = 1, \dots, n+1 \quad (55)$$

$$s_{n+1} \leq T \quad (56)$$

$$s_j \geq 0 \text{ y enteras} \quad j = 1, \dots, n+1 \quad (57)$$

$$d_j \geq 0 \text{ y enteras} \quad j = 1, \dots, n+1 \quad (58)$$

De igual forma que el anterior problema este puede ser resuelto por medio de la programación lineal entera.

Una realización del proyecto es óptima si y solo si el proyecto no se puede realizar más barato ni más rápido sin incrementar su duración o costo. Una realización óptima S , es

considerada óptima para el tiempo de plazo $T \geq 0$, si $c(S)=B_{\text{opt}}(T)$; y es llamada óptima para el presupuesto $B \geq 0$, si $t(S)=T_{\text{opt}}(B)$.

El problema del presupuesto y el problema del plazo son partes especiales del problema de compensación Tiempo-Costo que fue formulado hace casi cuarenta años por Kelley y Walker (1959): Encontrar las realizaciones óptimas para todos los plazos $T \geq 0$ (o equivalente para todos los presupuesto $B \geq 0$). Kelley y Walker consideraban proyectos lineales donde todas las funciones de costo fueran lineales afines y decrecientes sobre el intervalo cerrado. El problema lineal de intercambio tiempo/costo fue solucionado independientemente por Fulkerson (1961) y Kelley (1961). Más adelante, Phillips y Dessouky (1977) construyeron una versión mejorada de los algoritmos originales (Skutella, 1998).

Para el caso discreto, los estudios realizados para el contexto tradicional de intercambio tiempo/costo son: Meyer y Shaffer (1965), Butcher (1997), Robinson (1975), Panagiotakopoulos (1977), Harvey y Patterson (1979), Bein et al. (1992), Elmaghraby (1993), De et al. (1993), Tufekci (1993) y Demeulemeester et al. (1993), Skutella (1998) entre otros. También se ha tratado el problema en el contexto de decisión para el CPM, ejemplo de esto son los trabajos de Crowston y Thompson (1967), Crowston (1970) y Hindelang y Muth (1979).

Entre estos trabajos se destacan: Hindelang y Muth (1979) quienes desarrollaron un programa dinámico que soluciona el problema en tiempo pseudo-polinomial; Harvey y Patterson (1979) propusieron un algoritmo de enumeración. Demeulemeester et al. (1993) proponen un método de solución Branch-and-Bound. Skutella (1998) desarrolló algoritmos de aproximación para esta clase de problemas.

MM-RCPSP con recurso renovable

El problema MM-RCPSP con un solo recurso renovable es conocido como DTRTP (por sus siglas en inglés *Discrete Time/Resource Trade-off Problem*), el cual es un caso particular del MM-RCPSP general. En el DTRTP la duración de una actividad es una función discreta, no-creciente de la cantidad de un solo recurso renovable asignado a esta. Un solo tipo recurso renovable está disponible en una cantidad constante R para cada período de tiempo durante el proyecto. Para cada actividad j ($0 \leq j \leq n+1$) el contenido de trabajo W_j es especificado (cantidad total de recurso), y un conjunto disponible de modos de ejecución puede ser detallado para cada actividad, cada uno de estos modos esta caracterizado por una duración fija y una cantidad constante de recurso requerido por unidad de tiempo, el producto de la duración y el recurso debe ser al menos igual al contenido de trabajo de la actividad. Cuando la actividad j se ejecuta en el modo m ($1 \leq m \leq M_j$), su duración es d_{jm} y requiere una cantidad constante r_{jm} de recurso renovable en cada período de tiempo durante su ejecución, tal que $r_{jm}d_{jm}$ es por lo menos igual y lo más cerca posible a W_j . Un modo se denomina eficiente si cada uno de los otros modos tiene una duración mayor o un requisito de recurso más alto. Sin pérdida de generalidad, se asume que los modos de cada actividad están ordenados de forma no decreciente en cuanto a su duración. Para las actividades ficticias 0 y $n+1$, se asume que solo tienen un modo de ejecución con duración y requerimiento de recurso cero. El objetivo es programar cada actividad en uno de sus modos de ejecución, cumpliendo las restricciones de precedencia y la restricción del recurso renovable, con el objetivo de minimizar la duración del proyecto.

Para formular el problema de manera matemática se define la variable binaria x_{jmt} cuyo valor es 1 si la actividad j se ejecuta en el modo m y comienza en el período t y 0 de otra manera. El problema puede formularse de la siguiente forma de programa lineal (De Reyck et al., 1998):

$$\text{Min} \quad \sum_{t=e_{n+1}}^{l_{n+1}} t \cdot x_{n+1,1,t} \quad (59)$$

s.a.

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=e_j}^{l_j} x_{jmt} = 1 \quad j = 0, 1, \dots, n+1 \quad (60)$$

$$\sum_{m=1}^{M_h} \sum_{t=e_h}^{l_h} (t + d_{hm}) x_{hmt} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=e_j}^{l_j} t \cdot x_{jmt} \quad j = 0, 1, \dots, n+1; h \in P_j, \quad (61)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} r_{jm} \sum_{s=\max\{t-d_{jm}, e_j\}}^{\min\{t-1, l_j\}} x_{jms} \leq R \quad t = 1, \dots, \bar{T} \quad (62)$$

$$x_{jmt} \in \{0,1\} \quad j = 0, \dots, n+1; m = 1, \dots, M_j; \\ t = e_j, e_j+1, \dots, l_j \quad (63)$$

Donde e_j (l_j) denota el tiempo de inicio más temprano (más tarde) de la actividad j basado en el modo con la menor duración, $m=1$. P_j representa el conjunto de actividades predecesoras de j . La función objetivo (59) minimiza la duración del proyecto. El conjunto de restricciones (60) aseguran que cada actividad se ejecute en un solo modo y comience una sola vez (en un solo período de tiempo). Las restricciones (61) hacen cumplir las relaciones de precedencia entre las actividades. Las ecuaciones (62) aseguran que la disponibilidad por período del recurso renovable se respete. Por último, las restricciones (63) obligan a las variables de decisión a tomar valores binarios.

MM-RCPSPP General

El problema MM-RCPSPP general incluye intercambios tiempo/costo, tiempo/recurso, y recurso/recurso, recursos renovables y no renovables, y doblemente restringidos (recursos limitados por período y en la totalidad del proyecto), disponibilidad de los recursos variando con el tiempo, requerimientos de recursos variando con el tiempo y una variedad de funciones objetivo regulares. Los modos reflejan combinaciones alternativas de los tipos de recurso y de las cantidades de recurso para satisfacer las actividades. Las actividades pueden ser aceleradas aumentando las cantidades de recurso (compensación tiempo/recurso o compensación de tiempo/costo), o aumentando las cantidades de algunos recursos y reduciendo las cantidades de otros recursos (compensación recurso/recurso).

En primer lugar trataremos el problema general con disponibilidad de recursos variando con el tiempo pero con los requerimientos de recurso constantes, para después desarrollar el modelo con requerimientos variando con el tiempo para una mejor comprensión de la formulación y por practicidad en la explicación.

El problema considera un proyecto el cual consiste en n actividades, el conjunto de todas las actividades es denotado por N ; debido a requerimientos lógicos o tecnológicos

entre las actividades aparecen relaciones de precedencia, las cuales obligan que una actividad $j, j = 1, 2, \dots, n$, no pueda comenzar hasta que todas sus predecesoras $h, h \in P_j$, hayan finalizado. La estructura del proyecto es representada por una red AON, esta red es acíclica y cada nodo está numéricamente etiquetado, de tal forma que una actividad j tiene un mayor número que todas sus predecesoras. Al igual que los anteriores problemas se introducen dos actividades ficticias (0 y $n+1$) para representar el comienzo y fin del proyecto. Cada actividad j puede ser ejecutada en uno de sus M_j modos; las actividades no pueden ser fraccionadas y una vez un modo ha sido seleccionado no puede ser cambiado. Ejecutar la actividad j en el modo m toma d_{jm} períodos y es soportada por: un conjunto K de recursos renovables, un conjunto R de recursos no renovables y un conjunto D de recursos doblemente restringidos. Se considera un horizonte \bar{T} , el cual es una cota superior de la duración del proyecto; se tiene disponible una cantidad R_{kt} de unidades de recurso renovable $k, k \in K$ y R_{lt}^δ unidades de recurso doblemente restringido $l, l \in D$, en el período $t, t = 1, \dots, \bar{T}$. La capacidad total del recurso no renovable $i, i \in R$, y del recurso doblemente restringido $l, l \in D$, están dadas por W_i y W_l respectivamente. La actividad j requiere r_{jkm} unidades del recurso renovable $k, k \in K$, cuando es ejecutada en el modo m , y r_{jlm}^δ unidades del recurso doblemente restringido $l, l \in D$, son consumidas cada período mientras la actividad j está en proceso (activa). Adicionalmente, w_{jim} unidades de recurso no renovable $i, i \in R$, son consumidas. Se asume que existe algún intervalo de tiempo de longitud d_{jm} donde se cumple que $r_{jkm} \leq R_{kt}$ y $r_{jlm}^\delta \leq R_{lt}^\delta$ para toda $k \in K, l \in D$ y t en el intervalo; si no existe este intervalo, entonces la actividad j no puede ejecutarse en el modo m y no es necesario incluir este modo. Se asume que todos los parámetros de este modelo son valores no negativos y enteros; y que las actividades ficticias 0 y $n+1$ solo tienen un modo de ejecución con duración y requerimiento de recurso cero. El objetivo de este problema es encontrar el calendario que minimice la duración total del proyecto cumpliendo las restricciones impuestas por las relaciones de precedencia y las disponibilidades limitadas de los recursos.

Si la cardinalidad del conjunto R es mayor que uno, $|R| > 1$, entonces encontrar una solución factible es un problema NP-duro (Kolisch, 1995). Sin embargo, suponiendo factibilidad y una disponibilidad constante por período de los recursos renovables, se puede obtener una cota superior de la mínima duración por medio de la suma de las duraciones máximas de cada actividad.

Dada una cota superior en la duración del proyecto, se pueden usar las relaciones de precedencia y los modos con las duraciones más cortas, $d_{\min_j} = \min \{d_{jm} | j = 1, \dots, M_j\}$, para construir ventanas de tiempo, intervalos de la forma $[EF_j, LF_j]$, con el tiempo de finalización más temprano EF_j y con el tiempo de finalización más tardío LF_j . Este intervalo contiene los tiempos de finalización de la actividad j que son factibles para las relaciones de precedencia. El EF_j y LF_j son calculados por medio de recursión hacia delante y hacia atrás, respectivamente.

Con las ventanas de tiempo definidas el problema puede ser formulado como un programa lineal. Para plantear el modelo se usan variables de decisión binarias x_{jmt} definidas de la siguiente forma:

$$x_{jmt} = \begin{cases} 1 & \text{si la actividad } j \text{ es ejecutada en el modo } m \text{ y finaliza en el período } t \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Siguiendo la descripción y la notación anterior el MM-RCPSP general se puede formular mediante el siguiente programa lineal binario (Talbot, 1982; Drexl y Gruenewald, 1993; Sprecher y Drexl, 1996):

$$\text{Min} \quad \sum_{t=EF_{n+1}}^{LF_{n+1}} t \cdot x_{n+1,1,t} \quad (64)$$

s.a.

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} x_{jmt} = 1 \quad j = 0, 1, \dots, n+1 \quad (65)$$

$$\sum_{m=1}^{M_h} \sum_{t=EF_h}^{LF_h} t \cdot x_{hmt} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} (t - d_{jm}) x_{jmt} \quad j = 1, \dots, n+1; h \in P_j, \quad (66)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} r_{jkm} \sum_{q=\max\{t, EF_j\}}^{\min\{t+d_{jm}-1, LF_j\}} x_{jmq} \leq R_{kt} \quad k \in K; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (67)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} w_{jim} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} x_{jmt} \leq W_i \quad i \in R \quad (68)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} r_{jlm}^\delta \sum_{q=\max\{t, EF_j\}}^{\min\{t+d_{jm}-1, LF_j\}} x_{jmq} \leq R_{lt}^\delta \quad l \in D; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (69)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} w_{jlm} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} x_{jmt} \leq W_l \quad l \in D \quad (70)$$

$$x_{jmt} \in \{0,1\} \quad j = 0, \dots, n+1; m = 1, \dots, M_j; \\ t = EF_j, \dots, LF_j \quad (71)$$

El conjunto de restricciones (65) indica que a cada actividad j solo puede realizarse en un solo modo y tiene un único tiempo de finalización, es decir a la actividad se le asigna un solo modo y un solo tiempo de terminación. El conjunto de restricciones (66) asegura que una actividad j no puede comenzar hasta que todas sus predecesoras hayan finalizado. Las restricciones (67) aseguran que los niveles de disponibilidad de cada uno de los recursos k (renovables) son respetados en cada período de tiempo. Las restricciones (68) garantizan que el consumo de cada uno de los recursos no renovables i durante todo el proyecto no excede la capacidad total del mismo durante el proyecto. En este modelo las restricciones sobre los recursos doblemente restringidos fueron divididas en dos conjuntos de restricciones (69)-(70) usando el resultado de Talbot (1982) para descomponer este tipo de recursos en uno renovable y otro no renovable utilizando la relación $r_{jlm}^\delta = w_{jlm} / d_{jm}$. Las restricciones (69) aseguran que los niveles de disponibilidad de cada uno de los recursos l (doblemente restringidos) son respetados en cada período de tiempo. El conjunto de restricciones (70) obligan a que el consumo de

cada uno de los recursos doblemente restringidos l durante todo el proyecto no exceda la capacidad total del mismo durante el proyecto. Las restricciones (71) definen a las variables de decisión x_{jmt} como binarias.

Como se explicó anteriormente, el modelo (64)-(71) cubre el problema con perfiles de recurso variables en el tiempo (disponibilidad variable de los recursos en el tiempo); ahora se incluirá la situación en que los requerimientos de recurso también son variables en el tiempo. Para desarrollar el modelo se redefinen estos parámetros de la siguiente forma: $r_{jkm\tau}$, $r_{jim\tau}$, y $r_{jlm\tau}^{\delta}$ ($\tau = 1, \dots, d_{jm}$) los cuales denotan los requerimientos de recursos renovable, no renovable y doblemente restringido necesarios para calendarizar la actividad j en el modo m en el período $t+\tau$, donde t corresponde al período (desconocido de antemano) en el cual la actividad j comenzará. Utilizando como base el modelo (64)-(71) se puede construir el siguiente modelo general (Drexl y Gruenewald, 1993):

$$\text{Min} \quad \sum_{t=EF_{n+1}}^{LF_{n+1}} t \cdot x_{n+1,1,t} \quad (72)$$

s.a.

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} x_{jmt} = 1 \quad j = 0, 1, \dots, n+1 \quad (73)$$

$$\sum_{m=1}^{M_h} \sum_{t=EF_h}^{LF_h} t \cdot x_{hmt} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} (t - d_{jm}) x_{jmt} \quad j = 1, \dots, n+1; h \in P_j, \quad (74)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{q=\max\{t, EF_j\}}^{\min\{t+d_{jm}-1, LF_j\}} r_{jkm(t+d_{jm}-q)} x_{jmq} \leq R_{kt} \quad k \in K; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (75)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{\tau=1}^{d_{jm}} r_{jim\tau} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} x_{jmt} \leq W_i \quad i \in R \quad (76)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{q=\max\{t, EF_j\}}^{\min\{t+d_{jm}-1, LF_j\}} x_{jmq} r_{jlm(t+d_{jm}-q)}^{\delta} \leq R_{lt}^{\delta} \quad l \in D; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (77)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{\tau=1}^{d_{jm}} r_{jlm\tau}^{\delta} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} x_{jmt} \leq W_l \quad l \in D \quad (78)$$

$$x_{jmt} \in \{0,1\} \quad j = 0, \dots, n+1; m = 1, \dots, M_j; \\ t = EF_j, \dots, LF_j \quad (79)$$

El modelo (72)-(79) es el MM-RCPSp general con objetivo minimizar la duración total, cualquier otra función objetivo regular puede reemplazar (72) formando el modelo general; estas funciones se obtienen al extender las dadas en el SM-RCPSp General al caso multi-modo, para mayor detalle ver Sprecher y Drexl (1996).

2.1.3 RCPSP con funciones objetivo no regulares. Como se explicó...en la sección 1.2.4..., las funciones objetivo como medidas de desempeño se clasifican en regulares y no regulares. Una función objetivo se considera regular si el valor de la función para un calendario dado no desmejora al reducir el tiempo de terminación de una actividad sin cambiar (aumentar) el tiempo de terminación de cualquier otra actividad. Una función de evaluación se considera no regular, si no cumple con la anterior característica (Sprecher et al., 1995; Sprecher y Drexler; 1996; Yang et al., 2001).

Dentro del conjunto de medidas de desempeño no regulares que se han estudiado se encuentra la maximización del valor presente neto (Bey et al., 1981; Özdamar y Gündüz, 1995; Kolisch y Padman, 2001), esta función objetivo ha sido estudiada en el caso sin restricciones de recurso y en el caso con restricciones de recursos. Otra función de evaluación no regular es la maximización de la calidad, introducida de forma explícita por Icmeli y Rom (1997). La minimización del costo también es una medida de desempeño no regular, la cual ha despertado bastante interés en la comunidad académica debido a su importancia práctica. Dentro de este grupo se encuentra el problema clásico de la nivelación de recursos, donde se minimiza la desviación entre los requerimientos de recursos y los niveles indicados (Bandelloni et al., 1994, López, 1995, Brinkmann y Neumann, 1996). Otro problema de programación de proyectos con esta clase de objetivos es el problema de inversión en recursos, donde se busca minimizar los costos asociados con el nivel constante de capacidad de recurso disponible para el proyecto (Mason y Moodie, 1971, Möhring, 1984, Demeulemeester, 1995).

A continuación, se presenta la descripción de algunas funciones objetivo no regulares.

Maximización del VPN

El objetivo de maximizar el VPN es considerado por primera vez en el trabajo pionero de Russell (1970), donde modela las relaciones de precedencia a través de una formulación no lineal que ignora las restricciones de recursos, y la cual aproxima a un programa lineal. En el problema VPN se modelan los flujos monetarios negativos y positivos, representando gastos al comenzar actividades y pagos progresivos por la terminación de las actividades o de partes del proyecto, respectivamente. La función objetivo es la siguiente:

$$\text{Maximizar} \quad \sum_{j=1}^n v_j^+ \cdot \left(\frac{1}{1+\alpha}\right)^{f_j} - \sum_{j=1}^n v_j^- \cdot \left(\frac{1}{1+\alpha}\right)^{s_j} \quad (80)$$

Donde v_j^+ y v_j^- es el ingreso y el gasto relacionado a la actividad j , respectivamente; α es el factor de descuento de los flujos; y f_j y s_j son respectivamente el tiempo de finalización y de comienzo de la actividad j .

Russell (1970, 1986), dada una tasa de descuento α utiliza la forma exponencial de descuento sobre una red AON, con m actividades y n eventos (nodos). En su formulación define F_i como el flujo de caja neto en el evento (nodo) i , $i = 1, \dots, n$; y T_i como el tiempo de ocurrencia del evento i .

$$\text{Maximizar} \quad \sum_{i=1}^n F_i \exp(-\alpha T_i) \quad (81)$$

Maximización de la calidad

Icmeli y Rom (1997) introducen el concepto de calidad dentro de los PSP, donde el concepto de reproceso juega un papel importante en su modelo, ya que argumentan que una actividad ejecutada con poca calidad necesita tiempo adicional de reproceso lo cual resulta en atraso del proyecto y en incremento de costos. Icmeli y Rom, propusieron un modelo que llamaron RCPSPR (por sus siglas en inglés Resource Constrained Project Scheduling Problem with Reworks), en el cual definen el RCPSPR con dos restricciones adicionales que limitan los tiempos de reproceso y el costo total por reproceso. En su modelo asumen que se conoce el tiempo de reproceso y el costo de reproceso de la actividad j cuando termina en el período t , parámetros que denotan como P_{jt} y RWC_{jt} . Definen además las variables de decisión Q_1 y Q_2 como el porcentaje total de tiempo de reproceso usado y el costo total de reproceso gastado, respectivamente (Haouari y Al-Fawzan, 2002). La función objetivo de calidad es la siguiente:

$$\text{Minimizar } Q_1 + Q_2 \quad (82)$$

Nivelación de recursos

En el problema de nivelación del recurso, el objetivo principal es limitar la cantidad de variación del uso del recurso período a período, que puede ser costoso en ciertos contextos. Se asume que existe un conjunto K de recursos. Denotamos c_k como el costo por la unidad del recurso k y definimos la función $r_k(S, t)$ como el uso total del recurso k en el tiempo t bajo el calendario (solución) S . La función objetiva se puede escribir como:

$$\text{Minimizar } \sum_{k \in \mathcal{K}} c_k \cdot f(r_k(S, t)) \quad (83)$$

En la ecuación (83), $f(r_k(S, t))$ es referida genéricamente como la función de uso. Tres clases de funciones de uso han sido consideradas en los trabajos de PSP: 1) función de la inversión del recurso (Möhring, 1984, Demeulemeester, 1995), 2) función de desviación de la utilización del recurso (Bandelloni et al., 1994, y Brinkmann y Neumann, 1996), y 3) función de variación de la utilización del recurso en el tiempo (Mason y Moodie, 1971).

Minimización del costo total (RCPSPR con tiempo límite)

Dado un tiempo límite para todas las actividades, se considera la posibilidad de agregar cantidades de recurso adicional para acabar las actividades a tiempo. Esta clase de problema fue formulado por Deckro y Hebert (1989), en el cual se asume que una unidad adicional del recurso renovable $k \in K$ (donde K es el conjunto de recursos disponibles) está disponible en el período t a un costo c_k , pero la cantidad de recurso adicional está limitada a un porcentaje de la capacidad regular del período, R_k . El objetivo es encontrar un calendario factible con el menor costo adicional. Se define O_{kt} como la cantidad de recurso adicional k utilizado en el período t , la restricción adicional a este problema corresponde a que O_{kt} no puede ser mayor que el porcentaje o_k de R_k . La función objetivo se formula de la siguiente forma (Yang et al., 2001):

$$\text{Minimizar } \sum_{k \in \mathcal{K}} c_k \sum_{t=1}^{s_{n+1}} O_{kt} \quad (84)$$

Talbot (1982) incluye funciones objetivo monetarias, relacionadas con el recurso dinero y con costos asociados a la duración total del proyecto, a través del costo por unidad de tiempo del proyecto. Para la formulación de la función objetivo, se define w_{jcm} como la cantidad del recurso c (costo) necesario para ejecutar la actividad j en el modo m , x_{jmt} como variable binaria que indica si la actividad j se realiza en el modo m y termina en el período t , y C_t como el costo del proyecto por cada período t .

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} w_{jcm} x_{jmt} + \sum_{t=EF_{n+1}}^{LF_{n+1}} C_t x_{n+1,1,t} \quad (85)$$

2.1.4 RCPSP Estocástico. En este tipo de problemas, el tiempo de procesamiento de una actividad es una variable aleatoria, que sigue alguna distribución de probabilidad. Esta clase de problema conlleva a una complejidad mucho más grande en el análisis. En vez de minimizar la duración, se considera como objetivo minimizar la duración esperada. Ya que muchas actividades interdependientes son representadas frecuentemente en un grafo de proyecto, y los tiempos de finalización de las actividades son altamente interdependientes, la distribución de probabilidad de la duración total es frecuentemente extremadamente difícil o imposible de caracterizar, lo que frecuentemente conlleva a suposiciones de independencia de las actividades para un análisis fácilmente manejable. Tales suposiciones de independencia, sin embargo, puede proveer resultados extremadamente confusos en la práctica.

La descripción del problema RCPSP estocástico es la siguiente: dado un conjunto N de actividades que conforman el proyecto, donde cada actividad j tiene una duración aleatoria d_j y las actividades están relacionadas por medio del conjunto E_0 de restricciones de precedencia. Para ejecutar las actividades se cuenta con un conjunto de recursos renovables K , cada recurso $k \in K$ tiene una disponibilidad asociada R_k , y cada actividad j tiene una tasa de consumo r_{jk} , $j \in N$, del recurso k . Para una función regular de costo C , se pretende encontrar una política Π que minimice el valor esperado de C y que calcule los costos esperados del proyecto dada la realización de la política Π , es decir $C(F^\Pi(d))$. Donde $F^\Pi(d)$, denota el vector de tiempos de finalización de las actividades dada la política Π y las duraciones aleatorias d (Stork, 2001).

2.2 MÉTODOS DE SOLUCIÓN

Desde los años 60 la mayoría de trabajos en programación de proyectos se han enfocado en desarrollo de técnicas de solución para el RCPSP, llevando a que numerosos heurísticos y muchas técnicas de solución exacta surjan (Icmeli et al, 1993). Estos trabajos se pueden clasificar según el método de solución propuesta en: programación matemática, heurísticos y meta-heurísticos.

2.2.1 Métodos exactos. Entre los métodos exactos se encuentran los desarrollados por Mingozi et al., 1998; Balas, 1970 y Sabzehparva et al., 2008. La principal característica de los anteriores algoritmos es que obtienen una solución óptima al problema, cuando ésta existe. Sin embargo, la naturaleza combinatoria de estos problemas y su pertenencia a la clase de problemas *NP-hard*, hace que sean prácticamente imposibles de resolver en tiempos razonables, aún mediante el uso de los computadores más potentes existentes hoy en día. La experiencia de otros autores indica

que sólo es posible obtener la solución mediante métodos exactos para instancias del problema con menos de 60 actividades (Valls et al., 2005).

No obstante, un proyecto de 60 actividades se puede considerar pequeño si se compara con los casos reales; por lo tanto, toda discusión acerca de la solución del RCPSP se centra en algoritmos aproximados que cada autor, desde su enfoque, plantea como eficientes.

2.2.2 Métodos heurísticos. Los heurísticos que han sido o están siendo más utilizados para el RCPSP se pueden dividir en: heurísticos basados en reglas de prioridad y heurísticos basados en otros enfoques.

2.2.2.1 Heurísticos basados en reglas de prioridad. Dichas reglas están clasificadas en cinco grandes grupos (Ballestín, 2002):

- **Reglas de prioridad basadas en la actividad:** Consideran solo la información inherente a la actividad, por ejemplo la duración, y no considera ninguna otra información proveniente del proyecto.

Las reglas más representativas de este grupo para la selección de una actividad mediante el enfoque de un solo proyectos son la regla SPT (*Shortest Processing Time*) y la regla LPT (*Longest Processing Time*).

Las reglas de prioridad mediante el enfoque de múltiple proyecto más representativa es el minSASP (*Shortest Activity from Shortest Project*).

Existe otra regla denominada RND (*Random*) que aunque no cumpla con el tipo de categorización precisa de este aparte se usa como control en las pruebas de las heurísticas desarrolladas.

- **Reglas de prioridad basadas en la red:** Consideran solo información relacionada a la red, los ejemplos más utilizados de estas reglas son la MIS (*Most Immediate Successors*) y MTS (*Most Total Successor*) que tratan con las relaciones de precedencia directas y transitivas y la GRPW (*Greatest Rank Positional Weight*) que pondera las relaciones de precedencia junto con la duración de las actividades correspondientes.

Es importante que al utilizar estas reglas de prioridad en un esquema tipo *backward* se remplacen los sucesores por los predecesores.

- **Reglas de prioridad basadas en la ruta crítica:** Se divide en dos categorías, las reglas de prioridad estáticas y dinámicas, las primeras pueden ser calculadas de inmediato desde el principio de la secuenciación y las segundas son calculadas en cada instante de la secuenciación.

En el enfoque de un solo proyecto se encuentran en la categoría de estáticas a EST (*Earliest Start Time*), EFT (*Earliest Finish Time*), LST (*Latest Start Time*), LFT (*Latest Finish Time*), MSL (*Minimum Slack*), y en la categoría de dinámicas a

ESTD (*Dynamic Earliest Start Time*), EFTD (*Dynamic Earliest Finish Time*) y el MSLD (*Dynamic Minimum Slack*).

Para enfoque de múltiples proyectos se encuentran el minSLK_MP (*Minimum Slack in Multiproject Enviroment*) y el minLFT_MP (*Minimum Latest Finishing Time in Multiproject Enviroment*).

- **Reglas de prioridad basadas en los recursos:** Son definidas como reglas de prioridad que consideran solo la información relacionada con la cantidad de recurso que demanda cada una de las actividades para poder llevarse a cabo. Se distinguen principalmente dos tipos de reglas en el enfoque de un solo proyecto, el GRD (*Greatest Resource Demand*), y el GCUMRD (*Greatest Cumulative Resource Demand*) que considera la suma de todos los requerimientos de recurso de su actividad y la de los sucesores inmediatos.

En el enfoque de múltiples proyectos se encuentran principalmente la maxTWK (*Maximum Total Work Content*) y maxRD_MP (*Maximum Resource Demand in Multiproject Enviroment*)

- **Reglas de prioridad compuesta:** En esta clasificación se pueden usar los 4 anteriores tipos de reglas de prioridad mediante el uso de combinaciones lineales o sumas ponderadas, el objetivo es aprovechar la bondad de cada una de las reglas de prioridad y poder obtener una diferente y quizás mejor aproximación a la solución. Un ejemplo de estas es la regla WRUP (*Weighted Resource Utilization and Precedence*) la cual pondera la suma del número de sucesores y el promedio del uso de recurso sobre todos los tipos de recurso, generalmente con coeficientes de 0,7 y 0,3 respectivamente.

La Tabla 3 muestra como está definida cada una de las reglas de prioridad de tal manera que estas puedan ser programadas en un algoritmo heurístico y realizar la secuenciación de las actividades. La tabla presenta las reglas de prioridad según el tipo de información que esta utiliza.

Tabla 3. Reglas de prioridad para enfoque de un solo proyecto

INFO.	REGLA DE PRIORIDAD	SIGLAS	DECISIÓN	VALOR DE PRIORIDAD p_j
Actividad	<i>Shortest Processing Time</i>	SPT	min	d_j
Actividad	<i>Longest Processing Time</i>	LPT	max	d_j
Actividad	<i>Random</i>	RND	max	Rand ()
Red	<i>Most Immediate Successors</i>	MIS	max	Abs (Suc _{ig})
Red	<i>Most Total Succesors</i>	MTS	max	Abs (Suc _j)
Red	<i>Greatest Rank Positional Weight</i>	GRPW	max	$d_j + \sum_{i \in \text{Suc}_j} d_i$
Ruta Crítica	<i>Earliest Starting Time</i>	EST	min	ES _j
Ruta	<i>Earliest</i>	EFT	min	EF _j

INFO.	REGLA DE PRIORIDAD	SIGLAS	DECISIÓN	VALOR DE PRIORIDAD p_j
Crítica	<i>Finishing Time</i>			
Ruta Crítica	<i>Latest Starting Time</i>	LST	min	LS_j
Ruta Crítica	<i>Latest Finishing Time</i>	LFT	min	LF_j
Ruta Crítica	<i>Minimum Slack Time</i>	MSL	min	$LS_j - ES_j$
Ruta Crítica	<i>Earliest Starting Time Dynamically</i>	ESTD	min	$ES_j(PS)^*$
Ruta Crítica	<i>Earliest Finishing Time Dynamically</i>	EFTD	min	$EF_j(PS)^*$
Ruta Crítica	<i>Minimum Slack Time Dynamically</i>	MSLD	min	$LS_j(PS)^* - ES_j(PS)^*$
Recursos	<i>Greatest Resource Demand</i>	GRD	max	$d_j \cdot \sum_{k=1}^k r_{j,k}$
Recursos	<i>Greatest Cumulative Resource Demand</i>	GCRD	max	$d_j \cdot \sum_{k=1}^k r_{j,k} + \sum_{i \in Suc_j} d_i \cdot \sum_{k=1}^k r_{i,k}$
Compuesta	<i>Weighted Resource Utilization and Precedence</i>	WRUP	max	$\omega \cdot Suc_j + (1 - \omega) \cdot \sum_{k=1}^k \frac{r_{j,k}}{R_k}$

*Nota: (PS) = Partial Schedule

Fuente: Salazar-García, (2009).

2.2.3. Métodos meta-heurísticos. Son métodos aproximados diseñados para resolver problemas de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Los metaheurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos, combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos. Entre los metaheurísticos más exitosos se encuentran el recocido simulado (*simulated annealing*), la búsqueda tabú (*tabu search*), los algoritmos genéticos (*genetic algorithms*), las redes neuronales artificiales (*artificial neural networks*), la optimización por colonias de hormigas (*ant colony optimization*), la búsqueda local iterativa (*iterated local search*) y la computación evolutiva (*evolutionary computing*).

Dentro de los trabajos con algoritmos genéticos se encuentran: Coelho y Tavares (2003), Gonçalves y Mendes (2003), Valls et al (2003), Hartmann (2002), Hindi et al (2002), Toklu (2002), Alcaraz y Moroto (2001), Cheng y Gen (1997) y Bartschi (1996). Los trabajos con búsqueda tabú son Artigues (2003), Nonobe y Ibaraki (2002) y Thomas y Salhi (1998); con recocido simulado se encuentra el trabajo de Valls et al (2004); Merkle et al (2002) han trabajado con colonia de hormigas; y el trabajo de Debels y Vanhoucke (2004) en electromagnetismo.

2.2.3.1 Algoritmos meméticos. En 1989, Moscato presentó el término Algoritmo Memético (AM) para describir la combinación de algoritmos genéticos (AGs) con métodos de optimización local. De esta manera, los AMs son considerados como una extensión de AGs que aplican procesos separados para refinar a los individuos.

Los AMs fueron inspirados por modelos de adaptación en sistemas naturales que combinan la adaptación biológica o genética de una población con el aprendizaje que los miembros de esta población pueden lograr durante su tiempo de vida. La elección del nombre de estos algoritmos se basa en el concepto de *meme* definido por Richard Dawkins.

Un *meme* se refiere a una unidad de evolución cultural que puede lograr refinamiento local en los individuos de una población dada (Dawkins, 1976). Una diferencia clave que existe entre genes y *memes* consiste en que antes de que un *meme* sea transmitido, este último es típicamente adaptado por el individuo que lo transmite con base en la forma en que este individuo piensa, entiende y procesa al *meme*. Sin embargo, los genes son transmitidos sin que el individuo actúe sobre ellos.

En el contexto de problemas de optimización, un *meme* representa una estrategia de aprendizaje u optimización local que puede ser empleada para mejorar a un individuo (Krasnogor et al, 2006). De esta forma, un modelo de adaptación memética logra aprovechar la plasticidad que poseen los individuos. Esto último es algo que un modelo genético no puede capturar.

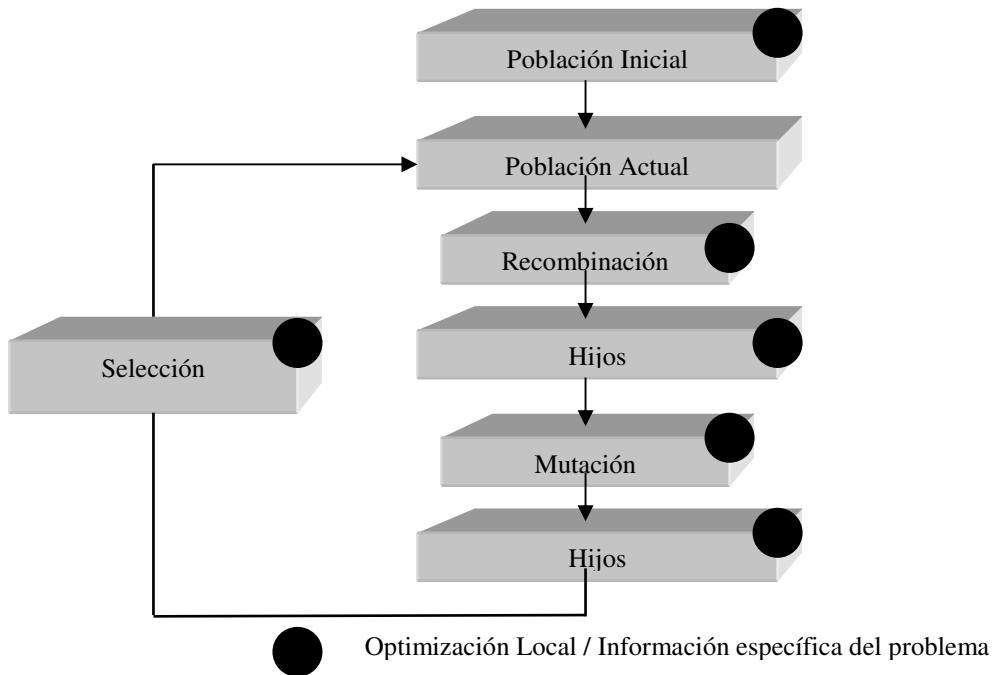
La integración de un AG con métodos de optimización local ha mostrado que permite acelerar el descubrimiento de buenas soluciones, o alcanzar soluciones que serían inalcanzables si sólo se aplicara evolución genética (Goldberg et al, 1999). Esto se debe a que el refinamiento local u optimización de los individuos permite que el AM desarrolle una exploración mucho más dirigida hacia las regiones del espacio de búsqueda que poseen las mejores soluciones. Desde un punto de vista de optimización, los AMs han mostrado ser más eficientes dado que requieren menos generaciones para encontrar un óptimo y más efectivos pues identifican soluciones de mayor calidad que los tradicionales AGs sobre varios dominios de aplicación (Merz et al, 1999).

Como se mencionó anteriormente, puede ser muy beneficioso combinar la búsqueda desarrollada por un AG con métodos que permitan refinar a cada solución de manera individual. Sin embargo, los beneficios logrados deben ser balanceados con el incremento en el nivel de complejidad del diseño del algoritmo. De esta manera, es necesario considerar con mucho cuidado cómo se desarrollará exactamente la integración mencionada.

En la Figura 4 se muestra la estructura genérica de un AM (Krasnogor et al, 2006). La figura mencionada permite identificar la estructura básica de un AG. En esta estructura, se han identificado y marcado con círculos los lugares donde la integración puede tomar lugar. Cada uno de los lugares marcados provee una oportunidad de integrar métodos de optimización. Por ejemplo, la población inicial podría contener soluciones provenientes de heurísticas diseñadas especialmente para el problema que se intenta resolver, y los operadores de recombinación y mutación podrían ser realzados con restricciones específicas del dominio.

Además, los métodos de optimización local podrían ser aplicados a uno o a todos los conjuntos intermedios de soluciones. Por ejemplo, podrían ser aplicados sobre el conjunto de soluciones obtenido luego de la recombinación, sobre el conjunto de soluciones obtenido luego de la mutación, o sobre ambos conjuntos. Sin embargo, la forma más aceptada de integración consiste en aplicar una o más fases de optimización local, basada sobre algún parámetro de probabilidad, a miembros individuales de la población en cada generación.

Figura 4. Estructura de un algoritmo memético



Fuente: Yannibelli (2007).

Es pertinente mencionar que un AM mantiene en todo momento una población de diversas soluciones al problema considerado. Se llamará **Agente** a cada una de las mismas. Esta denominación es una extensión del término Individuo tan comúnmente empleado en el contexto de los algoritmos evolutivos. Estos agentes se interrelacionan entre sí en un marco de competición y de cooperación, de manera muy semejante a lo que ocurre en la Naturaleza entre los individuos de una misma especie. Cuando se considera la población de agentes en su conjunto, esta interacción puede ser estructurada en una sucesión de grandes pasos temporales denominados *generaciones*.

3. PROBLEMA RCPSP DE MINIMIZACIÓN DEL COSTO TOTAL DE LAS ACTIVIDADES DEL PROYECTO

Con relación al estado del arte sobre el problema clásico RCPSP para minimizar el costo total de las actividades, como producto de la revisión bibliográfica adelantada hasta el momento, se pudo evidenciar que en la literatura existen escasos diseños de reglas heurísticas para la solución de estos, tales como los propuestos por Liu y Wang (2005 y 2006) y Liu y Zheng (2008).

3.1 EL MODELO MATEMÁTICO Y SUS CARACTERÍSTICAS

El problema RCPSP clásico puede ser enunciado como sigue (Liu et al, 2006): considérese un proyecto único el cual consiste de $j= 1,2,\dots, J$ actividades con duración no-interrumpida de d_j períodos, respectivamente. Debido a los requerimientos tecnológicos las relaciones de precedencia entre algunas de las actividades forzan que una actividad $j \in \{2,\dots,J\}$ no puede ser iniciada antes de que todos sus predecesores iniciales $i \in P_j$ (P_j es el conjunto de predecesores inmediatos de la actividad j) hayan terminado. La estructura del proyecto es una red donde los nodos representan las actividades y los arcos, las relaciones de precedencia. La red es acíclica y numéricamente etiquetada, y hay una actividad que siempre tiene una etiqueta superior que todas sus predecesores. Sin pérdida de generalización, se puede asumir que 1 es la única actividad de inicio y la actividad J es la única actividad de finalización. K -tipos de recursos renovables serán consumidos durante el proyecto. Se asume que el proyecto necesita r_{jk} unidades del recurso k para procesar la actividad j durante cada período de su duración. Y el costo fijo de la actividad j es v_j . F_j es el tiempo de finalización de la actividad j y que A_t es el conjunto de actividades que están en curso en el período t .

En el problema objeto de estudio, h es el costo por período de mantener actividades completadas enunciado como un porcentaje del costo fijo de la actividad, R_k es la capacidad del recurso k provisto y C_k el precio unitario. La fecha de vencimiento del proyecto es H . Dada H , se puede obtener el tiempo de finalización más temprano e_j y el tiempo de finalización más tardío l_j de la actividad j usando CPM. Los parámetros de tiempo en el problema son todos valores enteros. V_t es el costo de mantener las actividades completadas del proyecto durante el período t . Usamos variables de decisión binaria X_{jt} , $j = 1,\dots,J$; $t = e_j, \dots, l_j$. $X_{jt} = 1$ si la actividad j es completada al final del período t o 0 de lo contrario.

El modelo RCPSP con el objetivo de minimizar el costo de las actividades, se puede presentar de la siguiente manera:

$$\min Z = \sum_{t=1}^{F_j} V_t + \sum_{j=1}^J v_j \quad (86)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{t=e_i}^{l_i} t X_{it} \leq \sum [(t - d_j) X_{jt}], \quad (87)$$

$$\forall i \in P_j, j = 1, \dots, J$$

$$\sum_{t=e_j}^{l_j} X_{jt} = 1, j = 1, \dots, J \quad (88)$$

$$F_j = \sum_{t=e_j}^{l_j} t X_{jt} \leq H \quad (89)$$

$$\sum_{j \in A_t} r_{jk} \leq R_k, k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, F_j \quad (90)$$

$$v_j = v_j + \sum_{k=1}^K C_k r_{jk} d_j, j = 1, \dots, J \quad (91)$$

$$V_t = V_{t-1} + h \sum_{j=1}^J v_j X_{jt}, t = 1, \dots, F_j \quad (92)$$

$$X_{jt} \in \{0,1\}, j = 1, \dots, J \quad (93)$$

En la ecuación (86), el objetivo es minimizar Z , que es el costo total de las actividades del proyecto el cual incluye dos ítems. El primero es el costo de mantenimiento de las actividades completadas desde el tiempo de inicio del proyecto con su tiempo de finalización, i.e., el costo dinámico relacionado con las actividades en el proyecto. El segundo es el costo fijo de la cantidad de actividades.

Las restricciones, ecuación (87), aseguran que las relaciones de precedencia pueden ser cumplidas. La ecuación (88) indica que la actividad debe ser ejecutada dentro del intervalo (e_j, l_j) y la ecuación (89) significa que el tiempo de finalización del proyecto no puede estar después de la fecha de vencimiento. La ecuación (90) corresponde a las restricciones de recursos que garantizan que las disponibilidades por período de los recursos renovables no son violadas. La ecuación (91) da la composición del costo de las actividades el cual consta de dos partes, v_j es la parte que no está relacionada con la selección de Partners y la última es el costo de los recursos necesarios para completar la actividad j . Finalmente, la ecuación (92) ilustra cómo obtener el costo de mantenimiento de las actividades completadas a través del período t donde $V_0=0$.

3.1.1 Características del problema. Con el partner seleccionado, las capacidades y precios unitarios de los recursos son establecidos, así que v_j en la ecuación (91) puede ser vista como una constante. En consecuencia, el último ítem en el objetivo ecuación (86) es fijo, no importa cómo se programe el proyecto. Como resultado, el foco estará colocado en el costo dinámico de las actividades. De la ecuación (92), se puede obtener que hay un costo de mantenimiento para cada actividad desde el tiempo final de la actividad hasta el tiempo final del proyecto. Basado en esto, la función objetivo puede ser cambiada como sigue, donde solamente el costo dinámico es considerado.

$$\min Z' = h \sum_{j=1}^J v_j \left(\sum_{t=e_j}^{l_j} t X_{jt} - \sum_{t=e_j}^{l_j} t X_{jt} \right) \quad (94)$$

La función objetivo (94) es no regular de acuerdo a la definición propuesta por Sprecher (2005). En resumen, las soluciones factibles del problema son las mismas que las de los RCSPSs tradicionales con tiempo de duración objetivo de tal forma que este tipo de RCSPSs es también NP-duro. Para buscar las heurísticas, primero se considera el caso donde los recursos no tienen restricciones. De la función objetivo (94), entre más tarde es el tiempo de finalización de la actividad, menor es el costo de mantenimiento después de que ha finalizado. Esto resulta en un menor costo total de las actividades del proyecto. La mejor programación es que cada actividad empieza en su tiempo de inicio más tardío. Correspondientemente, cuando las restricciones de recursos son consideradas, se espera también que cada actividad sea completada tan tarde como sea posible con el presupuesto de que la capacidad de cada recurso no es violada.

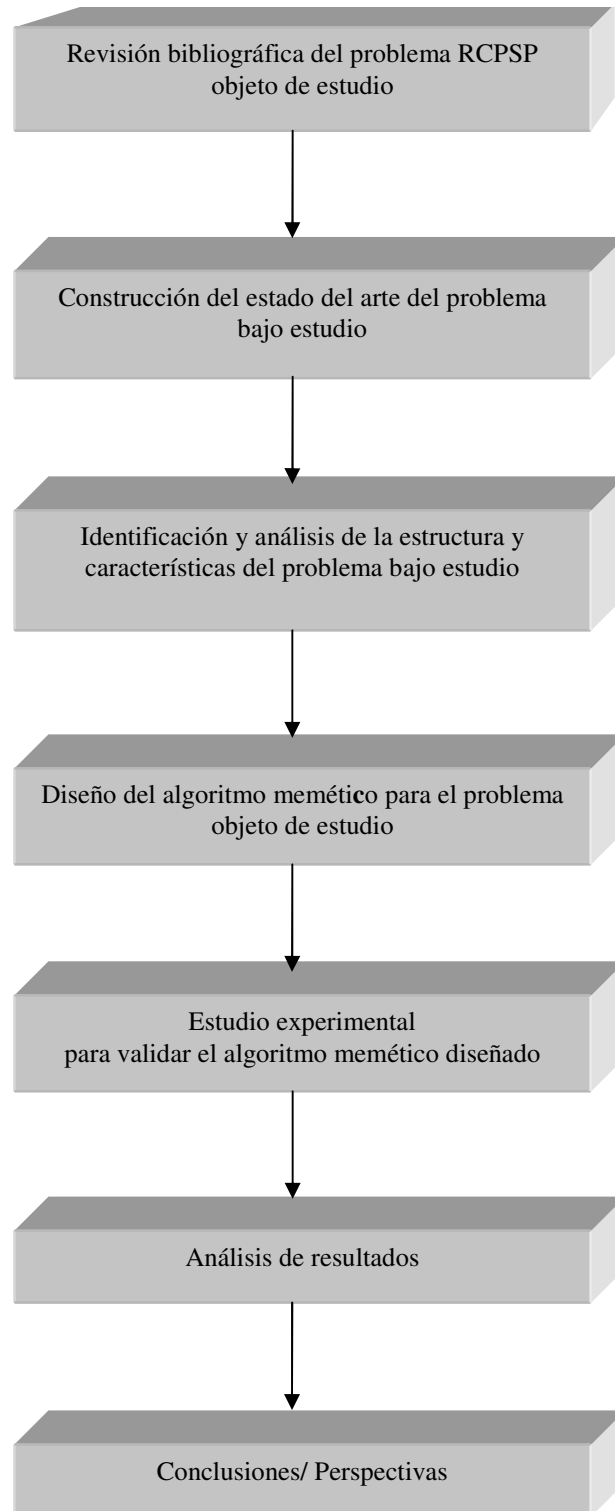
4. DISEÑO DEL ALGORITMO MEMÉTICO DE SOLUCIÓN

4.1 MARCO METODOLÓGICO

El desarrollo del trabajo de investigación se basó en el esquema metodológico que se indica en la Figura 5. Como se puede observar, el primer paso se fundamentó en la revisión bibliográfica del problema bajo estudio. Luego se construyó el estado del arte del problema RCPSA asociado a la minimización de la función objetivo de costo de las actividades. Posteriormente, con base en el estado del arte mencionado se realizó un análisis y una comparación detallados de su estructura, representación, notación y clasificación. Luego, se procedió a diseñar un algoritmo memético que permitiera darle solución al problema objeto de estudio para dar inicio a un estudio experimental.

El primer paso de este estudio experimental consistió en identificar las instancias clásicas disponibles en la literatura para el problema bajo estudio. Estas instancias se pueden encontrar en diferentes librerías de acceso libre en Internet (por ejemplo, PSP-LIB), las cuales fueron programadas con técnicas de solución propuestas o desarrolladas en contextos de aplicación del problema bajo estudio. Por último, se realizó un análisis de los resultados del cual se desprendieron las principales conclusiones del trabajo, así como las perspectivas que se tienen sobre el tema.

Figura 5. Esquema metodológico



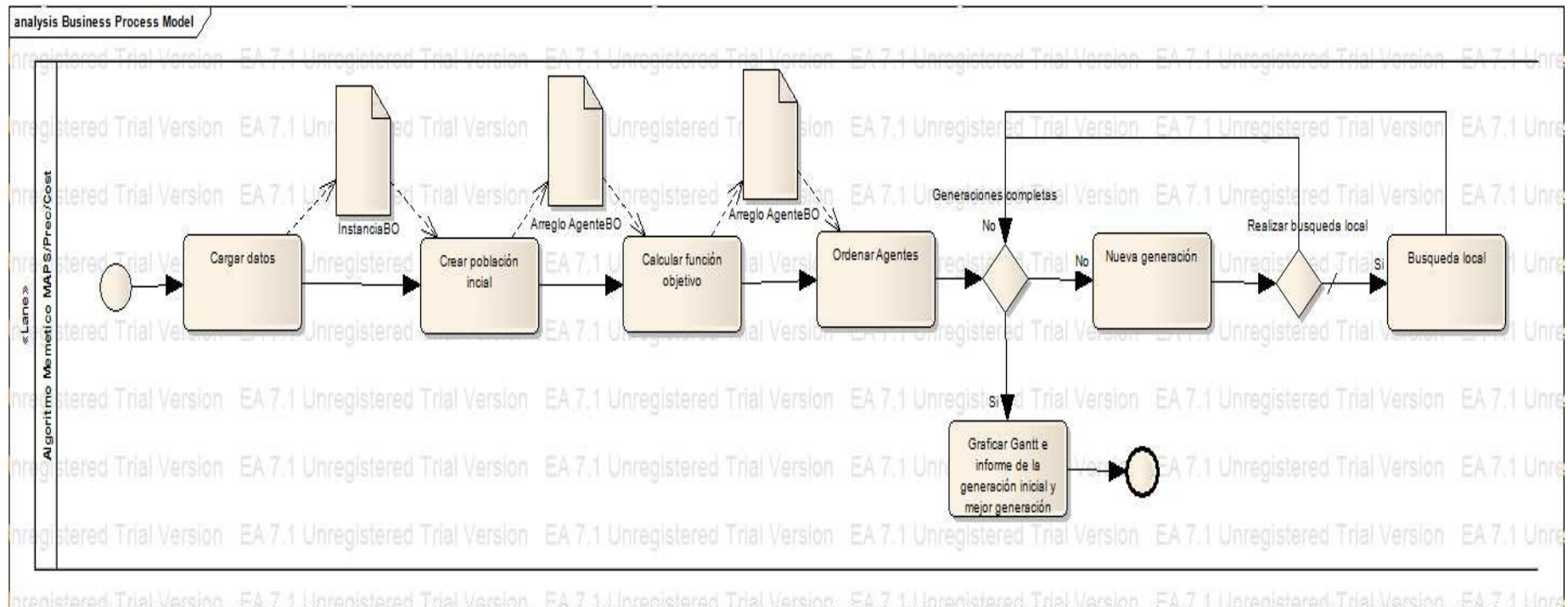
Fuente: presentación propia de la autora.

4.2 PROCEDIMIENTO DE PROGRAMACIÓN PROPUESTO

Este trabajo presenta un método de solución para el problema objeto de estudio basado en un algoritmo memético denominado *MAPS/Prec/Cost*, pues según la notación propuesta por Brucker et al. la versión estándar del problema RCPSP vendría representada como *PS/prec/Cmax*, donde PS indica programación de proyectos para distinguirlo de los problemas de máquinas o *job-shop*, prec indica que entre las actividades existen sólo relaciones de precedencia de tipo general y *Cmax* hace referencia a la función objetivo (minimizar la duración del proyecto).

Para el algoritmo *MAPS/Prec/Cost* la interpretación es la siguiente: el primer parámetro significa que es un algoritmo memético para programación de proyectos. El siguiente campo, igual que en la representación anterior, corresponde a las relaciones de precedencia y el tercero hace referencia a que el objetivo es minimizar el costo de las actividades del proyecto. La Figura 6 presenta el esquema del algoritmo citado.

Figura 6. Estructura del algoritmo *MAPS/Prec/Cost*



Fuente: presentación propia de la autora.

A continuación se describe la configuración del algoritmo *MAPS/Prec/Cost*:

4.1.1 Cargue de datos. Los datos fueron obtenidos de la librería PSPLIB (<http://129.187.106.231/psplib>) y luego se cargaron dentro del programa diseñado para el algoritmo memético. Es de anotar que para facilitar el manejo de dichos datos, las instancias seleccionadas que se encontraban en archivos planos fueron adaptadas a un formato en Excel.csv.

4.1.2 Generación de la población inicial. Los esquemas de generación de secuencias (SGS, por Schedule Generation Schemes) son una parte central en los procedimientos heurísticos de solución del RCPSP (Ballestín, 2002). Dichos esquemas, cuando construyen una solución, trabajan paulatinamente desde el principio de tal manera que van generando una secuencia parcial. Al final, cuando el conjunto de las actividades susceptibles de ser secuenciadas es vacío, el SGS ha generado una secuencia factible. Hay dos esquemas para la generación de secuencias, uno llamado Serial, enfocado en la generación por incremento de las actividades secuenciadas; otro llamado Paralelo, enfocado en la generación por incremento de tiempo.

El esquema Serial, empleado para la construcción del algoritmo *MAPS/Prec/Cost*, se compone de n fases (donde $n = \text{\#actividades}$), en las que paso a paso cada actividad del proyecto es seleccionada y secuenciada teniendo en cuenta las restricciones de precedencia y de disponibilidad de recursos. Este esquema trabaja a partir de dos conjuntos disjuntos de actividades, el conjunto de actividades ya secuenciadas y el conjunto de actividades posiblemente secuenciables en cada etapa (Kolisch y Hartmann, 1998). Este último conjunto, para el esquema Serial, se caracteriza porque en cada fase se renueva, posiblemente, con actividades que no hacían parte de éste en la fase anterior. En otras palabras, en cada fase el conjunto de actividades a ser secuenciadas se actualiza según si hay actividades que ya tienen todas su predecesoras secuenciadas.

El esquema Serial genera secuencias denominadas activas por el hecho que ninguna de las actividades de la secuencia puede comenzar más temprano sin retrasar alguna otra actividad.

De otra parte, el esquema Paralelo se funda en el incremento del tiempo para secuenciar las actividades. En cada iteración g hay un tiempo t_g asociado para secuenciar. Este esquema tiene adjuntos tres conjuntos disjuntos, un conjunto de las actividades ya secuenciadas, otro conjunto de las actividades que se están secuenciando en t_g y un último conjunto de las actividades con posibilidad de ser secuenciadas a partir de t_g , esto según las restricciones de precedencia y de disponibilidad de recursos. Este último conjunto, en el esquema Paralelo, a diferencia del esquema Serial, se actualiza en cada etapa g , pero no admite ninguna actividad nueva hasta que no se hayan secuenciado todas la actividades definidas en una instancia para ese conjunto. De tal forma que el conjunto de secuencias generado por el esquema Paralelo es un subconjunto del conjunto de secuencias generado por el esquema Serial.

El esquema Paralelo genera secuencias que se denominan sin-retraso debido a que cada actividad comienza lo más temprano posible luego que todas sus predecesoras han sido

secuenciadas, generando que ninguna actividad pueda comenzar más temprano sin retrasar el comienzo de alguna otra.

4.1.3 Representación de la solución. Como se explicará...en el Capítulo 5... el algoritmo *MAPS/Prec/Cost* fue programado en el lenguaje JAVA y modelado con las siguientes clases:

- Actividad, que contiene los siguientes atributos:
 - *idJob*: un número identificador.
 - *duration*: duración de cada actividad.
 - *idSucessors*: un arreglo de identificadores de actividades sucesoras.
 - *idPredecessors*: un arreglo de identificadores de actividades predecesoras.
 - *startTime*: tiempo de inicio de la actividad (unidades de tiempo).
 - *endingTime*: tiempo de finalización de la actividad (unidades de tiempo).
 - *resourcesConsum*: recursos consumidos por la actividad.

Para el cálculo de la solución, también se emplearon variables temporales tales como:

- *cost*: costo de la actividad.
 - *temporalStartTime* (tiempo de inicio temporal): se utiliza para calcular los cambios en el tiempo inicial, respetando las restricciones de precedencia y capacidad de recursos.
 - *temporalEndingTime* (tiempo de fin temporal): se emplea para calcular los cambios en el tiempo final, considerando restricciones de precedencia y capacidad de recursos.
- *Agente*, la cual está conformada por dos atributos:
 - Un arreglo que contiene la secuencia de las actividades.
 - *Costo*: el valor de la función objetivo (parámetro calculado).
 - *Instancia* que tiene:
 - *relDate*: tiempo en el cual se libera el proyecto, es decir, el tiempo mínimo de inicio del mismo.
 - *dueDate*: tiempo máximo de finalización del proyecto (entrega del proyecto).
 - *availableResources*: corresponde a un arreglo de disponibilidad de los diferentes recursos (capacidad).
 - *Activities*: arreglo de actividades asociado al Agente.
 - *timeCapacity*: matriz ficticia que va mostrando el consumo de recursos, según la posición (inicio y fin) de las actividades del Agente.

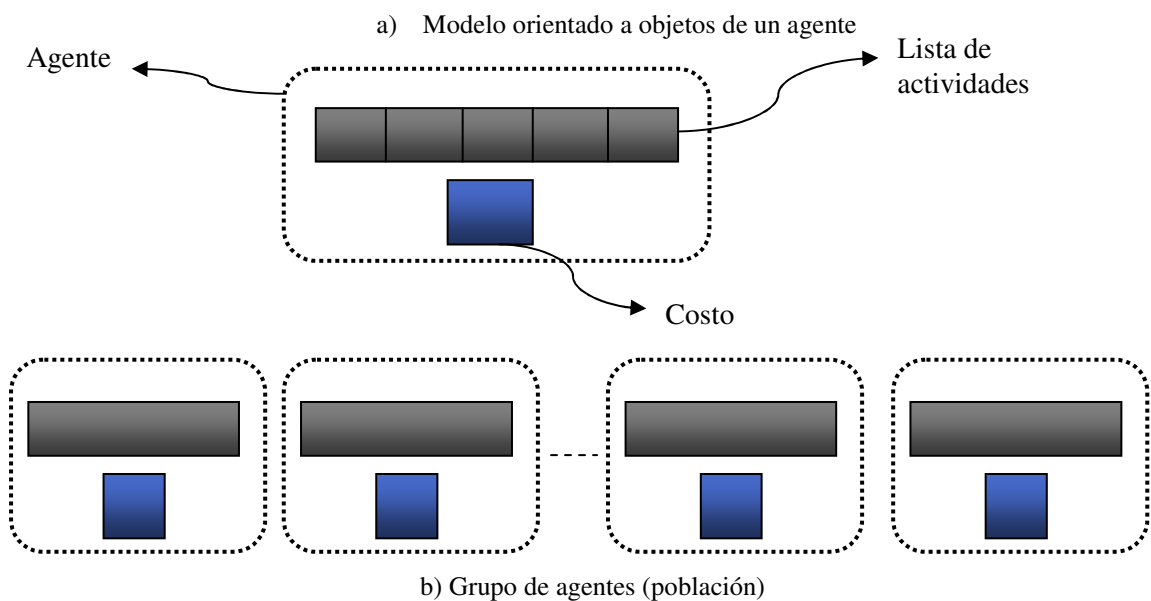
Los siguientes parámetros son definidos por el usuario:

- *initialPoblation*: conjunto de agentes asociados a la instancia.
- *probCruce*: probabilidad de cruce
- *probMutation*: probabilidad de mutación.
- *conMemetic*: es una condición de parada definida por el usuario, representa el número de veces que se realiza la búsqueda local.
- *numGenerations*: número de generaciones del algoritmo evolutivo.

- *porcDuedate*: este porcentaje incrementa la variable *Duedate* de la instancia para crear una población inicial factible que cumpla con las restricciones de precedencia y capacidad. Esto debido a que en las instancias implementadas el *Duedate* corresponde al mínimo de la función objetivo *Cmax* y para efectos del presente trabajo de investigación es la minimización del costo de mantener las actividades de un proyecto.
- Tipo de cruce por un punto, dos puntos o híbrido.
- Tipo de costo acumulado y por actividad.

La siguiente figura muestra la estructura de un cromosoma para un Agente, la cual se encuentra dentro de cada generación del algoritmo memético.

Figura 7. Estructura de un agente (cromosoma)



Fuente: Adaptado de Montoya-Torres et al. (2010).

La representación del cromosoma para el RCPSP objeto de estudio está basado en el concepto de Lista de actividades, la cual permite codificar la secuencia a través de un listado factible de precedencia de las actividades. Una Lista de actividades tiene la siguiente forma: $\lambda = (j_1, j_2, \dots, j_n)$.

Un SGS Serial puede ser óptimamente utilizado para decodificar una Lista de actividades y obtener una secuencia. Un SGS Paralelo también puede ser utilizado, aunque con menos eficiencia que el Serial, para decodificar una Lista de actividades, haciendo uso de un vector de prioridades⁵ a través de la fórmula $p_i = orden(i, \lambda)$, la cual

⁵ La representación a través de un vector de prioridades utiliza un arreglo de n números reales, entre 0 y 1, asignando un número r_j a cada actividad j , de la forma: $\rho = (r_1, r_2, \dots, r_n)$. Tanto el SGS Serial como el Paralelo se pueden utilizar para decodificar la secuencia codificada en ρ . En cada fase g , ya sea por el esquema Serial o por el Paralelo, se selecciona la actividad j con el mayor índice r_j dentro del conjunto de actividades candidatas a ser secuenciadas.

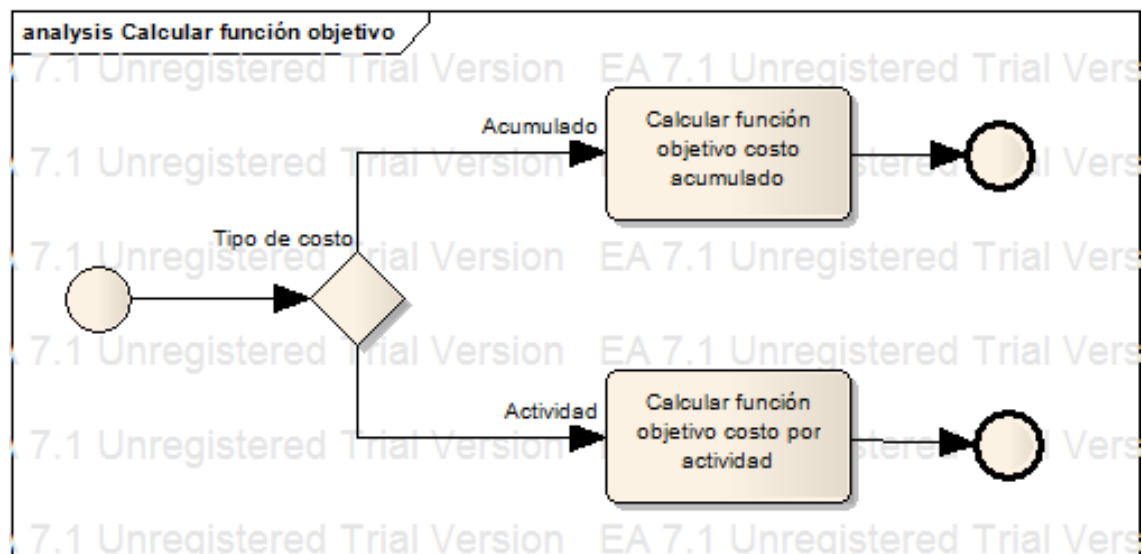
establece la posición i en la lista λ , de tal forma que en cada etapa se selecciona la actividad con menor p_i de dentro del conjunto de actividades no secuenciadas (Ballestín, 2002).

4.1.4 Tareas comunes. En este aparte se describen las labores que son comunes en los pasos que se siguen en el algoritmo *Maps/Prec/Cost*, los cuales se detallarán en las siguientes secciones:

- Calcular función objetivo: con relación a este aspecto es importante mencionar que la variable C_k del modelo matemático presentado ...en la sección 3.4...no fue considerada dentro del problema objeto de estudio dado que no se pueden comprar recursos. Adicionalmente, para la determinación de los costos y por ser un trabajo académico se asumió una relación directa entre esta variable y el tiempo. Para ello se consideró un factor de costo h_j que representa la contribución de la actividad j en el proyecto, el cual se calcula como la duración de la actividad sobre la suma de las duraciones de todas las actividades multiplicadas por 100.

$$h_j = [d_j / \sum_j d_j * 100] \quad (95)$$

Figura 8. Diagrama de flujo para el cálculo de la función objetivo



Fuente: presentación propia de la autora.

- Costo acumulado: sumatoria que tiene dos partes: costo acumulado de las actividades que ya terminaron más las que están siendo culminadas en esa unidad de tiempo.

$$\min Z = \sum_{t=1}^{F_j} V_t \quad (96)$$

$$V_t = V_{t-1} + \sum_{j=1}^J X_{jt} * h_j, t = 1, \dots, F_j \quad (97)$$

- Costo por actividad: se toma el tiempo de finalización de la última actividad del Agente. Se calcula la diferencia con los tiempos de terminación de cada una de las actividades anteriores y se multiplica esa diferencia (unidades de tiempo) por el factor de costo (h_j).

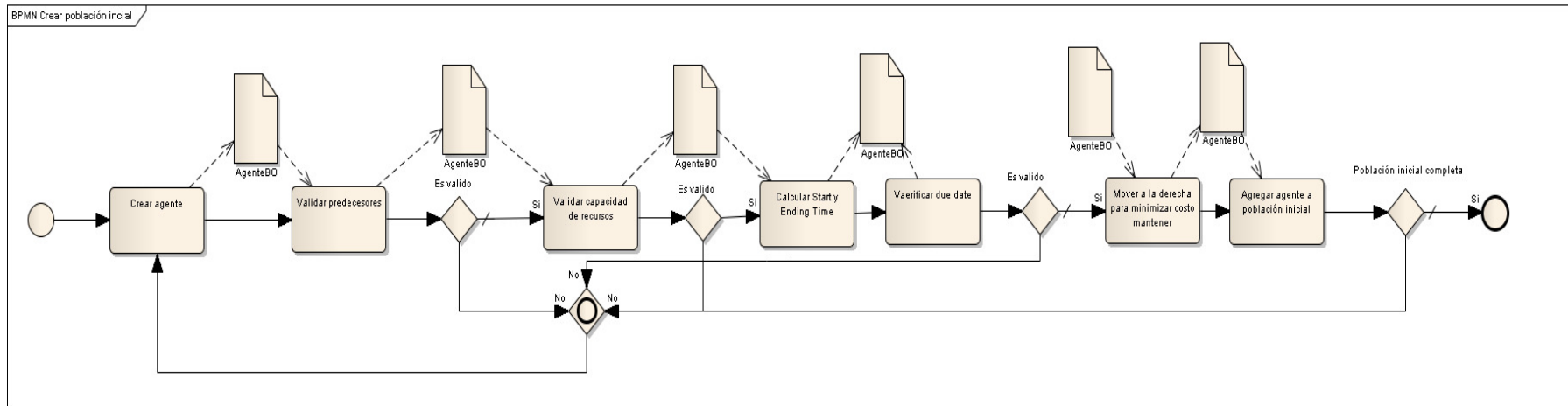
$$\min Z = \sum_{t=1}^{F_j} V_t \quad (98)$$

$$V_t = \left(\sum_{j=1}^{J-1} F_j - (X_{jt} * t) \right) * h_j, t = 1, \dots, F_j \quad (99)$$

- Ordenar agentes: para ello se empleó el algoritmo de ordenamiento *Quicksort*, el cual es más eficiente en tiempo computacional que el *Bubblesort*. Vale la pena señalar que dicho algoritmo se puede implementar en cualquier lenguaje de programación (<http://www.cs.ubc.ca/~harrison/Java/sorting-demo.html>).
- Validar predecesores: se verifica que en cada actividad se cumpla la restricción de precedencia.
- Validar capacidad de recursos: verificar el consumo de la actividad en su posición (inicio y fin) y corroborar que los recursos estén disponibles en el intervalo de tiempo en que esta se está ejecutando.
- Calcular *Start y Ending Time*: determinar el comienzo y fin de una actividad después de cambios en el orden de las actividades de un Agente.
- Verificar *Due date*: validar la restricción de tiempo límite para entregar el proyecto.
- Mover a la derecha para minimizar el costo de mantener: basados en el tiempo de finalización del último trabajo se busca mover las actividades predecesoras lo más posible a la derecha. Lo anterior, dado que la función objetivo bajo estudio es la minimización de los costos de mantener una actividad terminada hasta la finalización del proyecto. Adicionalmente, se tienen en cuenta las restricciones tanto de precedencia como de capacidad.

La Figura 9 muestra los pasos que se siguieron para crear la población inicial:

Figura 9. Diagrama de flujo para crear la población inicial

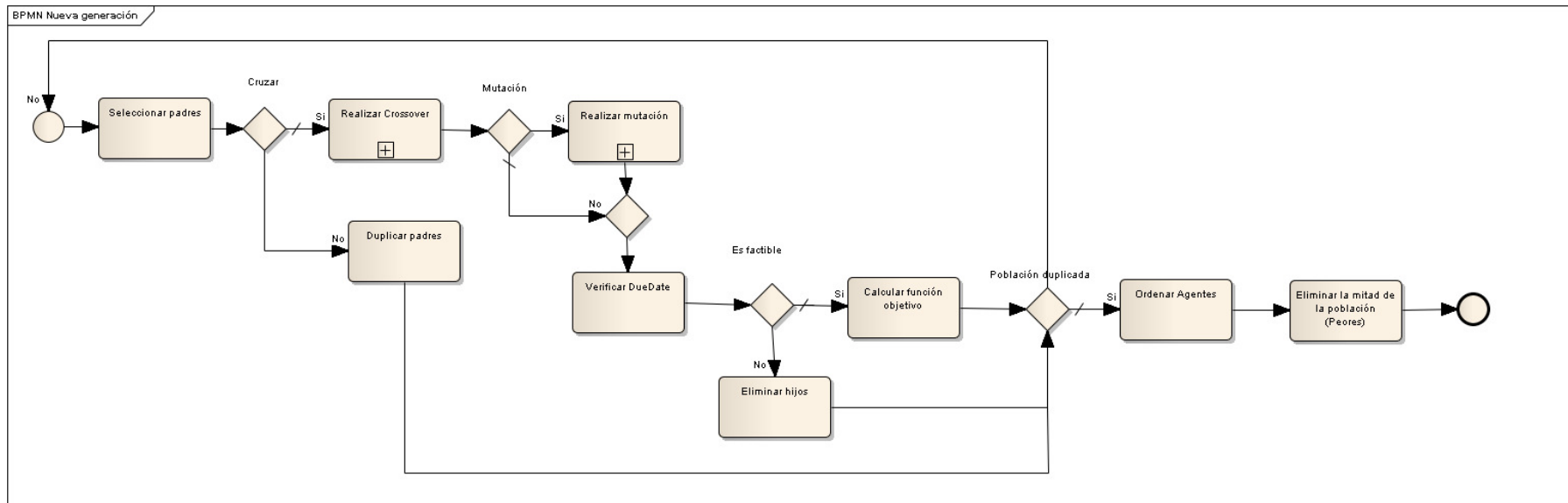


Fuente: presentación propia de la autora.

- Crear Agente: se empieza con la primera actividad pidiéndole sus sucesores y almacenándolos en un arreglo temporal. Posteriormente, de manera aleatoria se escoge uno de los sucesores verificando primero que todo que cumpla precedencia, si no es así, se pide otro aleatoriamente y así sucesivamente. El algoritmo termina cuando el arreglo temporal de sucesores queda vacío, es decir, cuando se han agregado todas las actividades de la instancia al Agente.
- Las labores relacionadas con *Validar precedencia*, *Validar capacidad de recursos*, *Calcular el Start y Ending time*, *Verificar Due date* y *Mover a la derecha para minimizar el costo de mantener* fueron descritas en el numeral 4.1.4.
- Agregar Agente a la población inicial: el agente que cumpla con todas las restricciones, se agrega a la población inicial definida (número de agentes) como parámetro de entrada por el usuario.
- Las tareas referentes a *Calcular función objetivo* y *Ordenar agentes* se explicaron en el numeral 4.1.4.

4.1.5 Nueva generación. En la Figura 10 se detalla el ciclo principal del algoritmo. En este ciclo se generan hijos hasta duplicar la población definida por el usuario con el método de Crossover o de cruzamiento.

Figura 10. Diagrama de flujo del ciclo principal del algoritmo *MAPS/Prec/Cost*



Fuente: presentación propia de la autora.

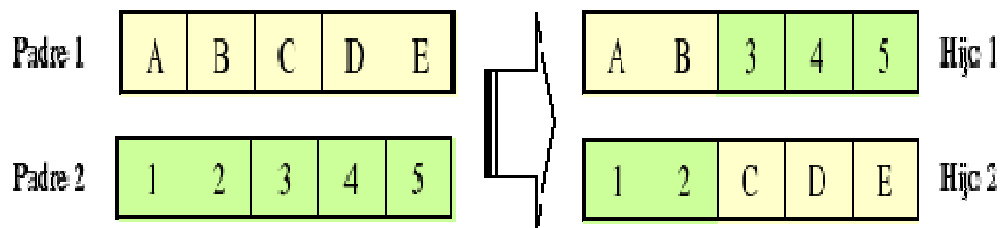
- Seleccionar padres: aleatoriamente se seleccionan dos agentes de la población. Si se cumple con la probabilidad de cruce, se aplican los operadores de Crossover, los cuales se explican más adelante. En caso contrario se duplican los padres quienes toman la forma de hijos.
- Operador de mutación: para la mutación, el algoritmo emplea un operador de mutación por intercambio (swap), el cual se explicará más adelante.
- Las labores relacionadas con *Verificar Due date*, *Calcular función objetivo* y *Ordenar agentes* fueron descritas en el numeral 4.1.4.
- Eliminar hijos: corresponde a que si no se satisface el *Due date* no es un Agente factible.
- Eliminar la población: consiste en tomar el 50% de la peor población (función objetivo) y eliminarla. Con esto se retorna al tamaño de la población inicial definida por el usuario.

A continuación, se explicarán en detalle los operadores de crossover y mutación:

4.1.6 Operadores de recombinación genética o crossover. Los operadores de crossover aplicados en el algoritmo corresponden a crossover por un punto, dos puntos e híbrido.

En el crossover por un punto, una vez seleccionados dos individuos se cortan sus cromosomas por un punto seleccionado aleatoriamente para generar dos segmentos diferenciados en cada uno de ellos: la cabeza y la cola. Se intercambian las colas entre los dos individuos para generar los nuevos descendientes. De esta manera ambos descendientes heredan información genética de los padres, tal y como puede verse en la Figura 11. En la bibliografía, suele referirse a este tipo de cruce con el nombre de SPX (*Single Point Crossover*).

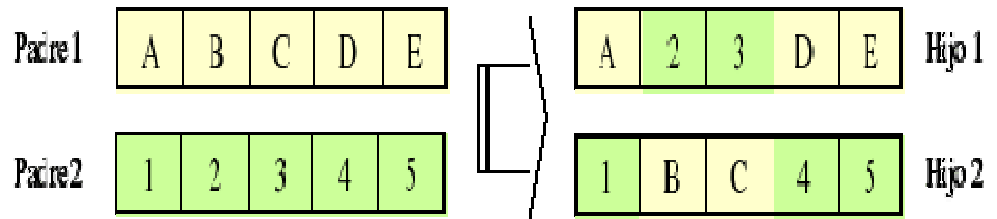
Figura 11. Crossover de un punto



Fuente: Gestal Pose, M. (2002).

El crossover de dos puntos se trata de una generalización del cruce de un punto. En vez de cortar por un único punto los cromosomas de los padres como en el caso anterior se realizan dos cortes. Deberá tenerse en cuenta que ninguno de estos puntos de corte coincida con el extremo de los cromosomas para garantizar que se originen tres segmentos. Para generar la descendencia se escoge el segmento central de uno de los padres y los segmentos laterales del otro padre (ver Figura12). Generalmente, este tipo de cruce se identifica con las siglas DPX (*Double Point Crossover*).

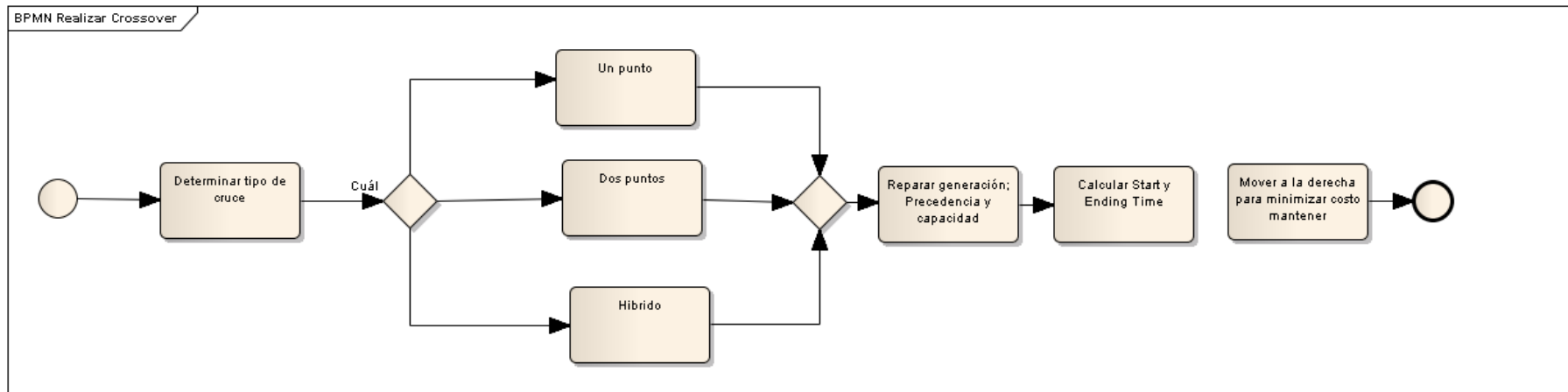
Figura 12. Crossover de dos puntos



Fuente: Gestal Pose, M. (2002).

En la Figura 13 se presenta el diagrama de flujo de los operadores de recombinación genética aplicados al algoritmo memético:

Figura 13. Diagrama de flujo operadores de crossover



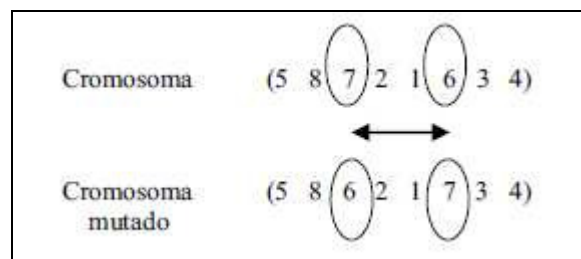
Fuente: presentación propia de la autora.

- Determinar tipo de cruce: seleccionar el parámetro de entrada por el usuario.
- Crossover por un punto: se selecciona para ambos padres, un punto aleatorio (el mismo) entre el rango de las actividades que conforman la instancia. Se toman las actividades anteriores a ese punto de corte del padre 1.
- Crossover dos puntos: ídem.
- Híbrido: con una probabilidad del 50% se hace cruce por un punto o por dos puntos para cada par de agentes seleccionados.
- Reparar generación, precedencia y capacidad: tarea que se encarga de reparar los nuevos agentes creados a partir de los agentes padres haciéndolos cumplir las restricciones de precedencia y capacidad. Es de anotar que al cruzar las actividades con estos operadores el agente puede contener repetidas y ausentes, razón por la cual el algoritmo busca el primer repetido y lo reemplaza por el primer ausente.
- Las tareas referentes a *Calcular Start time y Ending time y Mover a la derecha para minimizar el costo de mantener* se explicaron en el numeral 4.1.4.

4.1.7 Operador de mutación. El proceso de mutación genética se encarga de introducir diversidad genética en una población de cromosomas. Este operador genético modifica, de manera aleatoria, alguna de las características genéticas de ciertos cromosomas obtenidos mediante el proceso de recombinación. De esta manera, el proceso de mutación es capaz de generar nuevos cromosomas con alguna característica diferente a las poseídas por los cromosomas predecesores (Mitchell, 1997).

La técnica de mutación aplicada en el algoritmo *MAPS/Prec/Cost* fue la de intercambio, la cual consiste en intercambiar dos genes completos de un cromosoma, los genes a intercambiar son elegidos de manera totalmente aleatoria. Dicha técnica también es conocida como Operador de Eliminación-Reinserción.

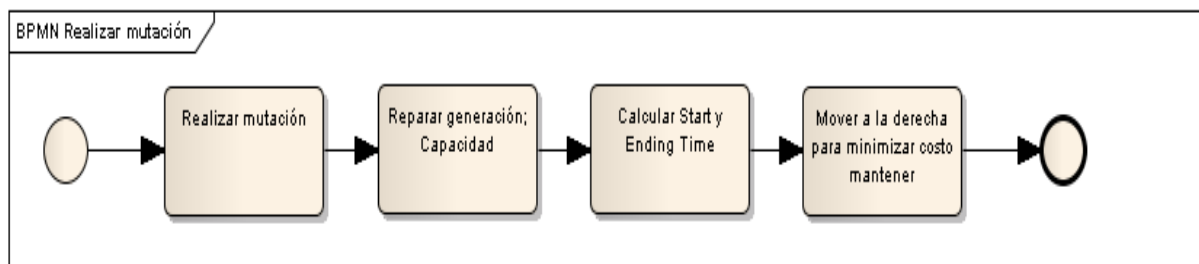
Figura 14. Operador de mutación



Fuente: Yannibelli (2007).

- Realizar mutación: se seleccionan las actividades que tengan dos o más sucesoras directas, se escogen dos de ellas aleatoriamente y se hace un intercambio entre las dos.
- Reparar generación: para garantizar precedencia y capacidad de recursos.
- Las labores relacionadas con *Calcular Start time y Ending time y Mover a la derecha para minimizar el costo de mantener* fueron descritas en el numeral 4.1.4.

Figura 15. Diagrama de flujo operador de mutación



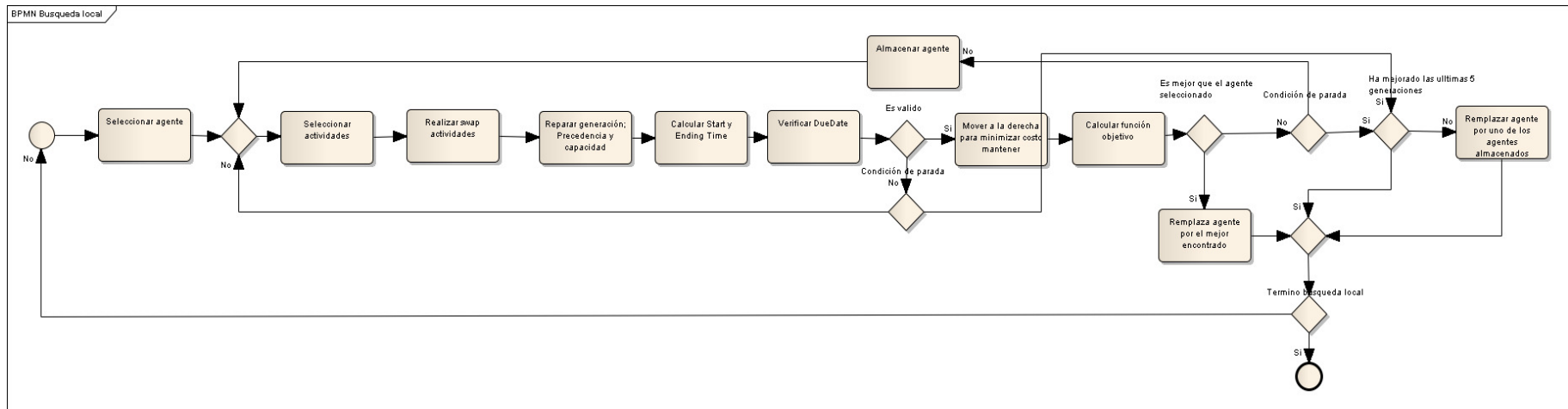
Fuente: presentación propia de la autora.

4.1.8 Búsqueda Local. En la Figura 16 se indican los pasos adelantados para realizar la Búsqueda Local, los cuales se explican enseguida:

- Seleccionar agente: de la generación se selecciona un agente aleatoriamente.
- Seleccionar actividades: se seleccionan dos actividades de ese agente aleatoriamente y se hace un intercambio entre las dos.
- Reparar generación, precedencia y capacidad: tarea que se encarga de reparar los nuevos agentes creados a partir de los agentes padres haciéndolos cumplir las restricciones de precedencia y capacidad. Es de anotar que al cruzar las actividades con estos operadores el agente puede contener repetidas y ausentes, razón por la cual el algoritmo busca el primer repetido y lo reemplaza por el primer ausente.
- Las tareas referentes a *Calcular Start time y Ending time*, *Verificar Due date*, y *Mover a la derecha para minimizar el costo de mantener* y *Calcular función objetivo* se explicaron en el numeral 4.1.4.
- Reemplazar agente por el mejor encontrado: si hay mejoras con esos cambios, reemplaza el agente original por el mejor encontrado y si no:
- Almacena temporalmente los agentes que no fueron mejores al agente inicial.
- Reemplazar agente por uno de los agentes almacenados de manera aleatoria.

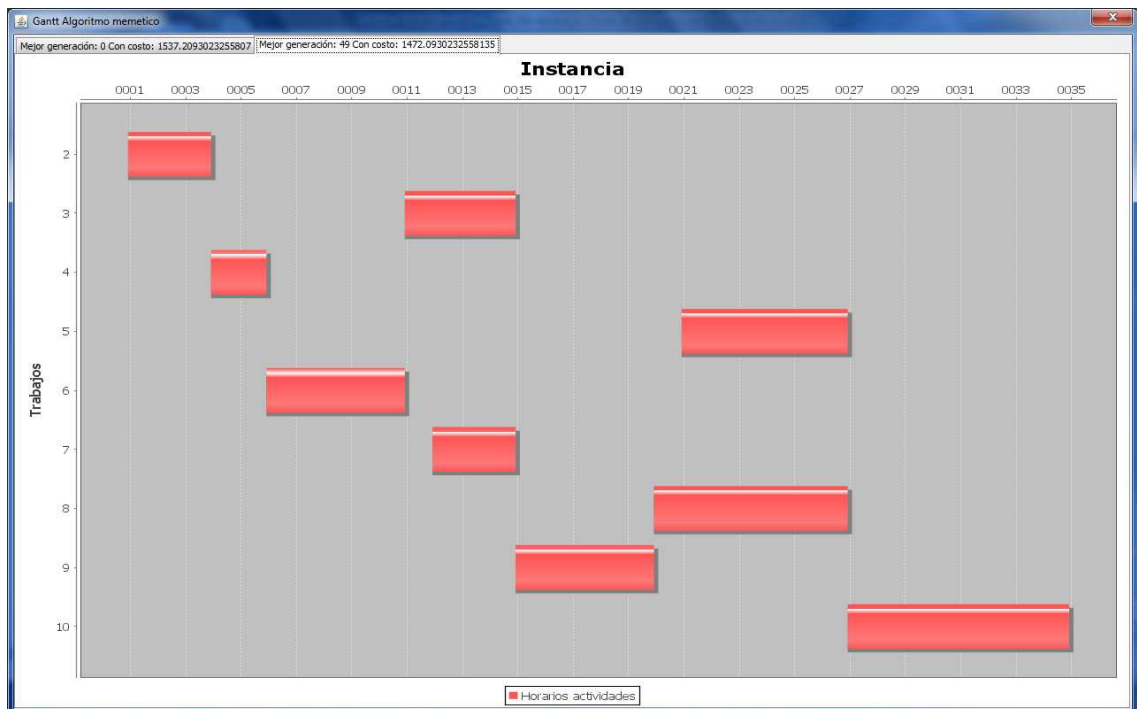
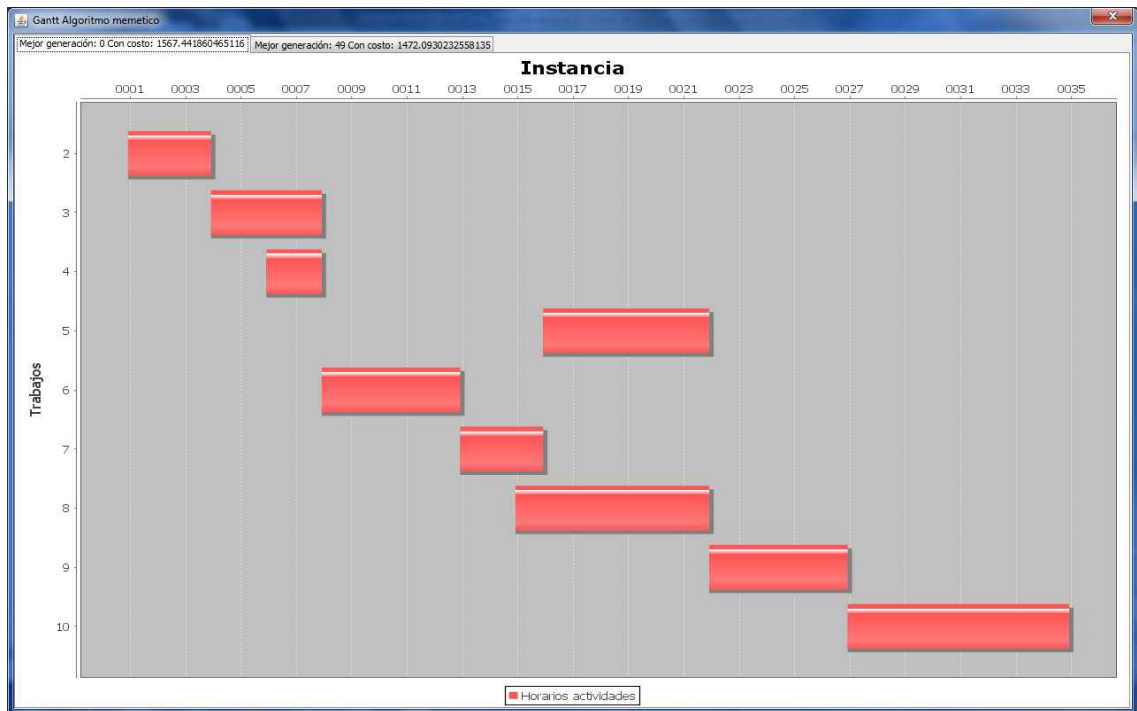
4.1.9 Obtención de resultados. Una vez se completa el número de generaciones el algoritmo memético grafica el diagrama de Gantt, así como el informe de la generación inicial y de la mejor (Véase figuras 17 y 18).

Figura 16. Diagrama de flujo Búsqueda Local



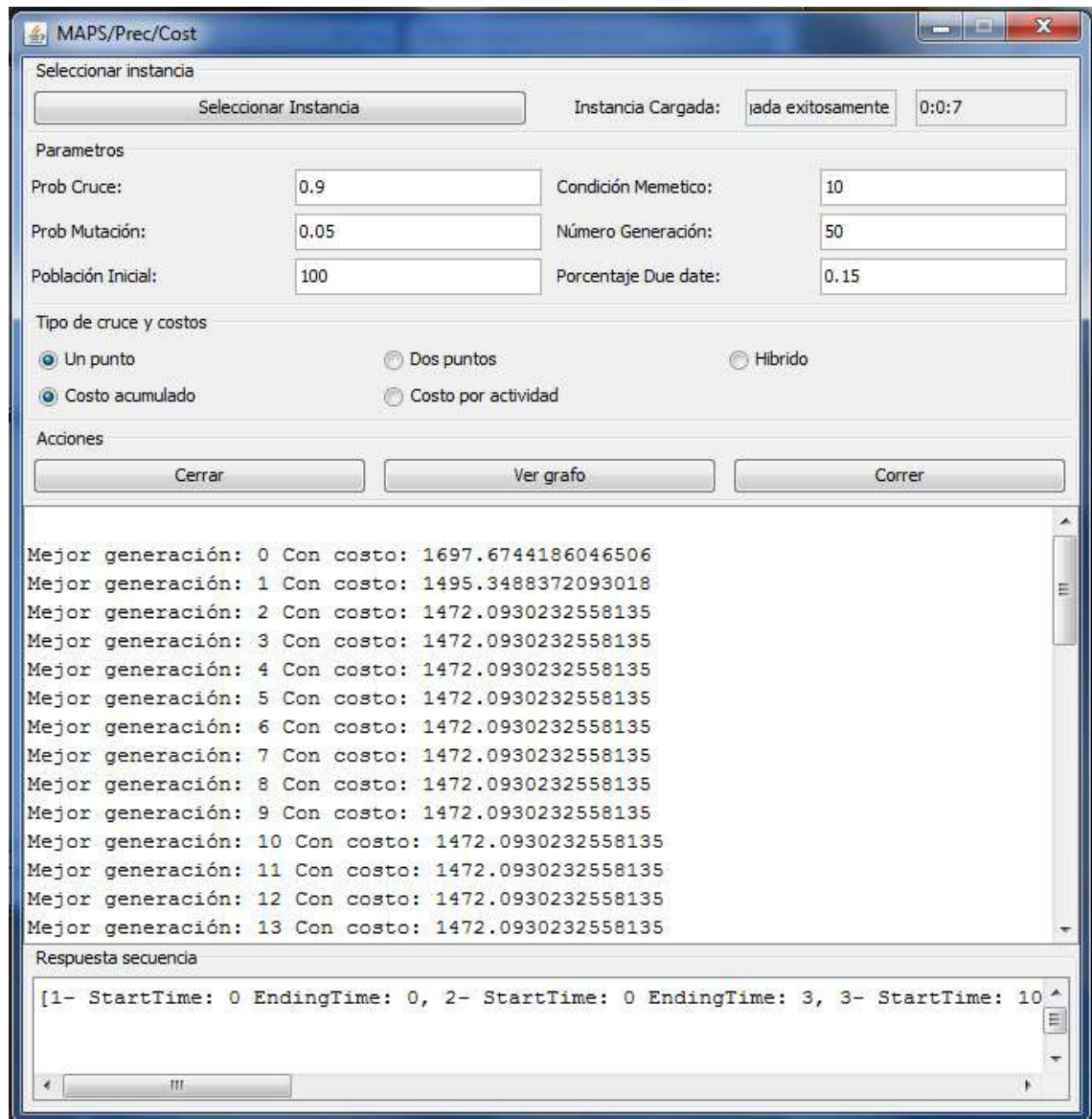
Fuente: presentación propia de la autora.

Figura 17. Diagrama de Gantt de las generaciones inicial y de la mejor



Fuente: presentación propia de la autora.

Figura 18. Informe de la mejor generación



Fuente: presentación propia de la autora.

5. PRUEBAS COMPUTACIONALES

5.1 CONTEXTO DE LAS INSTANCIAS

El algoritmo memético *MAPS/Prec/Cost* fue programado usando JAVA⁶. Para los experimentos fueron tomadas las instancias del Project Scheduling Problem Library disponibles en la página de Internet (PSPLIB: <http://129.187.106.231/psplib>). Esta es una librería de instancias generales ampliamente usadas para probar algoritmos para el RCPSP.

Para efectos del diseño experimental, la librería fue actualizada para incluir los costos de las actividades de acuerdo con la estructura propuesta por Liu y Wang (2005), en la cual son dados el costo estático de cada actividad y las fechas de terminación de cada proyecto. Se consideraron todos los conjuntos de instancias en la librería. Los conjuntos J30, J60 y J90 corresponden a 480 instancias con 30, 60 y 90 actividades, respectivamente. El conjunto J120 contiene 600 instancias con 120 actividades por proyecto. Esto da un total de 2040 instancias del problema. Para correr el algoritmo, se definieron las condiciones presentadas en la Tabla 4. El número de generaciones se estableció que fuera 100 para todos los experimentos. Adicionalmente, a la combinación de factores presentados en la Tabla 4, se efectuaron experimentos con 50 y 200 generaciones.

Tabla 4. Factores y niveles para los experimentos

Factores	Niveles
Datos librería PSPLIB	J30, J60, J90, J120
Tamaño de la población	100, 150
Probabilidad de cruce	0.9; 0.75; 0.7; 0.5
Probabilidad de mutación	0.05; 0.2; 0.1; 0.3
Estrategia de crossover	Un punto, dos puntos, híbrido
Criterio de terminación	10, 20
Número de generaciones	100

El análisis fue llevado a cabo solamente sobre el comportamiento del algoritmo memético propuesto. En el Anexo 1 se pueden observar los datos por cada una de las instancias. Durante la ejecución, el algoritmo mostró convergencia. Se puede observar que se tiene una buena mejora entre la primera y la última solución. Para algunas instancias, el algoritmo encontró una buena solución desde la primera iteración.

Como se explicó previamente, el problema bajo estudio ha sido considerado muy poco en la literatura. Solamente los trabajos de Liu y Wang (2005) y Liu y Zheng (2008) lo han considerado proponiendo algoritmos genéticos para el caso de proyectos simples y múltiples, respectivamente. El trabajo de Liu y Zheng (2008) no propone un estudio

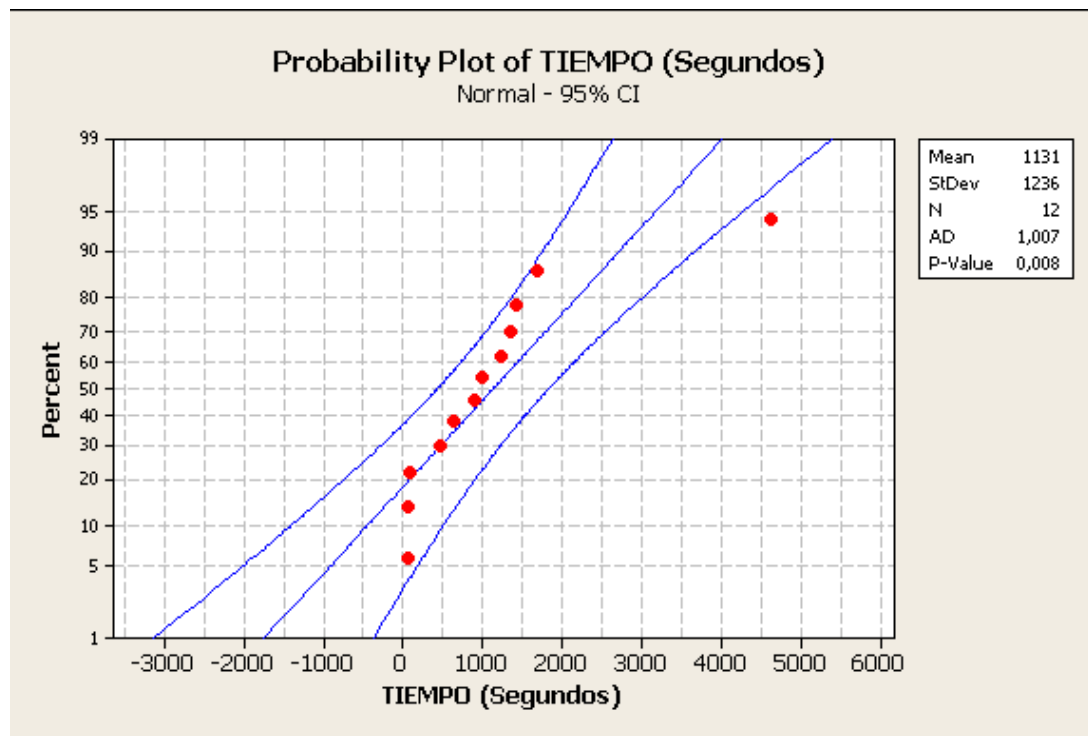
⁶ Es pertinente mencionar que las pruebas se realizaron en un procesador Intel® Core™ 2 Duo de 1.60 GHz, con 2.50 GB de RAM.

experimental extendido y en consecuencia no es posible comparar el AM propuesto con el de ellos. El trabajo de Liu y Wang (2005) lleva a cabo un experimento computacional para un solo proyecto. Por lo tanto, tampoco fue posible comparar el procedimiento propuesto con aquellos de la literatura por medio de un estudio experimental riguroso.

En consecuencia y dado que el presente trabajo de investigación muestra los resultados para un experimento computacional extendido utilizando instancias estándar disponibles en Internet en la PSPLIB, se espera que dichos resultados se conviertan en un referente para otros investigadores con el propósito de mejorar los resultados del algoritmo *MAPS/Prec/Cost*

En lo que concierne al tiempo de ejecución, la Figura 19 presenta un diagrama del tiempo de procesamiento para cada instancia del experimento. En la figura, se puede observar que el tiempo de solución es altamente variable dependiendo del tamaño de la instancia. El tiempo promedio es 1.131 s, con un intervalo de confianza del 95% de (431.7, 1830.3) s, y un coeficiente de variabilidad de 109.2%. Estos valores claramente confirman la alta variabilidad del tiempo computacional.

Figura 19. Diagrama para el tiempo de ejecución



Por último, es pertinente mencionar que los resultados del presente trabajo de investigación fueron puestos a consideración para ser publicados en la Revista Dyna de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Medellín. El artículo fue recibido el 17 de enero de 2012, aceptado el 8 de mayo y, posteriormente, publicado en la edición No. 174 de agosto del mismo año. Véase el Anexo 2.

5.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL ALGORITMO

5.2.1 Análisis para la probabilidad de cruce y mutación para las instancias evaluadas. Para comparar el desempeño del algoritmo con respecto a los valores de los parámetros, se realizó el análisis de varianza para los diferentes tipos de medias para las tres variables tiempo, probabilidad de cruce y mutación de cada una de las instancias evaluadas. Para ello, se aplicó la técnica de la ANOVA⁷, la cual permite comparar las muestras del estudio:

J30100-100

Tabla 5. Datos instancia J30100-100

Instancia	X1 (Tiempo)	x1^2	x2 (Prob. Cruce)	x2^2	x3 (Prob.Mutación)	x3^2
J30100-100	69	4761	0,9	0,81	0,05	0,0025
	72	5184	0,9	0,81	0,05	0,0025
	70	4900	0,9	0,81	0,05	0,0025
	99	9801	0,9	0,81	0,05	0,0025
	105	11025	0,9	0,81	0,05	0,0025
	102	10404	0,9	0,81	0,05	0,0025
	73	5329	0,75	0,5625	0,2	0,04
	72	5184	0,75	0,5625	0,2	0,04
	74	5476	0,75	0,5625	0,2	0,04
	110	12100	0,75	0,5625	0,2	0,04
	113	12769	0,75	0,5625	0,2	0,04
	121	14641	0,75	0,5625	0,2	0,04
	69	4761	0,7	0,49	0,1	0,01
	68	4624	0,7	0,49	0,1	0,01
	69	4761	0,7	0,49	0,1	0,01
	99	9801	0,7	0,49	0,1	0,01
	102	10404	0,7	0,49	0,1	0,01
	99	9801	0,7	0,49	0,1	0,01
	70	4900	0,5	0,25	0,3	0,09
	69	4761	0,5	0,25	0,3	0,09
	68	4624	0,5	0,25	0,3	0,09
	99	9801	0,5	0,25	0,3	0,09
	100	10000	0,5	0,25	0,3	0,09
	99	9801	0,5	0,25	0,3	0,09
TC	2.091		17,1		3,9	
nc	24		24		24	

Para comparar las medias de esta población se utilizó la distribución de Fisher y se plantean las siguientes hipótesis con un nivel de confianza del 95%:

$$H_o = \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a = \mu_1 \neq \mu_2$$

Se calculará la suma de cuadrados totales con la siguiente fórmula:

⁷ Técnica estadística que me permite analizar las varianzas de dos poblaciones, mediante el planteamiento de una prueba de hipótesis para contrastar la hipótesis nula de que las medias poblacionales sean distintas o iguales. Para efectos del análisis realizado, se utilizó el estadístico de prueba de la distribución de Fisher, teniendo en cuenta 2 grados de libertad en el numerador y 69 en el denominador.

$$SST = \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right] - \frac{(\sum x)^2}{N}, \text{ reemplazando los valores se tiene:}$$

$$SST = \frac{4.460.544}{24} - \frac{35.958.220.879,84}{72} = -499.233.878,44$$

Se calculará la suma de cuadrados del error con la siguiente fórmula:

$$SSE = \sum X^2 - \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right], \text{ reemplazando los valores se obtiene:}$$

$$SSE = 35.958.220.878,84 - 185.856 = 35.957.849.167,84$$

En la siguiente tabla se muestran los datos calculados:

Tabla 6. Análisis de la varianza instancia J30100-100

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio
Entre Tratamientos	SST = - 499.233.878,44	K-1 3-1=2	$MSTR = \frac{SST}{K-1}$ $\frac{-499.233.878,44}{2} = -249.616.939,22$
En los Tratamientos	SSE =35.957.849.167,84	N-K 72-3=69	$MSE = \frac{SSE}{N-K}$ $\frac{35.957.849.167,84}{69} = 521.128.248,81$
Total			$F = \frac{MSTR}{MSE} = \frac{-249.616.939,22}{521.128.248,81} = -0,4789933$ $F = -0,4789933$

De acuerdo con el valor calculado la distribución de Fisher de la tabla anterior, se obtuvo $F = -0,4789933$, con 2 grados de libertad en el numerador y 69 grados de libertad en el denominador y con un nivel de significancia del 95% y consultando el valor del estadístico de prueba de Fisher en la tabla con los mismos grados de libertad para el numerador y denominador respectivamente, se encuentra que $F = 4,95$. Por lo anterior, se concluye que dado que el valor $(-0,4789933)$ calculado es menor que el valor crítico e igual a 4,95, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula contra la alternativa, por lo cual las medias poblacionales de las diferentes muestras para la sentencia J30100-100, sobre la probabilidad de cruce y de mutación son iguales.

J30150-100

Tabla 7. Datos instancia J30150-100

Instancia	X1 (Tiempo)	x1^2	x2 (Prob. Cruce)	x2^2	x3 (Prob.Mutación)	x3^2
J30150-100	102	10404	0,9	0,81	0,05	0,0025
	102	10404	0,9	0,81	0,05	0,0025
	100	10000	0,9	0,81	0,05	0,0025
	147	21609	0,9	0,81	0,05	0,0025
	150	22500	0,9	0,81	0,05	0,0025
	155	24025	0,9	0,81	0,05	0,0025
	107	11449	0,75	0,5625	0,2	0,04
	108	11664	0,75	0,5625	0,2	0,04
	117	13689	0,75	0,5625	0,2	0,04
	179	32041	0,75	0,5625	0,2	0,04
	188	35344	0,75	0,5625	0,2	0,04
	174	30276	0,75	0,5625	0,2	0,04
	103	10609	0,7	0,49	0,1	0,01
	102	10404	0,7	0,49	0,1	0,01
	99	9801	0,7	0,49	0,1	0,01
	152	23104	0,7	0,49	0,1	0,01
	149	22201	0,7	0,49	0,1	0,01
	153	23409	0,7	0,49	0,1	0,01
	106	11236	0,5	0,25	0,3	0,09
	111	12321	0,5	0,25	0,3	0,09
	103	10609	0,5	0,25	0,3	0,09
	153	23409	0,5	0,25	0,3	0,09
	164	26896	0,5	0,25	0,3	0,09
	174	30276	0,5	0,25	0,3	0,09
TC	3.198		17,1		3,9	
nc	24		24		24	

Para comparar las medias de esta población se utilizó la distribución de Fisher y se plantean las siguientes hipótesis con un nivel de confianza del 95%:

$$H_o = \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a = \mu_1 \neq \mu_2$$

Se calculará la suma de cuadrados totales con la siguiente fórmula:

$$SST = \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right] - \frac{(\sum x)^2}{N}, \text{ reemplazando los valores se tiene:}$$

$$SST = \frac{10.361.961}{24} - \frac{200.429.496.803,86}{72} = -2.783.311.262,79$$

Se calculará la suma de cuadrados del error con la siguiente fórmula:

$$SSE = \sum X^2 - \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right], \text{ reemplazando los valores se obtiene:}$$

$$SSE = 200.429.496.803,49 - 41.748 = 200.429.065.055,49$$

En la siguiente tabla se muestran los datos calculados:

Tabla 8. Análisis de la varianza instancia J30150-100

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio
Entre Tratamientos	SST = - 2.783.311.262,79	K-1 3-1=2	$MSTR = \frac{SST}{K - 1}$ $\frac{- 2.783.311.262,79}{2} = -1.391.655.631,39$
En los Tratamientos	SSE =200.429.065.055, 49	N-K 72-3=69	$MSE = \frac{SSE}{N - K}$ $\frac{200.429.065.055,49}{69} = 2.904.769.058,78$
Total			$F = \frac{MSTR}{MSE} = \frac{-1.391.655.631,39}{2.904.769.058,78} = -0,479$ $F = -0,479093382$

De acuerdo con el valor calculado la distribución de Fisher de la tabla anterior, se obtuvo $F = -0,479093382$, con 2 grados de libertad en el numerador y 69 grados de libertad en el denominador y con un nivel de significancia del 95% y consultando el valor del estadístico de prueba de Fisher en la tabla con los mismos grados de libertad para el numerador y denominador, respectivamente, se encuentra que $F = 4,95$. Por lo tanto, se concluye que dado que el valor $(-0,479093382)$ calculado es menor que el valor crítico e igual a 4,95, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula contra la alternativa, por lo cual las medias poblacionales de las diferentes muestras para la sentencia J30150-100, sobre la probabilidad de cruce y de mutación son iguales.

J30200-50

Tabla 9. Datos instancia J30200-50

Instancia	X1 (Tiempo)	x1^2	x2 (Prob. Cruce)	x2^2	x3 (Prob.Mutación)	x3^2
J30200-50	69	4761	0,9	0,81	0,05	0,0025
	69	4761	0,9	0,81	0,05	0,0025
	70	4900	0,9	0,81	0,05	0,0025
	102	10404	0,9	0,81	0,05	0,0025
	98	9604	0,9	0,81	0,05	0,0025
	99	9801	0,9	0,81	0,05	0,0025
	83	6889	0,75	0,5625	0,2	0,04
	81	6561	0,75	0,5625	0,2	0,04
	81	6561	0,75	0,5625	0,2	0,04
	122	14884	0,75	0,5625	0,2	0,04
	121	14641	0,75	0,5625	0,2	0,04
	118	13924	0,75	0,5625	0,2	0,04
	67	4489	0,7	0,49	0,1	0,01
	67	4489	0,7	0,49	0,1	0,01
	68	4624	0,7	0,49	0,1	0,01
	99	9801	0,7	0,49	0,1	0,01
	99	9801	0,7	0,49	0,1	0,01
	100	10000	0,7	0,49	0,1	0,01
	69	4761	0,5	0,25	0,3	0,09
	69	4761	0,5	0,25	0,3	0,09
	69	4761	0,5	0,25	0,3	0,09
	100	10000	0,5	0,25	0,3	0,09
	107	11449	0,5	0,25	0,3	0,09
	108	11664	0,5	0,25	0,3	0,09
TC	2.135		17,1		3,9	
nc	24		24		24	

Para comparar las medias de esta población se utilizó la distribución de Fisher y se plantean las siguientes hipótesis con un nivel de confianza del 95%:

$$H_o = \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a = \mu_1 \neq \mu_2$$

Se calculará la suma de cuadrados totales con la fórmula:

$$SST = \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right] - \frac{(\sum x)^2}{N}, \text{ reemplazando los valores se tiene:}$$

$$SST = \frac{4.648.336}{24} - \frac{39.324.686.618,52}{72} = -545.982.522,37$$

Se calculará la suma de cuadrados del error con la siguiente fórmula:

$$SSE = \sum X^2 - \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right], \text{ reemplazando los valores se obtiene:}$$

$$SSE = 39.324.686.618,52 - 193.681 = 39.324.299.257,19$$

En la siguiente tabla se muestran los datos debidamente calculados:

Tabla 10. Análisis de la varianza instancia J30200-50

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio
Entre Tratamientos	SST = -545.982.522,37	K-1 3-1=2	$MSTR = \frac{SST}{K - 1}$ $\frac{-545.982.522,37}{2} = -272.991.161,18$
En los Tratamientos	SSE =39.324.299.257,19	N-K 72-3=69	$MSE = \frac{SSE}{N - K}$ $\frac{39.324.299.257,19}{69} = 569.917.380,54$
Total			$F = \frac{MSTR}{MSE} = \frac{-272.991.161,18}{569.917.380,54} = -0,4790$ $F = -0,479001467$

De acuerdo con el valor calculado la distribución de Fisher de la tabla anterior, se obtuvo $F = -0,479001467$, con 2 grados de libertad en el numerador y 69 grados de libertad en el denominador y con un nivel de significancia del 95% y consultando el valor del estadístico de prueba de Fisher en la tabla con los mismos grados de libertad para el numerador y denominador respectivamente, se encuentra que $F = 4,95$. Por consiguiente, se concluye que dado que el valor ($-0,479001467$) calculado es menor que el valor crítico e igual a 4,95, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula contra la alternativa, por lo cual las medias poblacionales de las diferentes muestras para la sentencia J30200-50, sobre la probabilidad de cruce y de mutación son iguales.

J60100-100

Tabla 11. Datos instancia J60100-100

Instancia	X1 (Tiempo)	x1^2	x2 (Prob. Cruce)	x2^2	x3 (Prob.Mutación)	x3^2
J60100-100	553	305.809	0,9	0,81	0,05	0,0025
	552	304.704	0,9	0,81	0,05	0,0025
	458	209.764	0,9	0,81	0,05	0,0025
	751	564.001	0,9	0,81	0,05	0,0025
	752	565.504	0,9	0,81	0,05	0,0025
	767	588.289	0,9	0,81	0,05	0,0025
	638	407.044	0,75	0,5625	0,2	0,04
	690	476.100	0,75	0,5625	0,2	0,04
	657	431.649	0,75	0,5625	0,2	0,04
	794	630.436	0,75	0,5625	0,2	0,04
	672	451.584	0,75	0,5625	0,2	0,04
	740	547.600	0,75	0,5625	0,2	0,04
	494	244.036	0,7	0,49	0,1	0,01
	564	318.096	0,7	0,49	0,1	0,01
	556	309.136	0,7	0,49	0,1	0,01
	754	568.516	0,7	0,49	0,1	0,01
	813	660.969	0,7	0,49	0,1	0,01
	824	678.976	0,7	0,49	0,1	0,01
	728	529.984	0,5	0,25	0,3	0,09
	458	209.764	0,5	0,25	0,3	0,09
	663	439.569	0,5	0,25	0,3	0,09
	1.016	1.032.256	0,5	0,25	0,3	0,09
	970	940.900	0,5	0,25	0,3	0,09
	1.040	1.081.600	0,5	0,25	0,3	0,09
TC	16.904		17,1		3,9	
nc	24		24		24	

Para comparar las medias de esta población se utilizó la distribución de Fisher y se plantean las siguientes hipótesis con un nivel de confianza del 95%:

$$H_o = \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a = \mu_1 \neq \mu_2$$

Se calculará la suma de cuadrados totales con la fórmula:

$$SST = \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right] - \frac{(\sum x)^2}{N}, \text{ reemplazando los valores se tiene:}$$

$$SST = \frac{286.455.625}{24} - \frac{156.157.501.943.478}{72} = -2.168.842.258.008,38$$

Se calculará la suma de cuadrados del error con la siguiente fórmula:

$$SSE = \sum X^2 - \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right], \text{ reemplazando los valores se obtiene:}$$

$$SSE = 156.157.501.943.478 - 11.935.651 = 156.157.490.007.827$$

En la siguiente tabla se muestran los datos calculados:

Tabla 12. Análisis de la varianza instancia J60100-100

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio
Entre Tratamientos	SST = - 2.168.842.258.008,38	K-1 3-1=2	$MSTR = \frac{SST}{K - 1}$ $= \frac{-2.168.842.258.008,38}{2} =$ $-1.084.421.129.004,19$
En los Tratamientos	SSE =156.157.490.007.827	N-K 72-3=69	$MSE = \frac{SSE}{N - K}$ $= \frac{156.157.490.007.827}{69} =$ $2.263.152.029.098,95$
Total			$F = \frac{MSTR}{MSE} = \frac{-1.084.421.129.004,19}{2.263.152.029.098,95} =$ $-0,479164066, \text{ entonces}$ $F = -0,479164066$

De acuerdo con el valor calculado la distribución de Fisher de la tabla anterior, se obtuvo $F = -0,479194066$, con 2 grados de libertad en el numerador y 69 grados de libertad en el denominador y con un nivel de significancia del 95% y consultando el valor del estadístico de prueba de Fisher en la tabla con los mismos grados de libertad para el numerador y denominador respectivamente, se encuentra que $F = 4,95$. Así las cosas, se concluye que dado que el valor $(-0,479164066)$ calculado es menor que el valor crítico e igual a 4,95, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula contra la alternativa, por lo cual las medias poblacionales de las diferentes muestras para la sentencia J60100-100, sobre la probabilidad de cruce y de mutación son iguales.

J60150-100

Tabla 13. Datos instancia J60150-100

Instancia	X1 (Tiempo)	x1^2	x2 (Prob. Cruce)	x2^2	x3 (Prob.Mutación)	x3^2
J60150-100	1.011	1.022.121	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.011	1.022.121	0,9	0,81	0,05	0,0025
	849	720.801	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.259	1.585.081	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.330	1.768.900	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.134	1.285.956	0,9	0,81	0,05	0,0025
	881	776.161	0,75	0,5625	0,2	0,04
	881	776.161	0,75	0,5625	0,2	0,04
	740	547.600	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.333	1.776.889	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.317	1.734.489	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.335	1.782.225	0,75	0,5625	0,2	0,04
	812	659.344	0,7	0,49	0,1	0,01
	936	876.096	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.072	1.149.184	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.067	1.138.489	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.287	1.656.369	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.249	1.560.001	0,7	0,49	0,1	0,01
	827	683.929	0,5	0,25	0,3	0,09
	1.000	1.000.000	0,5	0,25	0,3	0,09
858	736.164	0,5	0,25	0,3	0,09	
1.352	1.827.904	0,5	0,25	0,3	0,09	
1.277	1.630.729	0,5	0,25	0,3	0,09	
1.334	1.779.556	0,5	0,25	0,3	0,09	
TC	26.152		17,1		3,9	
nc	24		24		24	

Para comparar las medias de esta población se utilizó la distribución de Fisher y se plantean las siguientes hipótesis con un nivel de confianza del 95%:

$$H_o = \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a = \mu_1 \neq \mu_2$$

Se calculará la suma de cuadrados totales con la siguiente fórmula:

$$SST = \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right] - \frac{(\sum x)^2}{N}, \text{ reemplazando los valores se tiene:}$$

$$SST = \frac{685.025.924}{24} - \frac{870.030.742.082.149}{72} = -12.083.731.763.949,50$$

Se calculará la suma de cuadrados del error con la siguiente fórmula:

$$SSE = \sum X^2 - \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right], \text{ reemplazando los valores se obtiene:}$$

$$SSE = 870.030.742.082.149 - 28.542.747, \text{ entonces}$$

$$SSE = 870.030.713.539.402$$

En la siguiente tabla se muestran los datos calculados:

Tabla 14. Análisis de la varianza instancia J60150-100

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio
Entre Tratamientos	SST = - 12.083.731.763.949,50	K-1 3-1=2	$MSTR = \frac{SST}{K - 1}$ $\frac{-12.083.731.763.949,50}{2} =$ $-6.041.865.881.974,74$
En los Tratamientos	SSE =870.030.713.539.402	N-K 72-3=69	$MSE = \frac{SSE}{N - K}$ $\frac{870.030.713.539.402}{69} =$ $12.609.140.775.933,40$
Total			$F = \frac{MSTR}{MSE} = \frac{-6.041.865.881.974,74}{12.609.140.775.933,40} =$ $-0,4791656, \text{ entonces,}$ $F = -0,4791656$

De acuerdo con el valor calculado la distribución de Fisher de la tabla anterior, se obtuvo $F = -0,4791655506$, con 2 grados de libertad en el numerador y 69 grados de libertad en el denominador y con un nivel de significancia del 95% y consultando el valor del estadístico de prueba de Fisher en la tabla con los mismos grados de libertad para el numerador y denominador respectivamente, se encuentra que $F = 4,95$. Por lo anterior, se concluye que dado que el valor $(-0,4791655506)$ calculado es menor que el valor crítico e igual a 4,95, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula contra la alternativa, por lo cual las medias poblacionales de las diferentes muestras para la sentencia J60150-100, sobre la probabilidad de cruce y de mutación son iguales.

J60200-50

Tabla 15. Datos instancia J60200-50

Instancia	X1 (Tiempo)	x1^2	x2 (Prob. Cruce)	x2^2	x3 (Prob.Mutación)	x3^2
J60200-50	801	641.601	0,9	0,81	0,05	0,0025
	854	729.316	0,9	0,81	0,05	0,0025
	730	532.900	0,9	0,81	0,05	0,0025
	983	966.289	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.125	1.265.625	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.109	1.229.881	0,9	0,81	0,05	0,0025
	889	790.321	0,75	0,5625	0,2	0,04
	884	781.456	0,75	0,5625	0,2	0,04
	911	829.921	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.129	1.274.641	0,75	0,5625	0,2	0,04
	884	781.456	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.039	1.079.521	0,75	0,5625	0,2	0,04
	723	522.729	0,7	0,49	0,1	0,01
	715	511.225	0,7	0,49	0,1	0,01
	751	564.001	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.100	1.210.000	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.043	1.087.849	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.041	1.083.681	0,7	0,49	0,1	0,01
	817	667.489	0,5	0,25	0,3	0,09
	823	677.329	0,5	0,25	0,3	0,09
	638	407.044	0,5	0,25	0,3	0,09
	1.011	1.022.121	0,5	0,25	0,3	0,09
	861	741.321	0,5	0,25	0,3	0,09
	1.150	1.322.500	0,5	0,25	0,3	0,09
TC	22.011		17,1		3,9	
nc	24		24		24	

Para comparar las medias de esta población se utilizó la distribución de Fisher y se plantean las siguientes hipótesis con un nivel de confianza del 95%:

$$H_o = \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a = \mu_1 \neq \mu_2$$

Se calculará la suma de cuadrados totales con la siguiente fórmula:

$$SST = \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right] - \frac{(\sum x)^2}{N}, \text{ reemplazando los valores se tiene:}$$

$$SST = \frac{485.409.024}{24} - \frac{429.327.953.216.344}{72} = -5.962.868.013.739,89$$

Se calculará la suma de cuadrados del error con la siguiente fórmula:

$$SSE = \sum X^2 - \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right], \text{ reemplazando los valores se obtiene:}$$

$$SSE = 429.327.953.216.344 - 20.225.376 = 429.327.932.990.968$$

En la siguiente tabla se muestran los datos calculados:

Tabla 16. Análisis de la varianza instancia J60200-50

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio
Entre Tratamientos	SST = - 5.962.868.013.739,89	K-1 3-1=2	$MSTR = \frac{SST}{K - 1}$ $= \frac{-5.962.868.013.739,89}{2} =$ $-2.981.434.006.869,95$
En los Tratamientos	SSE =429.327.932.990.968	N-K 72-3=69	$MSE = \frac{SSE}{N - K}$ $= \frac{429.327.932.990.968}{69} =$ $6.222.143.956.390,84$
Total			$F = \frac{MSTR}{MSE} = \frac{-5.962.868.013.739,89}{6.222.143.932.990.968} =$ $-0,958330128, \text{ entonces,}$ $F = -0,958330128$

De acuerdo con el valor calculado la distribución de Fisher de la tabla anterior, se obtuvo $F = -0,958330128$, con 2 grados de libertad en el numerador y 69 grados de libertad en el denominador y con un nivel de significancia del 95% y consultando el valor del estadístico de prueba de Fisher en la tabla con los mismos grados de libertad para el numerador y denominador respectivamente, encontramos que $F = 4,95$. Por lo tanto, se concluye que dado que el valor ($-0,958330128$) calculado es menor que el valor crítico e igual a 4,95, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula contra la alternativa, por lo cual las medias poblacionales de las diferentes muestras para la sentencia J60200-50, sobre la probabilidad de cruce y de mutación son iguales.

J90100-100

Tabla 17. Datos instancia J90100-100

Instancia	X1 (Tiempo)	x1^2	x2 (Prob. Cruce)	x2^2	x3 (Prob.Mutación)	x3^2
J90100-100	1.124	1.263.376	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.110	1.232.100	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.033	1.067.089	0,9	0,81	0,05	0,0025
	2.203	4.853.209	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.856	3.444.736	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.923	3.697.929	0,9	0,81	0,05	0,0025
	992	984.064	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.040	1.081.600	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.003	1.006.009	0,75	0,5625	0,2	0,04
	2.078	4.318.084	0,75	0,5625	0,2	0,04
	2.422	5.866.084	0,75	0,5625	0,2	0,04
	2.064	4.260.096	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.084	1.175.056	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.130	1.276.900	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.155	1.334.025	0,7	0,49	0,1	0,01
	2.079	4.322.241	0,7	0,49	0,1	0,01
	2.078	4.318.084	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.821	3.316.041	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.048	1.098.304	0,5	0,25	0,3	0,09
	1.113	1.238.769	0,5	0,25	0,3	0,09
	1.174	1.378.276	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.088	4.359.744	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.037	4.149.369	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.059	4.239.481	0,5	0,25	0,3	0,09
TC	37.714		17,1		3,9	
nc	24		24		24	

Para comparar las medias de esta población se utilizó la distribución de Fisher y se plantean las siguientes hipótesis con un nivel de confianza del 95%:

$$H_o = \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a = \mu_1 \neq \mu_2$$

Se calculará la suma de cuadrados totales con la siguiente fórmula:

$$SST = \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right] - \frac{(\sum x)^2}{N}, \text{ reemplazando los valores se tiene:}$$

$$SST = \frac{1.423.930.225}{24} - \frac{4.261.567.119.898.560}{72} = -59.188.372.890.387,30$$

Se calculará la suma de cuadrados del error con la siguiente fórmula:

$$SSE = \sum X^2 - \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right], \text{ reemplazando los valores se obtiene:}$$

$$SSE = 4.261.567.119.898.560 - 59.330.426 = 4.261.567.060.568.130$$

En la siguiente tabla se muestran los datos debidamente calculados:

Tabla 18. Análisis de la varianza instancia J90100-100

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio
Entre Tratamientos	SST = - 59.188.372.890.387,30	K-1 3-1=2	$MSTR = \frac{SST}{K - 1}$ $= \frac{-59.188.372.890.387,30}{2} =$ $-29.594.186.445.193,60$
En los Tratamientos	SSE =4.261.567.060.568.130	N-K 72-3=69	$MSE = \frac{SSE}{N - K}$ $= \frac{4.261.567.060.568.130}{69} =$ $61.761.841.457.509,20$
Total			$F = \frac{MSTR}{MSE} = \frac{-29.594.186.445.193,60}{61.761.841.457.509,20} =$ $-0,479166193, \text{ entonces,}$ $F = -0,479166193$

De acuerdo con el valor calculado la distribución de Fisher de la tabla anterior, se obtuvo $F = -0,479166193$, con 2 grados de libertad en el numerador y 69 grados de libertad en el denominador y con un nivel de significancia del 95% y consultando el valor del estadístico de prueba de Fisher en la tabla con los mismos grados de libertad para el numerador y denominador respectivamente, se encuentra que $F = 4,95$. Por consiguiente, se concluye que dado que el valor $(-0,479166193)$ calculado es menor que el valor crítico e igual a 4,95, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula contra la alternativa, por lo cual las medias poblacionales de las diferentes muestras para la sentencia J90100-100, sobre la probabilidad de cruce y de mutación son iguales.

J90150-100

Tabla 19. Datos instancia J90150-100

Instancia	X1 (Tiempo)	x1^2	x2 (Prob. Cruce)	x2^2	x3 (Prob.Mutación)	x3^2
J90150-100	1.859	3.455.881	0,9	0,81	0,05	0,0025
	2.155	4.644.025	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.733	3.003.289	0,9	0,81	0,05	0,0025
	3.199	10.233.601	0,9	0,81	0,05	0,0025
	2.530	6.400.900	0,9	0,81	0,05	0,0025
	3.030	9.180.900	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.723	2.968.729	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.679	2.819.041	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.679	2.819.041	0,75	0,5625	0,2	0,04
	3.224	10.394.176	0,75	0,5625	0,2	0,04
	3.248	10.549.504	0,75	0,5625	0,2	0,04
	2.994	8.964.036	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.731	2.996.361	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.435	2.059.225	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.637	2.679.769	0,7	0,49	0,1	0,01
	3.039	9.235.521	0,7	0,49	0,1	0,01
	3.022	9.132.484	0,7	0,49	0,1	0,01
	3.272	10.705.984	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.897	3.598.609	0,5	0,25	0,3	0,09
	1.855	3.441.025	0,5	0,25	0,3	0,09
	1.639	2.686.321	0,5	0,25	0,3	0,09
	3.005	9.030.025	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.768	7.661.824	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.894	8.375.236	0,5	0,25	0,3	0,09
TC	57.247		17,1		3,9	
nc	24		24		24	

Para comparar las medias de esta población se utilizó la distribución de Fisher y se plantean las siguientes hipótesis con un nivel de confianza del 95%:

$$H_o = \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a = \mu_1 \neq \mu_2$$

Se calculará la suma de cuadrados totales con la siguiente fórmula:

$$SST = \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right] - \frac{(\sum x)^2}{N}, \text{ reemplazando los valores se tiene:}$$

$$SST = \frac{3.279.623.824}{24} - \frac{21.619.444.297.528.100}{72} = -300.269.923.036.897$$

Se calculará la suma de cuadrados del error con la siguiente fórmula:

$$SSE = \sum X^2 - \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right], \text{ reemplazando los valores se obtiene:}$$

$$SSE = 21.619.444.297.528.100 - 136.650.993 = 21.619.444.160.877.100$$

En la siguiente tabla se muestran los datos debidamente calculados:

Tabla 20. Análisis de la varianza instancia J90150-100

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio
Entre Tratamientos	SST = -300.269.923.036.897	K-1 3-1=2	$MSTR = \frac{SST}{K - 1}$ $\frac{-300.269.923.036.897}{2} =$ $-150.134.961.518.448$
En los Tratamientos	SSE =21.619.444.160.877.100	N-K 72-3=69	$MSE = \frac{SSE}{N - K}$ $\frac{21.619.444.160.877.100}{69} =$ $313.325.277.693.870$
Total			$F = \frac{MSTR}{MSE} = \frac{-150.134.961.518.448}{313.325.277.693.870}$ $= -0,479166452, \text{ entonces,}$ $F = -0,479166452$

De acuerdo con el valor calculado la distribución de Fisher de la tabla anterior, se obtuvo $F = -0,479166452$, con 2 grados de libertad en el numerador y 69 grados de libertad en el denominador y con un nivel de significancia del 95% y consultando el valor del estadístico de prueba de Fisher en la tabla con los mismo grados de libertad para el numerador y denominador respectivamente, se encuentra que $F = 4,95$. Por lo anterior, se concluye que dado que el valor $(-0,479166452)$ calculado es menor que el valor crítico e igual a 4,95, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula contra la alternativa, por lo cual las medias poblacionales de las diferentes muestras para la sentencia J90150-100, sobre la probabilidad de cruce y de mutación son iguales.

J90200-50

Tabla 21. Datos instancia J90200-50

Instancia	X1 (Tiempo)	x1^2	x2 (Prob. Cruce)	x2^2	x3 (Prob.Mutación)	x3^2
J90200-50	1.172	1.373.584	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.160	1.345.600	0,9	0,81	0,05	0,0025
	902	813.604	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.976	3.904.576	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.821	3.316.041	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.925	3.705.625	0,9	0,81	0,05	0,0025
	962	925.444	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.195	1.428.025	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.150	1.322.500	0,75	0,5625	0,2	0,04
	2.269	5.148.361	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.754	3.076.516	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.906	3.632.836	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.071	1.147.041	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.208	1.459.264	0,7	0,49	0,1	0,01
	937	877.969	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.804	3.254.416	0,7	0,49	0,1	0,01
	2.135	4.558.225	0,7	0,49	0,1	0,01
	2.164	4.682.896	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.092	1.192.464	0,5	0,25	0,3	0,09
	953	908.209	0,5	0,25	0,3	0,09
	1.131	1.279.161	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.123	4.507.129	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.096	4.393.216	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.143	4.592.449	0,5	0,25	0,3	0,09
TC	37.049		17,1		3,9	
nc	24		24		24	

Para comparar las medias de esta población se utilizó la distribución de Fisher y se plantean las siguientes hipótesis con un nivel de confianza del 95%:

$$H_o = \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a = \mu_1 \neq \mu_2$$

Se calculará la suma de cuadrados totales con la siguiente fórmula:

$$SST = \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right] - \frac{(\sum x)^2}{N}, \text{ reemplazando los valores se tiene:}$$

$$SST = \frac{1.374.184.900}{24} - \frac{3.949.514.704.802.770}{72} = -54.854.313.642.334,30$$

Se calculará la suma de cuadrados del error con la siguiente fórmula:

$$SSE = \sum X^2 - \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right], \text{ reemplazando los valores se obtiene:}$$

$$SSE = 3.949.514.704.802.770 - 57.257.704 = 3.949.514.647.545.070$$

En la siguiente tabla se muestran los datos calculados:

Tabla 22. Análisis de la varianza instancia J90200-50

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio
Entre Tratamientos	SST = - 54.854.313.642.334,30	K-1 3-1=2	$MSTR = \frac{SST}{K - 1}$ $= \frac{-54.854.313.642.334,30}{2} =$ $-27.427.156.821.167,20$
En los Tratamientos	SSE =3.949.514.647.545.070	N-K 72-3=69	$MSE = \frac{SSE}{N - K}$ $= \frac{3.949.514.647.545.070}{69} =$ $57.239.342.718.044,40$
Total			$F = \frac{MSTR}{MSE} = \frac{-27.427.156.821.167,20}{57.239.342.718.044,40} =$ $-0,479166173, \text{ entonces,}$ $F = -0,479166173$

De acuerdo con el valor calculado la distribución de Fisher de la tabla anterior, se obtuvo $F = -0,479166173$, con 2 grados de libertad en el numerador y 69 grados de libertad en el denominador y con un nivel de significancia del 95% y consultando el valor del estadístico de prueba de Fisher en la tabla con los mismos grados de libertad para el numerador y denominador respectivamente, se encuentra que $F = 4,95$. Por lo anterior, se concluye que dado que el valor $(-0,479166173)$ calculado es menor que el valor crítico e igual a 4,95, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula contra la alternativa, por lo cual las medias poblacionales de las diferentes muestras para la sentencia J90200-50, sobre la probabilidad de cruce y de mutación son iguales.

J120100-100

Tabla 23. Datos instancia J120100-100

Instancia	x1 (Tiempo)	x1^2	x2 (Prob. Cruce)	x2^2	x3 (Prob. Mutación)	x3^2
J120100-100	1.482	2.196.324	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.533	2.350.089	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.695	2.873.025	0,9	0,81	0,05	0,0025
	2.282	5.207.524	0,9	0,81	0,05	0,0025
	2.714	7.365.796	0,9	0,81	0,05	0,0025
	2.935	8.614.225	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.566	2.452.356	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.477	2.181.529	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.509	2.277.081	0,75	0,5625	0,2	0,04
	2.266	5.134.756	0,75	0,5625	0,2	0,04
	2.964	8.785.296	0,75	0,5625	0,2	0,04
	2.378	5.654.884	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.162	1.350.244	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.271	1.615.441	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.328	1.763.584	0,7	0,49	0,1	0,01
	2.517	6.335.289	0,7	0,49	0,1	0,01
	2.542	6.461.764	0,7	0,49	0,1	0,01
	2.611	6.817.321	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.526	2.328.676	0,5	0,25	0,3	0,09
	1.418	2.010.724	0,5	0,25	0,3	0,09
	1.514	2.292.196	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.844	8.088.336	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.951	8.708.401	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.773	7.689.529	0,5	0,25	0,3	0,09
TC	49.258		17,1		3,9	
nc	24		24		24	

Para comparar las medias de esta población se utilizó la distribución de Fisher y se plantean las siguientes hipótesis con un nivel de confianza del 95%:

$$H_o = \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a = \mu_1 \neq \mu_2$$

Se calculará la suma de cuadrados totales con las siguientes fórmulas:

$$SST = \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right] - \frac{(\sum x)^2}{N}, \text{ reemplazando los valores se tiene:}$$

$$SST = \frac{2.428.419.844}{24} - \frac{12.222.276.139.874.100}{72} = -169.753.734.091.869$$

Se calculará la suma de cuadrados del error con la siguiente fórmula:

$$SSE = \sum X^2 - \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right], \text{ reemplazando los valores se obtiene:}$$

$$SSE = 12.222.276.139.874.100 - 101.184.160 = 12.222.276.038.689.900$$

En la siguiente tabla se muestran los datos debidamente calculados:

Tabla 24. Análisis de la varianza instancia J120100-100

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio
Entre Tratamientos	SST = -169.753.734.091.869	K-1 3-1=2	$MSTR = \frac{SST}{K - 1}$ $\frac{-169.753.734.091.869}{2} =$ $-84.876.867.045.934,40$
En los Tratamientos	SSE =12.222.276.038.689.900	N-K 72-3=69	$MSE = \frac{SSE}{N - K}$ $\frac{12.222.276.038.689.900}{69} =$ $177.134.435.343.332$
Total			$F = \frac{MSTR}{MSE} = \frac{-84.876.867.045.934,40}{177.134.435.343.332} =$ $-0,95833277, \text{ entonces,}$ $F = -0,95833277$

De acuerdo con el valor calculado la distribución de Fisher de la tabla anterior, se obtuvo $F = -0,95833277$, con 2 grados de libertad en el numerador y 69 grados de libertad en el denominador y con un nivel de significancia del 95% y consultando el valor del estadístico de prueba de Fisher en la tabla con los mismos grados de libertad para el numerador y denominador respectivamente, se encuentra que $F = 4,95$. Por consiguiente, se concluye que dado que el valor $(-0,95833277)$ calculado es menor que el valor crítico e igual a 4,95, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula contra la alternativa, por lo cual las medias poblacionales de las diferentes muestras para la sentencia J120100-100, sobre la probabilidad de cruce y de mutación son iguales.

J120150-100

Tabla 25. Datos instancia J120150-100

Instancia	X1 (Tiempo)	x1^2	x2 (Prob. Cruce)	x2^2	x3 (Prob.Mutación)	x3^2
J120150-100	2.685	7.209.225	0,9	0,81	0,05	0,0025
	2.331	5.433.561	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.881	3.538.161	0,9	0,81	0,05	0,0025
	4.132	17.073.424	0,9	0,81	0,05	0,0025
	4.067	16.540.489	0,9	0,81	0,05	0,0025
	4.631	21.446.161	0,9	0,81	0,05	0,0025
	2.172	4.717.584	0,75	0,5625	0,2	0,04
	2.205	4.862.025	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.880	3.534.400	0,75	0,5625	0,2	0,04
	3.877	15.031.129	0,75	0,5625	0,2	0,04
	3.615	13.068.225	0,75	0,5625	0,2	0,04
	3.510	12.320.100	0,75	0,5625	0,2	0,04
	2.546	6.482.116	0,7	0,49	0,1	0,01
	2.687	7.219.969	0,7	0,49	0,1	0,01
	2.332	5.438.224	0,7	0,49	0,1	0,01
	5.159	26.615.281	0,7	0,49	0,1	0,01
	4.289	18.395.521	0,7	0,49	0,1	0,01
	4.070	16.564.900	0,7	0,49	0,1	0,01
	2.477	6.135.529	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.340	5.475.600	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.315	5.359.225	0,5	0,25	0,3	0,09
	4.762	22.676.644	0,5	0,25	0,3	0,09
	4.355	18.966.025	0,5	0,25	0,3	0,09
	4.547	20.675.209	0,5	0,25	0,3	0,09
TC	78.865		17,1		3,9	
nc	24		24		24	

Para comparar las medias de esta población se utilizó la distribución de Fisher y se plantean las siguientes hipótesis con un nivel de confianza del 95%:

$$H_o = \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a = \mu_1 \neq \mu_2$$

Se calculará la suma de cuadrados totales con la siguiente fórmula:

$$SST = \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right] - \frac{(\sum x)^2}{N}, \text{ reemplazando los valores se tiene:}$$

$$SST = \frac{6.223.000.996}{24} - \frac{81.098.931.057.853.100}{72} = -1.126.373.783.178.470$$

Se calculará la suma de cuadrados del error con la siguiente fórmula:

$$SSE = \sum X^2 - \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right], \text{ reemplazando los valores se obtiene:}$$

$$SSE = 81.098.931.057.853.100 - 259.291.708 = 81.098.930.798.561.400$$

En la siguiente tabla se muestran los datos debidamente calculados:

Tabla 26. Análisis de la varianza instancia J120150-100

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio
Entre Tratamientos	SST = - 1.126.373.783.178.470	K-1 3-1=2	$MSTR = \frac{SST}{K - 1}$ $\frac{-1.126.373.783.178.470}{2} =$ -563.186.891.589.237
En los Tratamientos	SSE =81.098.930.798.561.400	N-K 72-3=69	$MSE = \frac{SSE}{N - K}$ $\frac{81.098.930.798.561.400}{69} =$ 1.175.346.823.167.560
Total			$F = \frac{MSTR}{MSE} = \frac{-563.186.891.589.237}{1.175.346.823.167.560} =$ -0,479166558 , entonces, $F = -0,479166558$

De acuerdo con el valor calculado la distribución de Fisher de la tabla anterior, se obtuvo $F = -0,479166558$, con 2 grados de libertad en el numerador y 69 grados de libertad en el denominador y con un nivel de significancia del 95% y consultando el valor del estadístico de prueba de Fisher en la tabla con los mismos grados de libertad para el numerador y denominador respectivamente, se observa que $F = 4,95$. Así las cosas, se concluye que dado que el valor (-0,479166558) calculado es menor que el valor crítico e igual a 4,95, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula contra la alternativa, por lo cual las medias poblacionales de las diferentes muestras para la sentencia J120150-100, sobre la probabilidad de cruce y de mutación son iguales.

J120200-50

Tabla 27. Datos instancia J120200-50

Instancia	X1 (Tiempo)	x1^2	x2 (Prob. Cruce)	x2^2	x3 (Prob.Mutación)	x3^2
J120200-50	1.515	2.295.225	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.658	2.748.964	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.358	1.844.164	0,9	0,81	0,05	0,0025
	2.871	8.242.641	0,9	0,81	0,05	0,0025
	2.595	6.734.025	0,9	0,81	0,05	0,0025
	2.254	5.080.516	0,9	0,81	0,05	0,0025
	1.344	1.806.336	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.535	2.356.225	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.229	1.510.441	0,75	0,5625	0,2	0,04
	2.743	7.524.049	0,75	0,5625	0,2	0,04
	2.401	5.764.801	0,75	0,5625	0,2	0,04
	2.900	8.410.000	0,75	0,5625	0,2	0,04
	1.239	1.535.121	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.526	2.328.676	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.400	1.960.000	0,7	0,49	0,1	0,01
	2.851	8.128.201	0,7	0,49	0,1	0,01
	3.002	9.012.004	0,7	0,49	0,1	0,01
	2.235	4.995.225	0,7	0,49	0,1	0,01
	1.595	2.544.025	0,5	0,25	0,3	0,09
	1.649	2.719.201	0,5	0,25	0,3	0,09
	1.591	2.531.281	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.985	8.910.225	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.550	6.502.500	0,5	0,25	0,3	0,09
	2.560	6.553.600	0,5	0,25	0,3	0,09
TC	49.586		17,1		3,9	
nc	24		24		24	

Para comparar las medias de esta población se utilizó la distribución de Fisher y se plantean las siguientes hipótesis con un nivel de confianza del 95%:

$$H_o = \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a = \mu_1 \neq \mu_2$$

Se calculará la suma de cuadrados totales con la siguiente fórmula:

$$SST = \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right] - \frac{(\sum x)^2}{N}, \text{ reemplazando los valores se tiene:}$$

$$SST = \frac{2.460.854.449}{24} - \frac{12.552.392.337.936.400}{72} = -174.338.679.935.737$$

Se calculará la suma de cuadrados del error con la siguiente fórmula:

$$SSE = \sum X^2 - \sum \left[\frac{T^2 c}{nc} \right], \text{ reemplazando los valores se obtiene:}$$

$$SSE = 12.552.392.337.936.400 - 102.535.602 = 12.552.392.235.400.800$$

En la siguiente tabla se muestran los datos debidamente calculados:

Tabla 28. Análisis de la varianza instancia J120200-50

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio
Entre Tratamientos	SST = - 174.338.679.935.737	K-1 3-1=2	$MSTR = \frac{SST}{K - 1}$ $\frac{-174.338.679.935.737}{2} =$ $-87.169.339.967.868,30$
En los Tratamientos	SSE =12.552.392.235.400.800	N-K 72-3=69	$MSE = \frac{SSE}{N - K}$ $\frac{12.552.392.235.400.800}{69} =$ $181.918.728.049.287$
Total			$F = \frac{MSTR}{MSE} = \frac{-87.169.339.967.868,30}{181.918.728.049.287} =$ $-0,479166389, \text{ entonces,}$ $F = -0,479166389$

De acuerdo con el valor calculado la distribución de Fisher de la tabla anterior, se obtuvo $F = -0,479166389$, con 2 grados de libertad en el numerador y 69 grados de libertad en el denominador y con un nivel de significancia del 95% y consultando el valor del estadístico de prueba de Fisher en la tabla con los mismos grados de libertad para el numerador y denominador respectivamente, se observa que $F = 4,95$. Por lo anterior, se concluye que dado que el valor $(-0,479166389)$ calculado es menor que el valor crítico e igual a 4,95, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula contra la alternativa, por lo cual las medias poblacionales de las diferentes muestras para la sentencia J120200-50, sobre la probabilidad de cruce y de mutación son iguales.

Con base en el análisis estadístico realizado, se puede concluir que para todas las instancias teniendo en cuenta la probabilidad de mutación y de cruce, con relación al tiempo de procesamiento para cada tratamiento, no existen diferencias entre las medias poblacionales para cada una de ellas. Por tal razón, todas las muestras de los tratamientos son iguales entre sí con un nivel de confianza del 95%.

5.3 COMPARACIÓN CON EL ÓPTIMO

De manera complementaria, el modelo matemático objeto de estudio fue desarrollado en el software de programación lineal XPRESS. Los valores promedio del costo óptimo y del costo con el algoritmo *MAPS/Prec/Cost* por instancia se pueden observar en la siguiente tabla. La última columna de la tabla presenta el porcentaje de desviación con respecto al óptimo calculado como:

$$\%dev = \frac{\text{Valor del heurístico} - \text{Valor óptimo}}{\text{Valor óptimo}} \times 100\% \quad (100)$$

Tabla 29. Valores promedio del costo óptimo y del costo con el algoritmo *MAPS/Prec/Cost*

Instancia	Costo óptimo (promedio)	Costo con <i>MAPS/Prec/Cost</i> (promedio)	%dev (promedio)
J30	1351,35	1710,63	26,59%
J60	1929,07	2440,503	26,51%
J90	3085,85	3113,953	0,91%
J120	2929,07	3925,451	34,02%
Promedios	2323,83	2797,63	22,01%

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1 CONCLUSIONES

A diferencia de otras técnicas de investigación, los algoritmos meméticos (AMs) fueron concebidos para integrarse con otras técnicas (metaheurísticas o no). Esta habilidad para combinar de manera sinérgica diferentes métodos es una de las razones de su éxito.

Los AMs proporcionan un marco de trabajo apropiado para integrar en un único motor de búsqueda diferentes heurísticas provechosas. En este sentido, los AMs deben considerarse no como competidores sino como integradores: allá donde una metaheurística pura empiece a alcanzar sus límites, los AMs constituyen el siguiente paso natural.

Este trabajo de investigación consideró el problema de la minimización del costo de actividades en un RCPSP. Un ejemplo de este problema en una situación de la vida real es la cadena de suministro de la construcción. Dado que esta función objetivo es no regular y el problema es *NP-hard*, un AM fue propuesto en este trabajo. La idea de analizar la efectividad de este procedimiento está basada en el éxito que este ha tenido cuando se combinan estrategias basadas en la población y en la trayectoria para resolver otros problemas de optimización combinatoria y de programación de operaciones. Los experimentos computacionales fueron llevados a cabo usando conjuntos de datos estándar, disponibles en las instancias PSPLIB, con el propósito de analizar el impacto de los parámetros del algoritmo en el valor de la función objetivo.

Con la investigación realizada se confirma el buen desempeño que se obtiene al utilizar la heurística *MAPS/Prec/Cost* como complemento de cualquier método heurístico para el RCPSP. En efecto, se realizó un estudio experimental extenso en el cual se consideraron 2040 conjuntos de datos provenientes de la librería PSPLIB, la cual es la referencia para el estudio y validación de algoritmos heurísticos para problemas de programación de proyectos. El estudio experimental contempló el análisis de proyectos con 30, 60, 90 y 120 actividades diferentes. Así mismo, se consideraron diferentes combinaciones de parámetros para el algoritmo memético.

Como se explicó en detalle anteriormente, de este estudio experimental se pudo observar que:

- En comparación contra el óptimo, el algoritmo memético propuesto tiene un porcentaje de desviación de 22,01%.
- El tiempo de solución (tiempo de corrida) del algoritmo memético es altamente variable dependiendo del tamaño de la instancia. Se observó que el tiempo promedio de corrida es 1.131 segundos.
- Del análisis estadístico realizado para estudiar el desempeño del algoritmo memético, se puede concluir que su tiempo de procesamiento (tiempo de corrida) no se ve afectado ni por el tamaño de la instancia (es decir, el conjunto de datos) ni por los valores de la probabilidad de cruce o de mutación.

Adicionalmente, este documento presenta los diagramas conceptuales para el diseño y la implementación computacional del algoritmo propuesto, a través de diagramas de flujo, para cada una de las subrutinas y etapas del procedimiento.

6.2 LÍNEAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

De la presente investigación surgen las siguientes líneas de trabajo para la realización de futuras investigaciones:

- Diseñar algoritmos híbridos mediante el uso de otras metodologías como la Búsqueda Tabú, los Sistemas de Colonias de Hormigas, entre otras.
- Diseñar estrategias adaptativas que le permitan al algoritmo modificar sus parámetros de búsqueda de acuerdo a lo ocurrido durante la búsqueda. Dichas modificaciones permitirán a su vez diseñar estrategias de intensificación o diversificación.
- Un trabajo posterior podría considerar otros enfoques basados en el uso de heurísticas sofisticadas tales como aquellas basadas en la simulación de eventos discretos e incluso el uso de procedimientos multi-objetivos evolutivos, que han mostrado por sí mismos ser eficientes solucionando problemas de optimización multi-objetivo. Esto permitiría considerar, por ejemplo, optimización de costos y terminación de proyectos a tiempo. De acuerdo con la revisión de Yang et al. (2001), tales trabajos podrían considerar funciones objetivos regulares y no regulares.

BIBLIOGRAFÍA

- Araujo, L. y Cervigón, Carlos. "Algoritmos evolutivos: un enfoque práctico", Grupo Editor Alfaomega, México (2009).
- Ballestin, F. "Nuevos métodos de resolución del problema de secuenciación de proyectos con recursos limitados", Universidad de Valencia (2002): 5-43.
- Blazewicz, J., Lenstra, J.K. y Rinooy, K. "Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity". *Discrete Applied Mathematics* 5 (1983): 11-24.
- Brito, J. Campos, C. García, F. y García, M. "Metaheurísticas: una revisión actualizada", Grupo de Computación Inteligente, Universidad de La Laguna (2004): 1-47.
- Coello, C. "A short tutorial on evolutionary multiobjective optimization". *First International Conference on Evolutionary Multi-Criterio Optimization*, Springer-Verlag. *Lecture Notes in Computer Science* No.1993, (2001): 21-40.
- Cotta, C. y Fernández, A. "Una Visión General de los Algoritmos Meméticos". Universidad de Málaga, Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación, Málaga - España (2007): 1-21.
- Dawkins, R. "The Selfish Gene". Clarendon Press, Oxford (1976).
- Elmaghraby, S.E. y Kamburowski, J. "The analysis of activity networks under generalized precedence relations," *Management Science*, Vol. 38, pp. 1245-1263, (1992).
- Elmaghraby, S.E. "Activity nets: a guided tour through some recent developments". *European Journal of Operational Research* (1995): 223-234.
- Glover and C. McMillan. "The general employee scheduling problem: an integration of MS and AI". *Computers and Operations Research* (1986).
- Glover, F. "Tabu Search - Part 1". *ORSA Journal on Computing* 1, (1989): 190-206.
- Gray, C. y Larson, E. "Project management the managerial process". Singapore, McGraw-Hill, (2000).
- Herroelen, W., Demeulemeester, E. & De Reyck, B. "Resource-Constrained Project Scheduling: a Survey of Recent Developments". *Computers and Operations Research* 25, 279-302 (1998).

- Icmeli, O., Erenguc, S. y Zappe, C. "Project Scheduling Problems: A survey". *International Journal of Operations & Production Management* 13 (11): 80-92, Bradford, (1993).
- Icmeli, O. y Rom, W. "Analysis of the Characteristics of Projects in Diverse Industries". *Journal of Operational Management* 16 (1998): 43-61.
- Icmeli, O. y Rom, W. "Ensuring Quality in Resource Constrained Project Scheduling". *European Journal of Operational Research* 103 (1997): 483-496.
- Kelley, James; Walker, Morgan. "Critical-Path Planning and Scheduling". *Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference*, (1959).
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. y Vecchi, Jr. and M.P. "Optimization by Simulated Annealing", *Science* (1983): Vol. 220 No. 4598: 671-680.
- Kolisch, R. y Padman, R. "An Integrated survey of deterministic project scheduling". *Omega* 29 Pergamon (2001): 249-272.
- Liu, Z., Wang, H. "GA-Based Resource Constrained Project Scheduling with the Objective of Minimizing Activities' Cost". *Advances in Intelligent Computing*, (2005): 937-946.
- Liu, Z., Wang, H. "Heuristic Algorithm for RCPSP with the Objective of Minimizing Activities' Cost". *Journal of Systems Engineering and Electronics*, Vol. 17, No. 1, (2006): 96-102.
- Liu, Z., Zheng, Y., "Resource Constrained Multiple Projects Scheduling with the Objective of Minimizing Activities Cost". *Proceedings of the 2008 Control and Decision Conference*, pp. 1027-1032, (2008).
- Mingozi, A., Maniezzo, V., Ricciardelli, S. y Bianco, L. "An exact algorithm for the Resource Constrained Project Scheduling Problem Based on a New Mathematical Formulation", *Technical Report*, No. 32, (1994).
- Mitchell, T. "Machine learning". McGraw-Hill, (1997).
- Prekopa, A. *Stochastic Programming*. Kluwer Academic Publishers, (1995).
- Ozdamar, L. y Ulusoy, G. "A Survey On The Resource-Constrained Project Scheduling Problem". *IIE Transactions* 27 (5): 574-599 Academic Research Library, (1995).
- Slowinski, R. Multiobjective project scheduling under multiple-category resource constraints. In: Slowinski, R. and Weglarz, J. (Eds), *Advances in project scheduling*. Amsterdam, Elsevier, (1989).

- Sprecher, A., Kolisch, R. and Drexl, A. "Semi-active, active, and non-delay schedules for the resource-constrained project scheduling problem". *European Journal of Operational Research* 80: 94-102 Elsevier, (1995).
- Yang, B., Geunes, J., O'Brien, W. "Resource Constrained Project Scheduling: Past Work and New Directions". Research Report of June, Department of Industrial and Systems Engineering, University of Florida, (2001).
- Yannibelli, V. "Algoritmos Genéticos y Meméticos". Research Reportrr001. (2007): 1-56.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Alcaraz, J., Maroto, C. "A Robust Genetic Algorithm for Resource Allocation in Project Scheduling". *Anal. of Operation Research* 102, (2001): 83-109.
- Álvarez-Valdés R., Tamarit, J.M., "Heuristic Algorithms for Resource-Constrained Project Scheduling: a review and a empirical analysis". *Advances in project scheduling*. Amsterdam, Elsevier, (1989):113-134.
- Aristizábal, J.P. y Zárate, H. "Diseño e implementación de un algoritmo genético para la calendarización de actividades de un proyecto variando la disponibilidad de los recursos". Universidad Distrital, (2006).
- Artigues, C., Demasse, S., Neron, E. "Resource Constrained Project Scheduling: Models, Algorithms, Extensions and Applications". ISTE Publishing Company. (2008): pages 288.
- Brucker P., A. Drexl, R. Mohring, K. Neumann, E. Pesch. "Resource Constrained Project Scheduling: Notation, Classification, Models and Methods". *European Journal of Operations Research*, 112, (1999): 3-41.
- Canavos, G. C. "Probabilidad y estadística aplicaciones y métodos". Editorial McGraw Hill, primera edición, (1988).
- Demeulemeester, E.L., Herroelen, W.S. "Project Scheduling: A Research Handbook" (International Series in Operations Research & Management Science)". Springer. Pages 712, (2002).
- Hartmann, S. "A Self-Adapting Genetic Algorithm for Project Scheduling under Resource Constraints". *Naval Research Logistic* 49, 433-448, (2002).
- Józefowska, J., Weglarz, J. "Perspectives in Modern Project Scheduling (International Series in Operations Research & Management Science)". Springer. Pages 444, (2006).
- Klein, R. "Scheduling of Resource-Constrained Projects". Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, (2000).
- Li, R.K., Willis, J. "An Iterative Scheduling Technique for Resource-Constrained Project Scheduling". *European Journal of Operations Research* 56, 370-379, (1992).
- Merkle, D., Middendorf, M., Schneck, H. "Ant Colony Optimization for Resource-Constrained Project Scheduling". In: *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, Las Vegas, NV*, 893-900, (2000).
- Montgomery, D. y Runger, G. "Probabilidad y estadística aplicadas para ingenieros". Limusa- Willey, México, (1985).

- Montoya Torres, J.R. “Fundamentos de Programación de Operaciones en Manufactura”. Notas de clase, Universidad de La Sabana, (2008).
- Montoya Torres, J.R., Gutiérrez, E., Pirachicán, C. “Project Scheduling with limited resources using a genetic algorithm”. *International Journal of Project Management*, 28 (6), 619-628, (2010).
- Morton, T.; D. Pentico. “Heuristics Scheduling Systems and Project Management”. John Wiley and Sons, Inc, (1993).
- Nonobe, K., Ibaraki, T. Formulation and Tabu Search Algorithm for the Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSp)”. In: Ribeiro, C.C., Hansen, P. (Eds.), *Essays and Surveys in Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers, 557-588, (2001).
- Pinedo, M. “Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems”. Prentice Hall. 2nd Edition, (2002).
- Salazar García, C. “Algoritmo heurístico para la resolución de problemas de programación de múltiples proyectos con recursos restringidos aceptando interrupciones en las actividades (PRCMPSP)”. Universidad de la Sabana, (2009).
- Tormos, P., Lova, A. “A Competitive Heuristic Solution Technique for Resource - Constrained Project Scheduling”. *Annals of Operation Research* 102, 65-81, (2001).
- Valls, V., Ballestín, F., Quintanilla, S. “A populationbased approach to the resource-constrained project scheduling problem”. *Annals of Operations Research*, in press, (2004).

Anexo 1. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS COMPUTACIONALES POR INSTANCIA

30 JOBS 100-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1815,6028
	99 1810,6382
	t= 1 min:9 seg
Costo por actividad	0 1715,6028
	99 1710,6382
	t= 1 min:9 seg

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
	t= 1 min:11 seg
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
	t= 1 min:12 seg

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1814,1843
	99 1810,6382
	t= 1 min:10 seg
Costo por actividad	0 1823,4042
	99 1710,6382
	t= 1 min:10 seg

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
	t= 1 min:44 seg
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
	t= 1 min:39 seg

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1917,7304
	99 1810,6382
	t= 1 min:43 seg
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
	t= 1 min:45 seg

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
	t= 1 min:43 seg
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
	t= 1 min:42 seg

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
	t= 1 min:13 seg
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
	t= 1 min:13 seg

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1826,2411
	99 1810,6382
	t= 1 min:12 seg
Costo por actividad	0 1710,6028
	99 1710,6382
	t= 1 min:12 seg

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
	t= 1 min:12 seg
Costo por actividad	0 1815,6028
	99 1710,6382
	t= 1 min:14 seg

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
	t= 1 min:46 seg
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
	t= 1 min: 46 seg

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
	t= 1 min:51 seg
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
	t= 1 min:53 seg

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
	t= 1 min:57 seg
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
	t= 2 min:1 seg

30 JOBS 100-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1826,2411
	99 1810,6382
t=	1min:10 seg
Costo por actividad	0 1726,2411
	99 1710,6382
t=	1min:9 seg

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1915,6028
	99 1810,6382
t=	1min:10 seg
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1min:8 seg

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1min:10 seg
Costo por actividad	0 1715,6028
	99 1710,6382
t=	1min:9 seg

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1 min:43 seg
Costo por actividad	0 1715,6028
	99 1710,6382
t=	1 min:39 seg

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1814,1843
	99 1810,6382
t=	1 min:42 seg
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1 min:42 seg

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1 min:41 seg
Costo por actividad	0 1715,6028
	99 1710,6382
t=	1 min:39 seg

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1 min:10 seg
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1 min:10 seg

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1815,6028
	99 1810,6382
t=	1 min:10 seg
Costo por actividad	0 1715,6028
	99 1710,6382
t=	1 min:9 seg

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1min:10 seg
Costo por actividad	0 1815,6028
	99 1710,6382
t=	1 min:8 seg

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1 min:41 seg
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1 min:39 seg

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1 min:43 seg
Costo por actividad	0 1715,6028
	99 1710,6382
t=	1 min:40 seg

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1 min:42 seg
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1 min:39 seg

30 JOBS 150-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1815,6028
	99 1810,6382
t=	1:44 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:42 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:44 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:42 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1907,8014
	99 1810,6382
t=	1:43 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:40 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1858,8652
	99 1810,6382
t=	2:33 min
Costo por actividad	0 1715,6028
	99 1710,6382
t=	2:27 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1826,2411
	99 1810,6382
t=	2:32 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	2:30 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	2:38 min
Costo por actividad	0 1715,6028
	99 1710,6382
t=	2:35 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1915,6028
	99 1810,6382
t=	1:45 min
Costo por actividad	0 1723,4042
	99 1710,6382
t=	1:47 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1917,7304
	99 1810,6382
t=	1:45 min
Costo por actividad	0 1726,2411
	99 1710,6382
t=	1:48 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:56 min
Costo por actividad	0 1726,2411
	99 1710,6382
t=	1:57 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1938,2978
	99 1810,6382
t=	2:49 min
Costo por actividad	0 1815,6028
	99 1710,6382
t=	2:59 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1814,1843
	99 1810,6382
t=	3:4 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	3:8 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	3:10 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	2:54 min

30 JOBS 150-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:44 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:43 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:41 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:42 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:42 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:39 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1814,1843
	99 1810,6382
t=	2:37 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	2:32 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	2:28 min
Costo por actividad	0 1723,4042
	99 1710,6382
t=	2:29 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	2:34 min
Costo por actividad	0 1839,007
	99 1710,6382
t=	2:33 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:44 min
Costo por actividad	0 1731,2056
	99 1710,6382
t=	1:46 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1815,6028
	99 1810,6382
t=	1:44 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:51 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1823,4042
	99 1810,6382
t=	1:49 min
Costo por actividad	0 1814,8936
	99 1710,6382
t=	1:43 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	2:32 min
Costo por actividad	0 1758,8652
	99 1710,6382
t=	2:33 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	2:39 min
Costo por actividad	0 1715,6028
	99 1710,6382
t=	2:44 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 1826,2411
	99 1810,6382
t=	2:48 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	2:54 min

30 JOBS 200-50

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:8 min
Costo por actividad	0 1815,6028
	99 1710,6382
t=	1:9 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1814,1843
	99 1810,6382
t=	1:10 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:9 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1858,8652
	99 1810,6382
t=	1:9 min
Costo por actividad	0 1715,6028
	99 1710,6382
t=	1:10 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:42 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:42 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:43 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:38 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1858,8652
	99 1810,6382
t=	1:40 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:39 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1826,2411
	99 1810,6382
t=	1:20 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:23 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1815,6028
	99 1810,6382
t=	1:23 min
Costo por actividad	0 1807,8014
	99 1710,6382
t=	1:21 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:16 min
Costo por actividad	0 1726,2411
	99 1710,6382
t=	1:21 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1924,1134
	99 1810,6382
t=	1:55 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	2:2 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	2:7 min
Costo por actividad	0 1815,6028
	99 1710,6382
t=	2:1 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1810,6028
	99 1810,6382
t=	2:7 min
Costo por actividad	0 1726,2411
	99 1710,6382
t=	1:58 min

30 JOBS 200-50

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1871,6312
	99 1810,6382
t=	1:9 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:7 min

N= Población inicial	0,15
	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:7 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:7 min

N= Población inicial	0,15
	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:10 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:8 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:39 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:39 min

N= Población inicial	0,15
	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1826,2411
	99 1810,6382
t=	1:41 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:39 min

N= Población inicial	0,15
	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:40 min
Costo por actividad	0 1715,6028
	99 1710,6382
t=	1:40 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:8 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:9 min

N= Población inicial	0,15
	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1923,4042
	99 1810,6382
t=	1:11 min
Costo por actividad	0 1715,6028
	99 1710,6382
t=	1:9 min

N= Población inicial	0,15
	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:9 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:9 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1810,6382
	99 1810,6382
t=	1:41 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:40 min

N= Población inicial	0,15
	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1917,7304
	99 1810,6382
t=	1:50 min
Costo por actividad	0 1710,6382
	99 1710,6382
t=	1:47 min

N= Población inicial	0,15
	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 1815,6028
	99 1810,6382
t=	1:46 min
Costo por actividad	0 1830,4964
	99 1710,6382
t=	1:48 min

60 JOBS 100-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2721,2209
	99 2257,5581
t=	10:15 min
Costo por actividad	0 2577,3255
	99 2460,1744
t=	9:13 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2734,0116
	99 2557,5581
t=	8:39 min
Costo por actividad	0 2770,3488
	99 2457,2674
t=	9:12 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2798,2558
	99 2557,5581
t=	8:16 min
Costo por actividad	0 2627,9069
	99 2425
t=	7:38 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2756,3953
	99 2557,5581
t=	13:15 min
Costo por actividad	0 2633,4302
	99 2464,2441
t=	12:31 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2768,8953
	99 2557,5581
t=	13:11 min
Costo por actividad	0 2671,8023
	99 2457,5581
t=	12:32 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2691,8604
	99 2557,5581
t=	13:15 min
Costo por actividad	0 2662,2093
	99 2457,5581
t=	12:47 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2743,3139
	99 2557,5581
t=	9:13 min
Costo por actividad	0 2609,3023
	99 2457,5581
t=	10:38min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2737,5
	99 2557,5581
t=	11:21 min
Costo por actividad	0 2670,6395
	99 2457,5581
t=	11:30 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2614,2441
	99 2557,5581
t=	10:11 min
Costo por actividad	0 2625,5813
	99 2457,5581
t=	10:57 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2723,2558
	99 2557,5581
t=	12:38 min
Costo por actividad	0 2589,5348
	99 2457,5581
t=	13:14 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2597,6744
	99 2557,5581
t=	14:29min
Costo por actividad	0 2746,5116
	99 2460,1744
t=	11:12 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2744,4767
	99 2557,5581
t=	13:27 min
Costo por actividad	0 2631,3953
	99 2457,5581
t=	12:20 min

60 JOBS 100-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2748,5465
	99 2564,2441
t=	9:34 min
Costo por actividad	0 2664,2441
	99 2457,5581
t=	8:14 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2747,9651
	99 2560,1744
t=	8:7 min
Costo por actividad	0 2654,9418
	99 2457,5581
t=	9:24 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2757,2674
	99 2557,5581
t=	9:36 min
Costo por actividad	0 2493,0232
	99 2457,5581
t=	9:16 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2707,8488
	99 2557,5581
t=	11:21 min
Costo por actividad	0 2581,3953
	99 2457,5581
t=	12:34 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2687,7906
	99 2564,2441
t=	13:46 min
Costo por actividad	0 2587,5
	99 2457,5581
t=	13:33 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2749,4186
	99 2557,5581
t=	14:25 min
Costo por actividad	0 2539,2441
	99 2457,5581
t=	13:44 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2814,2441
	99 2557,5581
t=	9:46 min
Costo por actividad	0 2670,3488
	99 2457,5581
t=	12:8 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2803,1976
	99 2557,5581
t=	10:20 min
Costo por actividad	0 2635,4651
	99 2450,5813
t=	7:38 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2720,6395
	99 2550,5813
t=	8:27 min
Costo por actividad	0 2647,9651
	99 2457,8488
t=	11:3 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2745,0581
	99 2550,5813
t=	15:57 min
Costo por actividad	0 2692,7325
	99 2464,2441
t=	16:56 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2746,5116
	99 2557,5581
t=	15:57 min
Costo por actividad	0 2625,2906
	99 2457,5581
t=	16:10min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2717,1511
	99 2564,2441
t=	17:8 min
Costo por actividad	0 2544,4767
	99 2457,5581
t=	17:20 min

60 JOBS 150-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2732,2674
	99 2557,5581
t=	15:5 min
Costo por actividad	0 2654,9418
	99 2457,5581
t=	16:51 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2715,4069
	99 2564,2441
t=	15:34 min
Costo por actividad	0 2660,1744
	99 2457,5581
t=	16:20 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2743,6046
	99 2557,5581
t=	15:55 min
Costo por actividad	0 2509,3023
	99 2457,5581
t=	14:9 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2635,7558
	99 2549,7093
t=	17:46 min
Costo por actividad	0 2586,9186
	99 2457,5581
t=	20:59 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2815,1162
	99 2557,5581
t=	20:20 min
Costo por actividad	0 2672,6744
	99 2457,5581
t=	22:10 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2687,2093
	99 2557,5581
t=	16:57 min
Costo por actividad	0 2740,4069
	99 2457,5581
t=	18:54 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2740,1162
	99 2557,5581
t=	14:26 min
Costo por actividad	0 2520,6395
	99 2457,5581
t=	14:41 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2741,5697
	99 2557,5581
t=	15:16 min
Costo por actividad	0 2717,1511
	99 2457,5581
t=	14:41 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2797,6744
	99 2557,5581
t=	14:25 min
Costo por actividad	0 2499,7093
	99 2452,3255
t=	12:20 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2767,7325
	99 2557,5581
t=	19:18 min
Costo por actividad	0 2602,9069
	99 2457,5581
t=	22:13 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2657,5581
	99 2557,5581
t=	22:20 min
Costo por actividad	0 2687,7906
	99 2464,2441
t=	21:57 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2716,8604
	99 2552,3255
t=	24:12 min
Costo por actividad	0 2645,9302
	99 2457,5581
t=	22:15 min

60 JOBS 150-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2690,1162
	99 2557,5581
t=	13:33 min
Costo por actividad	0 2614,5348
	99 2457,5581
t=	13:32 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2653,1976
	99 2557,5581
t=	13:35 min
Costo por actividad	0 2586,9186
	99 2457,5581
t=	15:36 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2750,2906
	99 2523,2558
t=	13:48 min
Costo por actividad	0 2695,0581
	99 2457,5581
t=	17:52 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2726,7441
	99 2557,5581
t=	18:47 min
Costo por actividad	0 2576,4534
	99 2457,5581
t=	17:47 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2719,4767
	99 2557,5581
t=	22:21 min
Costo por actividad	0 2616,279
	99 2457,5581
t=	21:27 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2773,8372
	99 2557,5581
t=	22:1 min
Costo por actividad	0 2629,6511
	99 2464,2441
t=	20:49 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2744,4767
	99 2564,2441
t=	14:36 min
Costo por actividad	0 2617,1511
	99 2468,8953
t=	13:47 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2650,5813
	99 2564,2441
t=	15:23 min
Costo por actividad	0 2542,1511
	99 2457,5581
t=	16:40 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2811,6279
	99 2557,5581
t=	13:40 min
Costo por actividad	0 2564,2441
	99 2464,2441
t=	14:18 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2696,5116
	99 2557,5581
t=	26:37 min
Costo por actividad	0 2677,9069
	99 2438,9534
t=	22:32 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2784,0116
	99 2557,5581
t=	23:16 min
Costo por actividad	0 2563,6627
	99 2464,2441
t=	21:17 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 2750
	99 2557,5581
t=	21:9 min
Costo por actividad	0 2606,3953
	99 2457,5581
t=	22:14 min

60 JOBS 150-100															
% DUE DATE		0,15													
N=	Población inicial	150		N=	Población inicial	150		N=	Población inicial	150		N=	Población inicial	150	
Pc=	P cruce	0,7		Pc=	P cruce	0,7		Pc=	P cruce	0,7		Pc=	P cruce	0,7	
Pm=	P mutación	0,1		Pm=	P mutación	0,1		Pm=	P mutación	0,1		Pm=	P mutación	0,1	
Cm=	Condición de memético	10		Cm=	Condición de memético	10		Cm=	Condición de memético	10		Cm=	Condición de memético	10	
Crossover		UN PUNTO		Crossover		DOS PUNTOS		Crossover		HÍBRIDO		Crossover		HÍBRIDO	
No. de generaciones		100		No. de generaciones		100		No. de generaciones		100		No. de generaciones		100	
Costo acumulado	0	2690,1162		Costo acumulado	0	2653,1976		Costo acumulado	0	2750,2906		Costo acumulado	0	2750,2906	
	99	2557,5581			99	2557,5581			99	2523,2558			99	2523,2558	
	t=	13:33 min			t=	13:35 min			t=	13:48 min			t=	13:48 min	
Costo por actividad	0	2614,5348		Costo por actividad	0	2586,9186		Costo por actividad	0	2695,0581		Costo por actividad	0	2695,0581	
	99	2457,5581			99	2457,5581			99	2457,5581			99	2457,5581	
	t=	13:32 min			t=	15:36 min			t=	17:52 min			t=	17:52 min	
% DUE DATE		0,15				0,15				0,15				0,15	
N=	Población inicial	150		N=	Población inicial	150		N=	Población inicial	150		N=	Población inicial	150	
Pc=	P cruce	0,7		Pc=	P cruce	0,7		Pc=	P cruce	0,7		Pc=	P cruce	0,7	
Pm=	P mutación	0,1		Pm=	P mutación	0,1		Pm=	P mutación	0,1		Pm=	P mutación	0,1	
Cm=	Condición de memético	20		Cm=	Condición de memético	20		Cm=	Condición de memético	20		Cm=	Condición de memético	20	
Crossover		UN PUNTO		Crossover		DOS PUNTOS		Crossover		HÍBRIDO		Crossover		HÍBRIDO	
No. de generaciones		100		No. de generaciones		100		No. de generaciones		100		No. de generaciones		100	
Costo acumulado	0	2726,7441		Costo acumulado	0	2719,4767		Costo acumulado	0	2773,8372		Costo acumulado	0	2773,8372	
	99	2557,5581			99	2557,5581			99	2557,5581			99	2557,5581	
	t=	18:47 min			t=	22:21 min			t=	22:1 min			t=	22:1 min	
Costo por actividad	0	2576,4534		Costo por actividad	0	2616,279		Costo por actividad	0	2629,6511		Costo por actividad	0	2629,6511	
	99	2457,5581			99	2457,5581			99	2464,2441			99	2464,2441	
	t=	17:47 min			t=	21:27 min			t=	20:49 min			t=	20:49 min	
% DUE DATE		0,15													
N=	Población inicial	150		N=	Población inicial	150		N=	Población inicial	150		N=	Población inicial	150	
Pc=	P cruce	0,5		Pc=	P cruce	0,5		Pc=	P cruce	0,5		Pc=	P cruce	0,5	
Pm=	P mutación	0,3		Pm=	P mutación	0,3		Pm=	P mutación	0,3		Pm=	P mutación	0,3	
Cm=	Condición de memético	10		Cm=	Condición de memético	10		Cm=	Condición de memético	10		Cm=	Condición de memético	10	
Crossover		UN PUNTO		Crossover		DOS PUNTOS		Crossover		HÍBRIDO		Crossover		HÍBRIDO	
No. de generaciones		100		No. de generaciones		100		No. de generaciones		100		No. de generaciones		100	
Costo acumulado	0	2744,4767		Costo acumulado	0	2650,5813		Costo acumulado	0	2811,6279		Costo acumulado	0	2811,6279	
	99	2564,2441			99	2564,2441			99	2557,5581			99	2557,5581	
	t=	14:36 min			t=	15:23 min			t=	13:40 min			t=	13:40 min	
Costo por actividad	0	2617,1511		Costo por actividad	0	2542,1511		Costo por actividad	0	2564,2441		Costo por actividad	0	2564,2441	
	99	2468,8953			99	2457,5581			99	2464,2441			99	2464,2441	
	t=	13:47 min			t=	16:40 min			t=	14:18 min			t=	14:18 min	
% DUE DATE		0,15				0,15				0,15				0,15	
N=	Población inicial	150		N=	Población inicial	150		N=	Población inicial	150		N=	Población inicial	150	
Pc=	P cruce	0,5		Pc=	P cruce	0,5		Pc=	P cruce	0,5		Pc=	P cruce	0,5	
Pm=	P mutación	0,3		Pm=	P mutación	0,3		Pm=	P mutación	0,3		Pm=	P mutación	0,3	
Cm=	Condición de memético	20		Cm=	Condición de memético	20		Cm=	Condición de memético	20		Cm=	Condición de memético	20	
Crossover		UN PUNTO		Crossover		DOS PUNTOS		Crossover		HÍBRIDO		Crossover		HÍBRIDO	
No. de generaciones		100		No. de generaciones		100		No. de generaciones		100		No. de generaciones		100	
Costo acumulado	0	2696,5116		Costo acumulado	0	2784,0116		Costo acumulado	0	2750		Costo acumulado	0	2750	
	99	2557,5581			99	2557,5581			99	2557,5581			99	2557,5581	
	t=	26:37 min			t=	23:16 min			t=	21:9 min			t=	21:9 min	
Costo por actividad	0	2677,9069		Costo por actividad	0	2563,6627		Costo por actividad	0	2606,3953		Costo por actividad	0	2606,3953	
	99	2438,9534			99	2464,2441			99	2457,5581			99	2457,5581	
	t=	22:32 min			t=	21:17 min			t=	22:14 min			t=	22:14 min	

60 JOBS 200-50

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2709,3023
	99 2557,5581
	t= 12:37 min
Costo por actividad	0 2638,0813
	99 2457,5581
	t= 13:21 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2710,7558
	99 2553,779
	t= 13:41 min
Costo por actividad	0 2657,8488
	99 2457,5581
	t= 14:14 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2741,5697
	99 2564,2441
	t= 13:44 min
Costo por actividad	0 2622,9651
	99 2457,5581
	t= 12:10 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2686,3372
	99 2557,5581
	t= 20:32 min
Costo por actividad	0 2629,6511
	99 2457,5581
	t= 16:23 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2752,3255
	99 2557,5581
	t= 18:12 min
Costo por actividad	0 2605
	99 2457,5581
	t= 18:45 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2775,5813
	99 2557,5581
	t= 17:46 min
Costo por actividad	0 2694,4767
	99 2457,5581
	t= 18:29 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2796,8023
	99 2557,5581
	t= 13:28 min
Costo por actividad	0 2557,2674
	99 2457,5581
	t= 14:49 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2626,4534
	99 2557,5581
	t= 14:16 min
Costo por actividad	0 2491,8604
	99 2457,5581
	t= 14:44 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2691,8604
	99 2557,5581
	t= 12:31 min
Costo por actividad	0 2575,2906
	99 2457,5581
	t= 15:11 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2720,9302
	99 2557,5581
	t= 18:14 min
Costo por actividad	0 2683,4302
	99 2457,5581
	t= 18:49 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2717,1511
	99 2557,5581
	t= 19:55 min
Costo por actividad	0 2707,2674
	99 2457,5581
	t= 14:44 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2733,7209
	99 2557,5581
	t= 14:46 min
Costo por actividad	0 2650,872
	99 2457,5581
	t= 17:19 min

60 JOBS 200-50

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2695,9302
	99 2564,2441
t=	13:21 min
Costo por actividad	0 2579,9418
	99 2457,5581
t=	12:3 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2728,4883
	99 2557,5581
t=	13:25 min
Costo por actividad	0 2637,7906
	99 2457,5581
t=	11:55 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2672,6744
	99 2557,5581
t=	12:20 min
Costo por actividad	0 2664,5348
	99 2457,5581
t=	12:31 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2743,6046
	99 2557,5581
t=	16:2 min
Costo por actividad	0 2653,779
	99 2457,5581
t=	18:20 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2706,686
	99 2557,5581
t=	17:1 min
Costo por actividad	0 2690,9883
	99 2464,2441
t=	17:23 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2664,8255
	99 2557,5581
t=	18:39 min
Costo por actividad	0 2649,1279
	99 2457,5581
t=	17:21 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2665,1162
	99 2557,5581
t=	13:58 min
Costo por actividad	0 2577,6162
	99 2457,5581
t=	13:37 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2690,9883
	99 2536,9186
t=	14:20 min
Costo por actividad	0 2568,8953
	99 2457,5581
t=	13:43 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2767,4418
	99 2557,5581
t=	11:15 min
Costo por actividad	0 2611,6279
	99 2457,5581
t=	10:38 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2729,6511
	99 2557,5581
t=	15:23 min
Costo por actividad	0 2617,7325
	99 2457,5581
t=	16:51 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2679,6511
	99 2557,5581
t=	17:46 min
Costo por actividad	0 2561,6279
	99 2457,5581
t=	14:21 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 2818,0232
	99 2557,5581
t=	16:52 min
Costo por actividad	0 2611,9168
	99 2457,5581
t=	19:10 min

90 JOBS 100-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3310,0775
	99 3213,9534
t=	18:41 min
Costo por actividad	0 3127,1317
	99 3113,9534
t=	18:44 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3463,9534
	99 3213,9534
t=	17:3 min
Costo por actividad	0 3200,3875
	99 3113,9534
t=	18:30 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3308,1395
	99 3213,9534
t=	18:25 min
Costo por actividad	0 3279,6511
	99 3113,9534
t=	17:13 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3288,1782
	99 3213,9534
t=	32:43:00
Costo por actividad	0 3168,4108
	99 3113,9534
t=	36:43 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3293,217
	99 3213,9534
t=	29:19 min
Costo por actividad	0 3269,5736
	99 3113,9534
t=	30:56 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3267,0542
	99 3213,9534
t=	34:45 min
Costo por actividad	0 3177,7131
	99 3113,9534
t=	32:3 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3304,8449
	99 3213,9534
t=	17:23
Costo por actividad	0 3167,0542
	99 3113,9534
t=	16:32 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3279,0697
	99 3213,9534
t=	18:5 min
Costo por actividad	0 3136,0465
	99 3113,9534
t=	17:20 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3253,2945
	99 3213,9534
t=	18:40 min
Costo por actividad	0 3190,1162
	99 3113,9534
t=	16:43 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3265,5038
	99 3213,9534
t=	35:47 min
Costo por actividad	0 3190,1162
	99 3113,9534
t=	34:38 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3239,1472
	99 3213,9534
t=	34:59 min
Costo por actividad	0 3184,496
	99 3113,9534
t=	40:22 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3290,1162
	99 3213,9534
t=	34:37 min
Costo por actividad	0 3139,1472
	99 3113,9534
t=	34:24 min

90 JOBS 100-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3372,2868
	99 3213,9534
t=	17:27 min
Costo por actividad	0 3158,7209
	99 3113,9534
t=	18:4 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3296,124
	99 3213,9534
t=	20:47 min
Costo por actividad	0 3165,6976
	99 3113,9534
t=	18:50

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3280,4263
	99 3213,9534
t=	20:6 min
Costo por actividad	0 3161,6279
	99 3113,9534
t=	19:15 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3275,3875
	99 3213,9534
t=	36:4 min
Costo por actividad	0 3222,4806
	99 3113,9534
t=	34:39 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3369,9612
	99 3213,9534
t=	41:7 min
Costo por actividad	0 3216,6666
	99 3113,9534
t=	34:38 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3350,9689
	99 3213,9534
t=	28:6 min
Costo por actividad	0 3192,4418
	99 3113,9534
t=	30:21 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3375,9689
	99 3213,9534
t=	16:39 min
Costo por actividad	0 3161,6279
	99 3113,9534
t=	17:28 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3393,4108
	99 3213,9534
t=	18:1 min
Costo por actividad	0 3301,3565
	99 3213,9534
t=	18:33 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3178,2945
	99 3113,9534
t=	17:50 min
Costo por actividad	0 3265,31
	99 3113,9534
t=	19:34 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3333,9147
	99 3213,9534
t=	35:40 min
Costo por actividad	0 3176,3565
	99 3113,9534
t=	34:48 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3285,4651
	99 3213,9534
t=	36:46 min
Costo por actividad	0 3161,6279
	99 3113,9534
t=	33:57 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3371,7054
	99 3213,9534
t=	34:48 min
Costo por actividad	0 3156,7829
	99 3113,9534
t=	34:19 min

90 JOBS 150-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3279,8449
	99 3213,9534
t=	25:22 min
Costo por actividad	0 3196,7054
	99 3113,9534
t=	30:59 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3265,6976
	99 3213,9534
t=	27:36 min
Costo por actividad	0 3188,1782
	99 3113,9534
t=	35:55 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3319,7674
	99 3213,9534
t=	28:12 min
Costo por actividad	0 3206,9767
	99 3113,9534
t=	28:53 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3301,5503
	99 3213,9534
t=	55:58 min
Costo por actividad	0 3196,8992
	99 3113,9534
t=	53:19 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3305,6201
	99 3213,9534
t=	51:37 min
Costo por actividad	0 3154,8449
	99 3113,9534
t=	42:10 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3302,3255
	99 3213,9534
t=	49:25 min
Costo por actividad	0 3216,279
	99 3113,9534
t=	50:30 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3392,4418
	99 3213,9534
t=	29:34 min
Costo por actividad	0 3260,2713
	99 3113,9534
t=	28:43 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3288,1782
	99 3213,9534
t=	25:35 min
Costo por actividad	0 3301,5503
	99 3113,9534
t=	27:59 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3260,4651
	99 3213,9534
t=	28:15 min
Costo por actividad	0 3227,7131
	99 3113,9534
t=	27:59 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3276,3565
	99 3213,9534
t=	54:38 min
Costo por actividad	0 3232,3643
	99 3113,9534
t=	53:44 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3288,1782
	99 3213,9534
t=	51:16 min
Costo por actividad	0 3178,2945
	99 3113,9534
t=	54:8 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3317,0542
	99 3213,9534
t=	54:24 min
Costo por actividad	0 3200,3875
	99 3113,9534
t=	49:54 min

90 JOBS 150-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3288,1782
	99 3213,9534
	t= 29:17 min
Costo por actividad	0 3170,5426
	99 3113,9534
	t= 28:51 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3306,3953
	99 3213,9534
	t= 23:31 min
Costo por actividad	0 3153,6821
	99 3113,9534
	t= 23:55 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3317,8294
	99 3213,9534
	t= 27:32 min
Costo por actividad	0 3204,8449
	99 3113,9534
	t= 27:17 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3279,8449
	99 3213,9534
	t= 54:1 min
Costo por actividad	0 3172,2868
	99 3113,9534
	t= 50:39 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3318,217
	99 3213,9534
	t= 52:31 min
Costo por actividad	0 3177,9069
	99 3113,9534
	t= 50:22 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3296,8992
	99 3213,9534
	t= 49:14 min
Costo por actividad	0 3200
	99 3113,9534
	t= 54:32 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3320,7364
	99 3213,9534
	t= 33:58 min
Costo por actividad	0 3245,9302
	99 3113,9534
	t= 31:37 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3294,3798
	99 3213,9534
	t= 31:6 min
Costo por actividad	0 3286,8217
	99 3213,9534
	t= 30:55 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3322,4806
	99 3213,9534
	t= 25:5 min
Costo por actividad	0 3167,0542
	99 3113,9534
	t= 27:19 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3282,9457
	99 3213,9534
	t= 53:3 min
Costo por actividad	0 3199,4186
	99 3113,9534
	t= 50:5 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3288,372
	99 3213,9534
	t= 46:16 min
Costo por actividad	0 3200,5813
	99 3113,9534
	t= 46:8 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 3307,3643
	99 3213,9534
	t= 46:14 min
Costo por actividad	0 3151,7441
	99 3113,9534
	t= 48:14 min

90 JOBS 200-50

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3278,2945
	99 3213,9534
t=	16:31 min
Costo por actividad	0 3263,5658
	99 3113,9534
t=	19:32 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3297,8682
	99 3213,9534
t=	19:11 min
Costo por actividad	0 3202,9069
	99 3113,9534
t=	19:20 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3329,0697
	99 3213,9534
t=	18:58 min
Costo por actividad	0 3244,186
	99 3113,9534
t=	15:2 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3283,3333
	99 3213,9534
t=	29:40 min
Costo por actividad	0 3243,7984
	99 3113,9534
t=	32:56 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3379,6511
	99 3213,9534
t=	33:40 min
Costo por actividad	0 3196,5116
	99 3113,9534
t=	30:21 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3268,4108
	99 3213,9534
t=	30:30 min
Costo por actividad	0 3162,4031
	99 3113,9534
t=	32:5 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3260,4651
	99 3213,9534
t=	18:28 min
Costo por actividad	0 3248,062
	99 3113,9534
t=	16:2 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3295,9302
	99 3213,9534
t=	18:55 min
Costo por actividad	0 3173,062
	99 3113,9534
t=	19:55 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3345,7364
	99 3213,9534
t=	19:41 min
Costo por actividad	0 3190,1162
	99 3113,9534
t=	19:10 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3278,2945
	99 3213,9534
t=	35:39 min
Costo por actividad	0 3172,2868
	99 3113,9534
t=	37:49 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3253,6821
	99 3213,9534
t=	29:36 min
Costo por actividad	0 3188,1782
	99 3113,9534
t=	29:14 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3287,7906
	99 3213,9534
t=	29:28 min
Costo por actividad	0 3190,1162
	99 3113,9534
t=	31:46 min

90 JOBS 200-50

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3286,0465
	99 3213,9534
	t= 17:36 min
Costo por actividad	0 3161,6279
	99 3113,9534
	t= 17:51 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3426,9379
	99 3213,9534
	t= 19:25 min
Costo por actividad	0 3175,3875
	99 3113,9534
	t= 20:8 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3324,4186
	99 3213,9534
	t= 17:12 min
Costo por actividad	0 3153,6821
	99 3113,9534
	t= 15:37 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3301,5503
	99 3213,9534
	t= 31:24 min
Costo por actividad	0 3195,155
	99 3113,9534
	t= 30:4 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3299,8062
	99 3213,9534
	t= 34:22 min
Costo por actividad	0 3162,4031
	99 3113,9534
	t= 35:35 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3278,2945
	99 3213,9534
	t= 34:6 min
Costo por actividad	0 3190,1162
	99 3113,9534
	t= 36:4 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3281,9767
	99 3213,9534
	t= 17:7 min
Costo por actividad	0 3191,6666
	99 3113,9534
	t= 18:12 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3313,1782
	99 3213,9534
	t= 17:30 min
Costo por actividad	0 3200,1937
	99 3113,9534
	t= 15:53 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3289,5348
	99 3213,9534
	t= 17:52 min
Costo por actividad	0 3194,9612
	99 3113,9534
	t= 18:51 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3261,6279
	99 3213,9534
	t= 31:35 min
Costo por actividad	0 3230,2325
	99 3113,9534
	t= 35:23 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3273,062
	99 3213,9534
	t= 41:50 min
Costo por actividad	0 3178,2945
	99 3113,9534
	t= 34:56 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 3288,1782
	99 3213,9534
	t= 36:31 min
Costo por actividad	0 3227,7131
	99 3113,9534
	t= 35:43 min

120 JOBS 100-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4546,8706
	99 4058,6926
t=	23:7 min
Costo por actividad	0 4322,6703
	99 3931,5716
t=	24:42 min

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4559,388
	99 4083,4492
t=	26:10 min
Costo por actividad	0 4784,9791
	99 3973,9916
t=	25:33 min

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4611,5438
	99 4071,4881
t=	26:54 min
Costo por actividad	0 4348,5396
	99 3929,9026
t=	28:15 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4524,8956
	99 4032,6842
t=	42:58 min
Costo por actividad	0 4490,9596
	99 3939,082
t=	38:2 min

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4337,5521
	99 4052,1557
t=	38:36 min
Costo por actividad	0 4592,6286
	99 3988,0389
t=	45:14 min

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4474,5479
	99 4030,7371
t=	48:54 min
Costo por actividad	0 4689,2906
	99 3978,8595
t=	48:55 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4676,0778
	99 4058,2753
t=	20:44 min
Costo por actividad	0 4590,6815
	99 4000,139
t=	26:6 min

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4493,1849
	99 4041,5855
t=	30:22 min
Costo por actividad	0 4398,331
	99 3984,1446
t=	24:37 min

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4424,8956
	99 4052,1557
t=	25:34 min
Costo por actividad	0 4270,9318
	99 3932,6842
t=	25:9 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4841,1682
	99 4088,4561
t=	42:29 min
Costo por actividad	0 4355,6328
	99 3957,4408
t=	37:46 min

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4308,7621
	99 4053,9638
t=	42:17 min
Costo por actividad	0 4650,6258
	99 4022,114
t=	49:24 min

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4325,3129
	99 4092,9068
t=	55:9 min
Costo por actividad	0 4533,3796
	99 3941,5855
t=	39:38 min

120 JOBS 100-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4741,3073
	99 4072,8789
t=	23:51 min
Costo por actividad	0 4457,8581
	99 4066,203
t=	19:22 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4587,0653
	99 4151,0431
t=	23:59 min
Costo por actividad	0 4503,8942
	99 3974,5479
t=	21:11 min

N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4517,9415
	99 4043,6717
t=	19:51 min
Costo por actividad	0 4639,2211
	99 3985,1182
t=	22:8 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4452,8511
	99 4031,5716
t=	42:44 min
Costo por actividad	0 4384,7009
	99 4012,9346
t=	41:57 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4426,7037
	99 4070,3755
t=	42:19 min
Costo por actividad	0 4458,8317
	99 4013,0737
t=	42:22 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4613,2127
	99 4090,8205
t=	41:9 min
Costo por actividad	0 4390,9596
	99 3961,057
t=	43:31 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4521,9749
	99 4084,84
t=	24:54 min
Costo por actividad	0 4388,178
	99 3964,534
t=	25:26 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4431,5716
	99 4132,5452
t=	22:20 min
Costo por actividad	0 4429,7635
	99 3982,3365
t=	23:38 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4788,3171
	99 4044,9235
t=	22:50 min
Costo por actividad	0 4641,0292
	99 3999,7218
t=	25:14 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4600,9735
	99 4059,8052
t=	44:59 min
Costo por actividad	0 4406,5368
	99 4009,8748
t=	47:24 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4706,5368
	99 4100,4172
t=	46:45 min
Costo por actividad	0 4375,2433
	99 4014,6036
t=	49:11 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	100
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4458,2753
	99 4071,6272
t=	47:32 min
Costo por actividad	0 4318,3588
	99 3979,694
t=	46:13 min

120 JOBS 150-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4454,5201
	99 4015,0208
t=	39:15 min
Costo por actividad	0 4317,107
	99 3940,3337
t=	44:45 min

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4519,4714
	99 4041,5855
t=	42:23 min
Costo por actividad	0 4845,6189
	99 3946,8706
t=	38:51 min

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4669,9582
	99 4078,3031
t=	41:56 min
Costo por actividad	0 4368,0111
	99 3960,9179
t=	31:21 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4603,8942
	99 4065,5076
t=	01:07:59
Costo por actividad	0 4378,8595
	99 3936,8567
t=	01:08:52

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4440,0556
	99 4063,4214
t=	01:10:32
Costo por actividad	0 4911,6828
	99 3967,0375
t=	01:07:47

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4632,4061
	99 4038,2475
t=	01:09:04
Costo por actividad	0 4425,1738
	99 3918,2197
t=	01:17:11

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4531,7107
	99 4040,0556
t=	42:37 min
Costo por actividad	0 4661,7524
	99 3953,4075
t=	36:12 min

N= Población inicial	150
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4675,3824
	99 4066,6203
t=	33:52 min
Costo por actividad	0 4292,7677
	99 3952,9902
t=	36:45 min

N= Población inicial	150
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4627,3991
	99 4074,687
t=	41:49 min
Costo por actividad	0 4386,9262
	99 3958,8317
t=	31:20 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4502,0862
	99 4064,3949
t=	01:11:10
Costo por actividad	0 4574,1488
	99 3958,8317
t=	01:04:37

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4478,1641
	99 4115,7162
t=	01:08:31
Costo por actividad	0 4559,5271
	99 3922,8094
t=	01:15

N= Población inicial	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4517,2461
	99 4072,6008
t=	01:15:32
Costo por actividad	0 4517,5243
	99 3963,6995
t=	58:30 min

120 JOBS 150-100

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4513,2127
	99 4098,47
t=	49:10 min
Costo por actividad	0 4463,0041
	99 4002,2253
t=	42:26 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4501,5299
	99 4083,5883
t=	42:14 min
Costo por actividad	0 4466,6203
	99 3998,47
t=	44:47 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4544,9235
	99 4053,5465
t=	40:9 min
Costo por actividad	0 4501,3908
	99 3942,1418
t=	38:52 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4443,5326
	99 4070,2364
t=	01:16:06
Costo por actividad	0 4460,9179
	99 3984,84
t=	01:25:59

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4551,7385
	99 4034,2141
t=	01:20:54
Costo por actividad	0 4361,8915
	99 3929,6244
t=	01:11:29

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4725,452
	99 4116,8289
t=	01:08:01
Costo por actividad	0 4487,8998
	99 3989,986
t=	01:07:50

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4653,4075
	99 4100,9735
t=	33:37 min
Costo por actividad	0 4403,1988
	99 3923,3657
t=	41:17 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4597,4965
	99 4034,9095
t=	40:16 min
Costo por actividad	0 4582,3365
	99 3979,694
t=	32:42 min

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4539,3602
	99 4064,2559
t=	34:57 min
Costo por actividad	0 4470,0973
	99 3996,3838
t=	38:35 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4882,0584
	99 4080,3894
t=	1h:24:24
Costo por actividad	0 4374,2698
	99 3980,3894
t=	1h:19:22

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4727,5382
	99 4113,63
t=	1h:09:50
Costo por actividad	0 4538,9429
	99 3991,7941
t=	1h:12:35

N= Población inicial	150
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	100
Costo acumulado	0 4753,5465
	99 4026,7037
t=	01:17:34
Costo por actividad	0 4467,872
	99 3985,1182
t=	1h:15:47

120 JOBS 200-50

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4604,3115
	99 4047,4269
	t= 25:59 min
Costo por actividad	0 4506,2586
	99 3991,0987
	t= 25:15 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4529,4853
	99 4064,534
	t= 28:12 min
Costo por actividad	0 4478,3031
	99 3981,9193
	t= 27:5 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4647,8442
	99 4065,3685
	t= 23:40 min
Costo por actividad	0 4348,6787
	99 3955,6328
	t= 22:38 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4365,7858
	99 4096,5229
	t= 48:5 min
Costo por actividad	0 4402,6425
	99 3950,904
	t= 47:51 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4494,5757
	99 4059,9443
	t= 51:46 min
Costo por actividad	0 4375,3824
	99 3951,8776
	t= 43:15 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,9
Pm= P mutación	0,05
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4577,7468
	99 4047,8442
	t= 48:47 min
Costo por actividad	0 4584,2837
	99 3939,6383
	t= 37:34 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4434,2141
	99 4100,6954
	t= 22:33 min
Costo por actividad	0 4398,7482
	99 3993,0458
	t= 22:24 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4547,8442
	99 4085,9527
	t= 24:37 min
Costo por actividad	0 4580,1112
	99 3964,6731
	t= 25:35 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4678,9986
	99 4075,1043
	t= 20:34 min
Costo por actividad	0 4546,0361
	99 3949,9304
	t= 20:29 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4564,2559
	99 4042,42
	t= 49:22 min
Costo por actividad	0 4507,2322
	99 3962,4478
	t= 45:43 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4696,1057
	99 4073,5744
	t= 50:43 min
Costo por actividad	0 4474,9652
	99 3984,7009
	t= 40:1 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,75
Pm= P mutación	0,2
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4554,9374
	99 4051,3212
	t= 45:38 min
Costo por actividad	0 4561,8915
	99 3953,4075
	t= 48:20 min

120 JOBS 200-50

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4616,5507
	99 4135,8831
t=	20:8 min
Costo por actividad	0 4397,0792
	99 3928,2336
t=	20:39 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4487,7607
	99 4080,9457
t=	23:27 min
Costo por actividad	0 4818,4979
	99 4002,5034
t=	25:26 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4381,502
	99 4056,3282
t=	21:30 min
Costo por actividad	0 4258,2753
	99 3979,4158
t=	23:20 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4614,8817
	99 4076,0778
t=	42:40 min
Costo por actividad	0 4424,3393
	99 3979,2767
t=	47:31 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4534,0751
	99 4083,171
t=	48:16 min
Costo por actividad	0 4589,5688
	99 3949,5132
t=	50:2 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,7
Pm= P mutación	0,1
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4588,0389
	99 4076,356
t=	43:45 min
Costo por actividad	0 4435,1877
	99 4017,107
t=	37:15 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4560,6397
	99 4104,4506
t=	29:26 min
Costo por actividad	0 4336,0222
	99 4000,5563
t=	26:35 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4515,0208
	99 4094,993
t=	27:10min
Costo por actividad	0 4550,3477
	99 4016,2726
t=	27:29 min

N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	10
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4576,9123
	99 4064,534
t=	24:21 min
Costo por actividad	0 4485,9527
	99 3946,7315
t=	26:31 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	UN PUNTO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4517,5243
	99 4086,509
t=	46:26 min
Costo por actividad	0 4473,8525
	99 3994,7148
t=	49:45 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	DOS PUNTOS
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4422,6703
	99 4052,573
t=	37:22 min
Costo por actividad	0 4349,3741
	99 3980,9457
t=	42:30 min

% DUE DATE	0,15
N= Población inicial	200
Pc= P cruce	0,5
Pm= P mutación	0,3
Cm= Condición de memético	20
Crossover	HÍBRIDO
No. de generaciones	50
Costo acumulado	0 4668,9847
	99 4079,1376
t=	37:28 min
Costo por actividad	0 4505,8414
	99 3956,6063
t=	42:40 min

Anexo 2. ARTÍCULO “MEMETIC ALGORITHM TO MINIMIZE COSTS OF ACTIVITIES IN RCPSP”