

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY.**

**Secuenciación de tareas en una máquina con tiempos de preparación dependientes  
de la secuencia y mantenimiento periódico**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO  
ACADEMICO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD**

**POR:**

**IRIS ABRIL MARTÍNEZ SALAZAR**

**MONTERREY, N.L.**

**MAYO DE 2007**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que el presente proyecto de tesis presentado por la Ing. Iris Abril Martínez Salazar sea aceptado como requisito parcial para obtener el grado académico de:

**Maestra en Ciencias  
Especialidad en Sistemas de Calidad y Productividad**

Comité de Tesis:

---

Dr. Francisco R. Ángel Bello Acosta  
Asesor

---

Dra. Ada Álvarez Socarrás  
Sinodal

---

Dr. José Luis González Velarde  
Sinodal

Aprobado

---

Dr. Francisco R. Ángel Bello Acosta  
Director del Programa de Graduados en Ingeniería

Mayo, 2007

# Dedicatoria

*A mis padres.*

*Por ser ejemplo a seguir en todos los aspectos, por sus valiosas enseñanzas de vida, por el apoyo constante e incondicional y por todo el amor que siempre me han brindado. Por eso y más, mi agradecimiento infinito.*

## Agradecimientos

A mis hermanos **Hugo y Ana** por ser mis compañeros de vida, mis amigos, cómplices y confidentes, gracias por estar siempre a mi lado y por hacer el camino más divertido.

A **Víctor Gustavo**, por su apoyo, su ayuda, su paciencia y porque a pesar de la distancia estuvo conmigo a lo largo de la realización de este proyecto de investigación, gracias por llegar a mi vida.

A toda mi **familia**, a mis abuelitas, tías, tíos, primas y primos, por estar siempre al pendiente de mi bienestar, gracias por consentirme y por hacer una fiesta de cada logro alcanzado.

A mi asesor, **Francisco Ángel Bello**, por compartir conmigo su tiempo y conocimientos, gracias por su voto de confianza.

A mis **sinodales**, por sus recomendaciones, gracias por ser partícipes de la conclusión de este trabajo de investigación.

A todos mis **amigos** de la maestría, en particular a **Adriz, Ale, Angie, Bruce, Gaby, Gloria, Ime, Karina, Liz, Marcia, Pepe, Pepe V. y Vane** con quienes compartí momentos inolvidables, gracias por sus porras y por hacer de esta etapa de mi vida algo simplemente genial.

A **Almita, Mary Inés y Mary de la Luz**, por sus consejos, ayuda y amistad, gracias por su vocación de servicio.

A todos los que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este documento, gracias por su apoyo.

A **Dios**, por todas las bendiciones con que llena mi vida diariamente, simplemente gracias.

# RESUMEN EJECUTIVO

Tomando en consideración la situación que viven las empresas en la actualidad, donde las máquinas adquieren un papel más vital dentro de la industria, resulta recomendable incluir en el programa de producción, etapas de mantenimiento en las cuales sea posible darle atención a las máquinas con el fin de realizar ajustes, calibraciones o reparar desperfectos que pudieran suscitarse.

Este trabajo de investigación toma como base la importancia del mantenimiento y busca crear un vínculo entre ésta y la planeación de la producción. Para tal efecto, se realizó el diseño de una metodología, que, por medio de la utilización de técnicas metaheurísticas, sea capaz de proporcionar buenas soluciones al problema de secuenciación de tareas en una máquina, con tiempos de preparación dependientes de la secuencia tomando en consideración estados de mantenimiento periódicos.

El procedimiento diseñado consistió en la aplicación del heurístico GRASP (Greedy Random Adaptive Search Procedure) para generar una solución factible de buena calidad. Para después aplicar Búsqueda Tabú en cada sección de la solución factible generada y terminar con un procedimiento de posprocedimiento, todo con el fin de que la solución final que genere el procedimiento diseñado se acerque lo más posible a la solución óptima.

El problema antes descrito, se observa con un enfoque de problema de rutas con restricción de distancias, con el fin de lograr la comprensión total del problema y de contar con bases de datos que permitan que los resultados arrojados por el programa puedan ser comparados.

Los resultados obtenidos, los cuales se presentan en este documento, demuestran habilidad del programa en generar soluciones buenas para el problema bajo análisis, tanto para instancias simétricas como asimétricas.

# CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1    MOTIVACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.2    DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3    OBJETIVOS.....	4
1.4    HIPÓTESIS.....	4
1.5    JUSTIFICACIÓN.....	5
1.6    MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	5
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>8</b>
<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>8</b>
2.1    INTRODUCCIÓN.....	8
2.2    SECUENCIACIÓN DE TAREAS EN UNA MÁQUINA.....	9
2.2.1 <i>Relevancia de la secuenciación de tareas en una máquina</i> .....	9
2.2.2 <i>Secuenciación de tareas en una máquina con costos</i> .....	10
2.2.3 <i>Secuenciación en una máquina con tiempos de preparación independientes</i> .....	11
2.2.4 <i>Secuenciación en una máquina con tiempos de preparación dependientes</i> .....	12
2.3    MANTENIMIENTO.....	13
2.3.1 <i>Relevancia del mantenimiento</i> .....	13
2.3.2 <i>Mantenimiento preventivo</i> .....	16
2.3.3 <i>Mantenimiento periódico o basado en tiempo</i> .....	16
2.4    LA SECUENCIACIÓN DE TAREAS Y EL MANTENIMIENTO.....	17
2.4.1 <i>Secuenciación con restricciones de disponibilidad de las máquinas</i> .....	18
2.5    EL PROBLEMA DE RUTAS DE VEHÍCULOS CON RESTRICCIÓN DE DISTANCIA.....	20
2.6    MÉTODOS HEURÍSTICOS.....	22
2.6.1 <i>GRASP</i> .....	22
2.6.2 <i>Búsqueda Tabú</i> .....	25
2.7    CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO MARCO TEÓRICO.....	27
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>28</b>
<b>FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.....</b>	<b>28</b>
3.1    INTRODUCCIÓN.....	28
3.3    DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	32
3.3.1 <i>Descripción de la fase constructiva del GRASP</i> .....	32
3.3.2 <i>Búsqueda Tabú</i> .....	35
3.3.3 <i>Posprocesamiento</i> .....	39
3.3.4 <i>Instancias</i> .....	41
3.4    CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO DE FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	42

<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>44</b>
<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>44</b>
4.1 INTRODUCCIÓN A LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	44
4.2 RESULTADOS OBTENIDOS .....	45
4.3 MEJORES SECUENCIAS .....	49
4.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS.....	50
4.5 COMPARACIÓN DE DURACIÓN DVRP .....	51
4.6 DESEMPEÑO DEL PROCEDIMIENTO CON BASES DE DATOS ASIMÉTRICAS.....	55
4.7 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS PARA BASES DE DATOS ASIMÉTRICAS.....	58
4.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	58
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>60</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>60</b>
5.1 CONCLUSIONES .....	60
5.2 RECOMENDACIONES.....	61
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>63</b>

## Índice de figuras

FIGURA 2.1. AGRUPACIÓN DE LAS PÉRDIDAS EN FUNCIÓN DE LOS EFECTOS QUE PROVOCAN. ....	14
FIGURA 2.2. DISTRIBUCIÓN DEL TRABAJO .....	15
FIGURA 2.3. SEUDO-CÓDIGO GRASP .....	23
FIGURA 2.4. SEUDO-CÓDIGO BÚSQUEDA TABÚ .....	26
FIGURA 3.1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA PROBLEMÁTICA A ANALIZAR.....	30
FIGURA 3.2. REPRESENTACIÓN COMO UN PROBLEMA DE RUTAS DE VEHÍCULO CON RESTRICCIÓN DE DISTANCIA .....	31
FIGURA 3.3. DIAGRAMA DE FLUJO DE GRASP.....	37
FIGURA 3.4. DIAGRAMA DE FLUJO DE BÚSQUEDA TABÚ.....	38
FIGURA 3.5. DIAGRAMA DE FLUJO DE ETAPA DE POSPROCESAMIENTO.....	40

## Índice de tablas

TABLA 2.1. EXPLICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR NO MANTENIMIENTO.....	15
TABLA 4.1. TIEMPOS ENTRE MANTENIMIENTOS PARA LAS DIFERENTES INSTANCIAS .....	45
TABLA 4.2. TABLA DE RESULTADOS PARA INSTANCIAS CON 50 TAREAS.....	47
TABLA 4.3. TABLA DE RESULTADOS PARA INSTANCIAS CON 75 TAREAS.....	48
TABLA 4.4. RESULTADOS PRESENTADOS EN LI, SIMCHI-LEVI Y DESROCHER .....	52
TABLA 4.5. RESULTADOS OBTENIDOS POR MEDIO DE LA HEURÍSTICA.....	53
TABLA 4.6. FRACCIONES DE DESEMPEÑO DE LA HEURÍSTICA. ....	54
TABLA 4.7. FRACCIONES DE DESEMPEÑO DE LA HEURÍSTICA. ....	54
TABLA 4.8. TABLA DE RESULTADOS PARA INSTANCIAS CON 44 TAREAS, A045. ....	56
TABLA 4.9. TABLA DE RESULTADOS PARA INSTANCIAS CON 38 TAREAS, A039. ....	56
TABLA 4.10. TABLA DE RESULTADOS PARA INSTANCIAS CON 35 TAREAS, A036.....	57
TABLA 4.11. TABLA DE RESULTADOS PARA INSTANCIAS CON 33 TAREAS, A034.....	57



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Motivación para la investigación

En la actualidad las empresas manufactureras se encuentran inmersas en una situación de competitividad que las obliga a estar en una constante mejora de sus procesos con el fin de incrementar su productividad.

A través de los años, ha venido creciendo la importancia de contar con una función de mantenimiento y por consecuencia con una administración del mantenimiento. La propagación de la mecanización y automatización en la industria, ha reducido la cantidad de personal en el área de producción e incrementado el capital destinado a equipo de producción y estructuras. Como resultado directo de este cambio en la industria, la fracción de empleados que laboran en el área de mantenimiento, así como la fracción de gastos de mantenimiento sobre el total de costos de operación ha crecido a lo largo de los años [13].

Según Garg y Deshmuck, [13], en las empresas manufactureras, tales como las refinerías, es común encontrar que los departamentos de mantenimiento y el de operación sean los más grandes, cada uno puede llegar a comprender el 30 por ciento del total de la fuerza de trabajo. Además, los autores expresan que en segundo lugar, después de los costos por energía, se encuentran los costos de mantenimiento que pueden llegar a formar un gran porcentaje del presupuesto total de operación. Aún así, las interrogantes en torno al mantenimiento no han sido totalmente contestadas debido en parte al grado de complejidad de dicho tópico.

Por otro lado, en los problemas de secuenciación de tareas, por lo general, se supone que las máquinas o procesadores siempre están disponibles para su uso, cuando en la práctica, se detienen por averías y mantenimientos.

Toda máquina, para que pueda funcionar apropiadamente, requiere de mantenimiento que le permita corregir o prevenir los posibles errores que pueden presentarse, por lo que es necesario considerar el programa de mantenimiento en el momento de realizar la planeación de la producción. Según Chen y Liao [6], resulta deseable obtener una secuenciación que tome en consideración de manera simultánea tanto las tareas u órdenes como el mantenimiento que reducirá la tasa de paros por falta de éste.

Graves [17] plantea que la secuenciación de producción puede ser definida como la disposición de los recursos disponibles para la producción a través del tiempo para satisfacer de la mejor manera cierto criterio.

Típicamente los problemas de secuenciación involucran un conjunto de tareas que deben de procesarse, la cantidad y disposición de las máquinas en que deben procesarse las tareas y las medidas a través de las cuales la secuenciación debe ser evaluada. Si lo que interesa es minimizar los costos, que pueden ser de preparación, por entregas tardías, por mantener inventario, entre otros, o si el interés radica en alguna medida del desempeño de la secuenciación, tal como porcentaje de entregas tardías, nivel de utilización de recursos, promedio de tiempo de finalización de algunas tareas, y demás aspectos relacionados.

Garg y Deshmukh [13] se dieron a la tarea de revisar la literatura disponible en el campo de la administración del mantenimiento y recomiendan a los investigadores inmersos en este campo identificar las brechas en la literatura hacia las cuales puedan dirigir sus próximas investigaciones.

A partir de esta recomendación, fue posible identificar un área de oportunidad en el campo de la secuenciación de tareas que contemple un programa de mantenimiento definido con anterioridad. De la literatura revisada, se encontró una pequeña cantidad de artículos relacionados a esta área de investigación y únicamente en uno de ellos [4] se considera tener en cuenta que los costos de preparación de las máquinas pueden ser dependientes de la secuencia.

En la literatura revisada, se encontraron solamente dos trabajos [29] y [20] que abordan el problema de secuenciación de tareas con un programa de mantenimiento para los procesadores. En estos trabajos se considera que los tiempos de preparación de las máquinas no depende de la secuencia en que se procesen las tareas, pero en muchas situaciones reales, el tiempo de preparación de una máquina depende del estado en que se

encuentre y del estado que debe estar para procesar la nueva tarea, es decir, que el tiempo de preparación depende del orden en que se procesen las tareas.

En este trabajo se consideró el problema de determinar la secuencia en que se deben procesar las tareas en una máquina que tiene definido un programa de mantenimiento, con costos de preparación dependientes de la secuencia para minimizar el tiempo de terminación de la última tarea que se procese.

## **1.2 Descripción del problema**

En el problema que se está abordando, se toma el supuesto que, en el momento inicial de tiempo, se cuenta un grupo de tareas que deben ser procesadas por una máquina, donde cada tarea tiene asociado un tiempo de procesamiento en la máquina. Cada vez que se va a procesar una nueva tarea, es necesario realizar un grupo de operaciones y adecuaciones en la máquina que dependen de la tarea que se estaba procesando y de la que va a entrar a procesamiento. Además, para la máquina existe un programa de mantenimiento. Este programa consiste en realizar un mantenimiento a la máquina cada cierto intervalo de tiempo fijo, la duración del mantenimiento es conocida y la preparación de la máquina para el mantenimiento depende de la última tarea que se estaba procesando.

Otro supuesto es, que el tiempo disponible entre dos estados de mantenimiento no es suficiente para procesar todas las tareas, por lo que es necesario programar más de un bloque.

De aquí, el problema a resolver consiste en determinar las tareas que se van a asignar a cada bloque entre dos estados de mantenimiento y el orden en que van a ser procesadas, sin sobrepasar el tiempo disponible para el bloque, de forma tal que se obtenga la menor cantidad posible de bloques y que la última tarea procesada en el último bloque se termine lo antes posible.

Aún conociendo la asignación de tareas a bloques, el problema de secuenciación a resolver en cada bloque es del tipo de un agente viajero (*Traveling Salesman Problem*) que está considerado como un problema NP-duro.

Este problema presenta algunas similitudes con el problema de rutas de vehículos con restricción en la distancia que puede recorrer cada vehículo. El tiempo de preparación más el tiempo de procesamiento de la máquina es equivalente a la distancia entre dos clientes a

visitar, la restricción de tiempo entre dos estados de mantenimiento se puede ver como la distancia máxima que puede recorrer cada vehículo y en el problema de secuenciación el orden en el que se procesan las tareas es equivalente al orden en que se visitan los clientes.

Debido a que el problema descrito, entra en la categoría de los problemas difíciles de optimización combinatoria, se desarrollará un procedimiento metaheurístico para su resolución.

### **1.3 Objetivos**

#### **Objetivo General:**

Diseñar una metodología basada en técnicas metaheurísticas, para la secuenciación de tareas en una máquina, con tiempos de preparación dependientes de la secuencia y que tome en consideración estados de mantenimiento cada cierto intervalo de tiempo fijo.

#### **Objetivos Específicos**

- Analizar los efectos del mantenimiento en un sistema productivo.
- Analizar el efecto del mantenimiento en la secuenciación de tareas con tiempos de preparación dependientes de la secuencia.
- Formular el problema de secuenciación de tareas con tiempos de preparación dependientes de la secuencia y programa de mantenimiento para la máquina.
- Desarrollar el procedimiento miope (*greedy*), adaptativo y aleatorizado para la construcción de una solución inicial, basado en algoritmos de inserción.
- Programar el algoritmo constructivo y probar su desempeño con instancias de prueba, para establecer la eficiencia de la heurística aplicada.
- Desarrollar un procedimiento de mejoramiento de la solución, basado algoritmos de búsqueda local, guiados por búsqueda tabú.
- Programar el procedimiento de mejoramiento y probar su desempeño con instancias de prueba, para establecer la eficiencia de la heurística aplicada.

### **1.4 Hipótesis**

La aplicación de una metodología, basada en técnicas metaheurísticas, para la secuenciación de tareas en una máquina, con tiempos de preparación dependientes de la

secuencia y que tome en consideración estados de mantenimiento cada cierto intervalo de tiempo fijo permite obtener soluciones de calidad en un tiempo computacional razonable al problema propuesto.

## **1.5 Justificación**

En la actualidad existe una situación de alta competitividad en el ambiente industrial, dicha situación provoca que las empresas busquen cada vez más herramientas que les permitan ser mejores y así posicionarse y permanecer en el mercado.

Con la realización de esta investigación, se pretende ofrecer una opción que permita mejorar la eficiencia de operación en un sistema de producción. Dicha mejora, favorecerá el crecimiento de la empresa, tornándola más competitiva.

Los problemas de secuenciación de tareas en una máquina con costos de preparación dependientes de la secuencia y de secuenciación del mantenimiento han sido ampliamente tratados en la literatura, sin embargo, solo fue posible encontrar un artículo reportado que traten estos problemas de forma integrada.

El problema descrito y su procedimiento de solución pueden complementar el contexto teórico de los temas sobre los cuales se está trabajando y favorecer a la mejor toma de decisiones en el ambiente industrial.

La herramienta que se obtendrá como resultado de la investigación, podrá ser aplicada en la industria, logrando que su sistema de producción incremente su productividad, permitiendo a la empresa obtener mejores ingresos los cuales favorecerán de manera directa el crecimiento económico del negocio.

Por otro lado, los resultados de la presente investigación, servirán para favorecer el desarrollo del estado del arte de los temas analizados para este estudio.

## **1.6 Método de investigación**

El método de investigación a utilizar, consiste en los siguientes pasos:

### *1. Recopilación y análisis de artículos de los temas a tratar.*

En esta etapa, se pretende realizar una búsqueda en artículos de revistas de alto prestigio en el área donde radica el problema a tratar. Dichos documentos serán estudiados y analizados para determinar su relevancia con esta investigación.

## *2. Formulación del problema a analizar.*

Una vez analizados los artículos, se utilizará el conocimiento adquirido para formulación de un problema que permita describir la situación de la secuenciación de tareas en una máquina con tiempos de preparación dependientes de la secuencia, considerando etapas de mantenimiento periódico.

## *3. Búsqueda y obtención de instancias.*

Con el fin de poder validar los resultados arrojados por la heurística seleccionada, se requiere contar con bases de datos de problemas así como referencias de buenas soluciones obtenidas por otros investigadores, solo así será posible determinar la eficiencia de la heurística.

## *4. Aplicación de la heurística de construcción.*

Se diseñará y programará en lenguaje C++ un procedimiento heurístico constructivo, basado en algoritmos de inserción para el TSP, que permita obtener soluciones buenas en un tiempo computacional razonable al problema.

## *5. Aplicación de la heurística de mejoramiento de las soluciones iniciales*

A las soluciones iniciales obtenidas, se les aplicará un procedimiento de mejoramiento, el cual también será diseñado y programado en lenguaje C++. Se espera que con este procedimiento de posprocesamiento se mejoren las soluciones iniciales obtenidas.

## *6. Comparación de resultados finales.*

Los resultados obtenidos a través del método heurístico de posprocesamiento serán comparados con las mejores soluciones encontradas en la literatura para las respectivas instancias. Determinando así efectividad del heurístico de posprocesamiento diseñado.

## **1.7 Estructura de la tesis.**

El trabajo de tesis está compuesto por cinco capítulos. En este capítulo se realizó la presentación al tema de investigación, mediante el análisis de los antecedentes, se destacó la relevancia de considerar al mantenimiento parte del sistema de producción y fue posible percatarse del área de oportunidad existente en la integración del mantenimiento en los problemas de secuenciación de tareas en una máquina con costos de preparación dependientes de la secuencia. Además, se describe el problema a resolver, se definen los

objetivos de la investigación, se formula la hipótesis que se quiere probar y se propone una metodología a seguir para realizar el trabajo de investigación.

El capítulo 2 es de marco teórico, donde se hace una discusión de la bibliografía referente a tema y se da una descripción de los conceptos, métodos y algoritmos que se utilizaran en el desarrollo de este trabajo de tesis.

En el capítulo 3 se realiza una formulación del problema a resolver y se describen los algoritmos y procedimientos que conforman la metodología propuesta de solución.

El capítulo 4 es de discusión de resultados. Aquí se presenta el comportamiento de la metodología de solución propuesta y se comparan los resultados obtenidos con algunos reportados en la literatura para el problema de rutas de vehículos con restricciones en la distancia que puede recorrer cada vehículo.

El capítulo 5 es el de conclusiones y recomendaciones. Aquí se resaltan los principales logros y limitaciones de los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, así como se dan una serie de recomendaciones para trabajos futuros, en relación con el desarrollo de metodologías similares para el problema con diferentes objetivos y con la generalización de los resultados obtenidos para máquinas en paralelo.

## **CAPÍTULO 2.**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Introducción.**

El objetivo de este capítulo es presentar de una manera condensada el estado del arte de conceptos afines con la investigación, para tal efecto en el documento se plasman temáticas relacionadas con secuenciación de tareas en una máquina, mantenimiento, problema de rutas de vehículos con restricción de distancia, así como una breve descripción de los métodos GRASP y Búsqueda Tabú como herramienta en la obtención de buenas soluciones factibles.

En primera instancia, se explican brevemente la problemática en torno de la secuenciación de tareas en una máquina, exponiendo las líneas de estudio que han sido seguidas por investigadores, supuestos tomados, ahondando sobre el tema específico de tiempos de preparación dependientes e independientes.

Se aborda de manera concreta el aspecto de mantenimiento de la maquinaria, sus características, clasificación e importancia de ser tomado en cuenta como parte inherente de un sistema de producción, estudios anteriores sobre mantenimiento y secuenciación.

Se incluye de igual forma información sobre el problema de rutas de vehículos con restricción de distancia, estableciendo el tipo de situaciones que abarca y sus características, presentando el modelo clásico para representar la situación y sus condiciones.

Para finalizar, se aborda el tema de métodos metaheurísticos, como primer punto se presenta el método GRASP como una heurística de construcción, se exponen sus características principales, principales aplicaciones y demás aspectos generales de la



heurística; para después proceder con una breve explicación de la metaheurística de Búsqueda Tabú, así como sus principales características.

## **2.2 Secuenciación de tareas en una máquina**

La secuenciación de tareas se considera dentro de los problemas de determinar el orden de procesamiento de una serie de tareas para optimizar cierto criterio de desempeño, teniendo en cuenta los recursos disponibles. Consiste en ordenar de la mejor manera un conjunto de tareas para su procesamiento en una sola máquina. Cada tarea requiere un tiempo de procesamiento diferente.

Según Türkcan [41] la secuenciación es el proceso de asignar actividades a recursos a través del tiempo. En el caso general, la secuenciación es un proceso de toma de decisiones puesto que se decide cuando una actividad debe de comenzar y que recurso debe ser usado para cada actividad. El problema de secuenciación es un problema basado en restricciones. Una variedad de restricciones tales como la duración de la actividad, liberación de la tarea, fechas de entrega, restricciones de precedencia y disponibilidad de recursos pueden afectar directamente a la secuenciación.

### **2.2.1 Relevancia de la secuenciación de tareas en una máquina**

Pinedo [33] expuso la importancia de analizar los modelos de secuenciación de tareas en una máquina. Según este autor, una de las principales razones de la relevancia del estudio de la secuenciación de tareas en una máquina es que el ambiente en el que se presenta la problemática es muy sencillo y fácil de entender y puede formar la base para casos especiales de todos los otros ambientes. Los modelos de secuenciación en una sola máquina frecuentemente muestran propiedades que no aplican ni para las máquinas en paralelo ni para las máquinas en serie. El resultado que se obtiene de un modelo de secuenciación de tareas en una máquina no sólo permite hacerse una idea de lo que ocurre en un ambiente donde se labora con una sola máquina, también provee las bases para heurísticas que pueden ser aplicadas en ambientes más complejos.

En la práctica, los problemas de secuenciación de ambientes complejos, en lo que respecta a maquinaria, frecuentemente se descomponen en subproblemas que terminan siendo presentados como modelos de secuenciación en una máquina [33].

### **2.2.2 Secuenciación de tareas en una máquina con costos.**

Existen diferentes tipos de problemas de secuenciación en una máquina, por ejemplo puede considerarse que las tareas tienen un tiempo de preparación antes de poder ser procesadas. Allahverdi, Ng, Cheng y Kovalyov [1] realizaron un condensado de problemas de secuenciación con tiempos de preparación y costos, en su artículo mencionan que la importancia y aplicaciones de los modelos de secuenciación con consideraciones explícitas de los tiempos de preparación (costos) se han venido tomando en cuenta en varios estudios desde mediados de los años sesentas. Allahverdi et al [1], recopilaron las más recientes aplicaciones que se han estudiado sobre la secuenciación de tareas tomando en consideración tiempos de preparación, a continuación se enlistan algunas de estas aplicaciones.

- Laguna [23] consideró una planta encargada de producir suministros para fotocopadoras e impresoras láser. Señaló en su artículo que el cambiar la producción de un cartucho a otro resulta en largos tiempos de preparación (generalmente de días).
- La industria textilera requiere de tiempos de preparación significativos que como lo establecen Gendreau, Laporte y Guimara [14] deben de ser considerados como algo aparte. Cuando se fabrica un tipo de tela y se desea cambiar a otro, se deben de realizar cambios cuyo tiempo de ejecución varía dependiendo de el tipo de tela que se quiere fabricar y el que se fabricaba previamente.
- Se ha analizado su aplicación en la producción de semiconductores compuestos que son usados por componentes electrónicos en pantallas de información, telecomunicaciones móviles y comunicación de datos por medios inalámbricos. Kim, Kim, Jang y Chen, [21] señalaron que las máquinas utilizadas en la producción de semiconductores compuestos deben de ser ajustados siempre que diferentes partes sean fabricadas. Se necesitan diferentes tiempos de preparación dependiendo de la secuencia de partes que se deseen fabricar.

- Chang, Hsieh y Wang [5] describieron una fábrica de película de polipropileno que produce productos como cinta adhesiva, álbumes de fotos, empaques de comida, cubiertas para libros, entre otros. Los autores establecieron en su artículo que tanto el tiempo, materia prima y equipo necesario para preparar el siguiente trabajo en la fábrica depende del trabajo que le precede, y por tanto, los tiempos de preparación y costos de preparación son dependientes de la secuencia.

Tal como es posible determinar de las aplicaciones anteriores, los tiempos de preparación se pueden clasificar en dos categorías, tiempos de preparación independientes y dependientes. Los primeros, los independientes, consideran que cada tarea requiere de un tiempo de preparación el cual no variará en relación a la secuencia, es decir, la tarea  $j$  tendrá un tiempo de preparación  $s_j$  sin importar en que punto de la secuencia le corresponda procesarse. Por su parte, los tiempos de preparación dependientes toman en cuenta el orden en que se procesarán las tareas, los tiempos de preparación de una tarea cambia en relación a la tarea que procesaba antes de empezar su producción, es decir, para la tarea  $j$ , el tiempo de preparación será  $s_{ij}$  si la tarea  $j$  será procesada justo después de la tarea  $i$ .

### **2.2.3 Secuenciación en una máquina con tiempos de preparación independientes.**

Los problemas de secuenciación en una máquina con tiempos de preparación independientes han sido estudiados en múltiples ocasiones, Graves y Lee [16] propusieron algoritmos dinámicos con un tiempo de programación polinomial para ambos problemas, ellos abordaron el problema de secuenciación en una máquina con tiempos de preparación independientes de la secuencia, tanto para minimizar la máxima tardanza como para minimizar la sumatoria del tiempos de terminación ponderados donde es necesario realizar mantenimiento a las máquinas en ciertos intervalos de tiempo. En su artículo los autores establecen que se requerirá un tiempo de preparación extra en caso de que el trabajo no sea finalizado antes de que comience un periodo de mantenimiento y tenga que seguir procesándose una vez que finaliza dicho mantenimiento. En el artículo se demuestra que tanto el problema de minimizar la máxima tardanza como el de minimizar la sumatoria de tiempos de terminación ponderados resultan NP-duros si el horizonte de planeación es largo.

Por su parte Liu y Cheng [30] analizaron el problema de secuenciación en una máquina con tiempos de preparación independientes para optimizar el tiempo máximo de entrega, considerando que el procesamiento de una tarea puede ser interrumpida temporalmente para volver a procesarse un tiempo después. Ellos asumieron que por volver a procesar la tarea después de la interrupción se incurre en un costo de preparación, el cual depende del trabajo que se procesa, determinaron que el problema es fuertemente *NP-hard* aún si el tiempo de preparación es de una unidad. Fue por medio de un algoritmo dinámico de programación que los autores lograron resolver el problema.

#### **2.2.4 Secuenciación en una máquina con tiempos de preparación dependientes.**

De manera similar, se han abordado problemas de secuenciación en una máquina con tiempos de preparación dependientes con el objetivo de minimizar la sumatoria de tardanza total, en el estudio realizado por Allahverdi, Ng, Cheng y Kovalyov [1] se menciona que existen numerosos métodos para solucionar este tipo de problemas y a que ha ido evolucionando con el correr de los años, por ejemplo, Tan y Narasimhan [38] en 1997 presentaron un algoritmo de recocido simulado, el cual se mostró superior a algoritmos más antiguos cuando se realizó el análisis computacional. Los algoritmos genéticos, en diferentes versiones, se han utilizado también con el fin de resolver este tipo de problemas, tal es el caso de Armentano y Manzini [3], Tan, Narasimhan, Rubin y Ragatz [39] y França, Mendes y Moscato [11]. Gagne, Price y Gavel [12], en el 2002 propusieron un algoritmo de optimización de colonia de hormigas el cual demostró un desempeño competitivo con otros algoritmos utilizados en el pasado en cuanto a calidad de la solución, requiriendo un menor tiempo computacional.

Por su parte, Gupta y Smith [18] utilizaron un procedimiento GRASP seguido de una heurística de búsquedas locales para resolver este problema, teniendo como resultados que su metodología proporciona mejores resultados que la utilización del algoritmo de optimización de colonia de hormigas, pero requiere de tiempos computacionales más largos.

Entre los estudios más recientes de secuenciación en una máquina de tareas con tiempos de secuenciación dependientes, se encuentra el estudio realizado por Koulamas y Kyparisis [22] en el cual ellos consideran problemas de secuenciación tiempos de preparación proporcionales a la longitud de los trabajos que han sido ya secuenciados, los autores consideraron funciones objetivos en relación al tiempo total de terminación, mismos que lograron demostrar podrían ser resueltos en un tiempo  $O(n \log n)$ , donde  $n$  corresponde al número de tareas, por medio de procedimientos de ordenamiento.

## **2.3 Mantenimiento**

La mayoría de la literatura sobre secuenciación tiene como supuesto que las máquinas están disponibles continuamente. Este supuesto puede estar justificado en algunos casos, sin embargo, en el mundo real, la continua disponibilidad de la máquina no resulta posible. La máquina puede no estar disponible debido a causas deterministas o a causas aleatorias. Cuando el tiempo y la duración de los periodos de no disponibilidad se conocen en el tiempo cero, se trata de un proceso determinista. Si la duración y el tiempo no son conocidos al comienzo del horizonte de planeación, el problema se convierte en un problema de secuenciación estocástico [41].

En la actualidad, existe una nueva tendencia en la gestión del mantenimiento denominada Mantenimiento Productivo Total (TPM) que engloba un conjunto de procedimientos como mantenimiento correctivo y mantenimiento preventivo, entre otros, con el fin de lograr “la máxima eficacia global de los equipos en los sistemas de producción, eliminando las averías, los defectos y los accidentes con la participación de todos los miembros de la empresa” [7].

### **2.3.1 Relevancia del mantenimiento**

No es difícil percatarse del importante papel que juega el mantenimiento dentro de algunas industrias, entre las industrias en las que el mantenimiento de las máquinas juega un papel crítico se encuentran las que enumeran Chen y Liao [6] la industria de los semiconductores e industrias químicas, así como la industria textil. De acuerdo a la experiencia práctica de los autores, una secuenciación ineficiente del mantenimiento puede reducir enormemente el desempeño de las fábricas, de ahí la relevancia de tomar a la

secuenciación del mantenimiento como algo serio, pues procedimientos efectivos para secuenciar el mantenimiento son necesarios para lograr el alto desempeño deseado.

En la figura 2.1, se presentan algunos de los tipos de pérdidas así como los efectos que provocan, que surgen como resultado de no contar con una gestión de mantenimiento, de acuerdo con Cuatrecasas [7]:

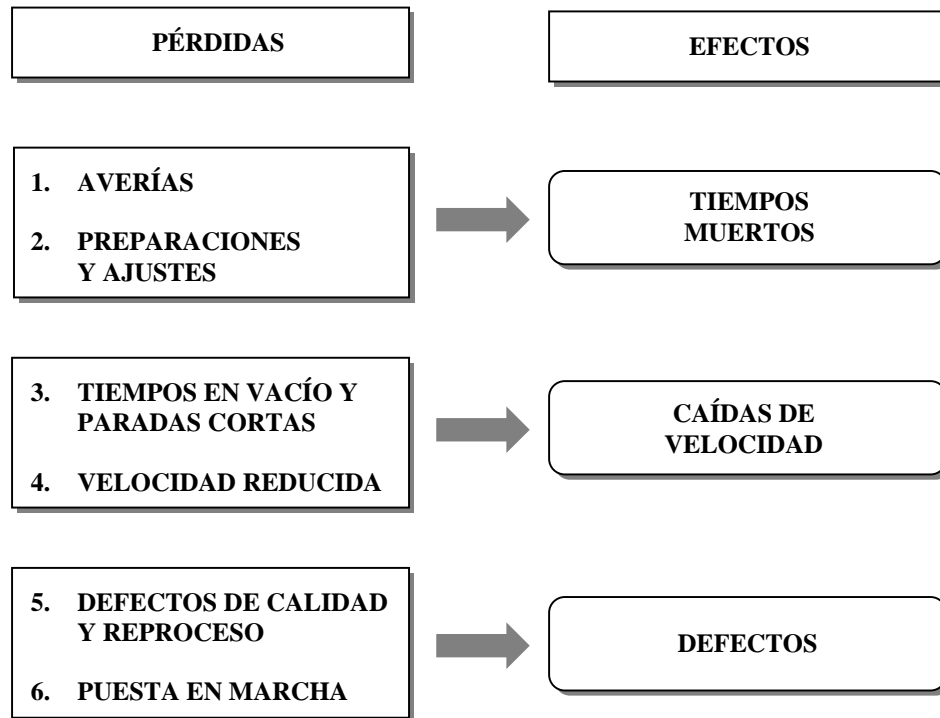


Figura 2.1. Agrupación de las pérdidas en función de los efectos que provocan.

En la tabla 2.1, se presentan más a detalle los tipos de problemas que resultarían para la empresa en caso de que se presenten las antes mencionadas pérdidas, según Cuatrecasas [7].

De acuerdo con Duffuaa, Raouf y Campbell [9] debe considerarse al mantenimiento preventivo como un trabajo planeado, la distribución de horas laborables en una industria bien establecida y que funciona apropiadamente debería ser similar al a presentada en la figura 2.2.

Tipo	Pérdida	Tipo y características
Tiempos muertos y de vacío	1. Averías	Tiempos de paro del proceso por fallos, errores o averías, ocasionales o crónicas de los equipos
	2. Tiempos de preparación y ajuste de los equipos	Tiempos de paro del proceso por preparación de máquinas o útiles necesarios para su puesta en marcha
Pérdidas de velocidad del proceso	3. Funcionamiento a velocidad reducida	Diferencia entre la velocidad actual y la de diseño del equipo según su capacidad. Se pueden contemplar además otras mejoras en el equipo para superar su velocidad de diseño
	4. Tiempo en vacío y paradas cortas	Intervalos de tiempo en que el equipo está en espera para poder continuar. Paradas cortas por desajustes varios
Productos o procesos defectuosos	5. Defectos de calidad y repetición de trabajos	Producción con defectos crónicos u ocasionales en el producto resultante y, consecuentemente, en el modo de desarrollo de sus procesos
	6. Puesta en marcha	Pérdidas de rendimiento durante la fase de arranque del proceso, que pueden derivar de exigencias técnicas

Tabla 2.1. *Explicación de las pérdidas por no mantenimiento.*

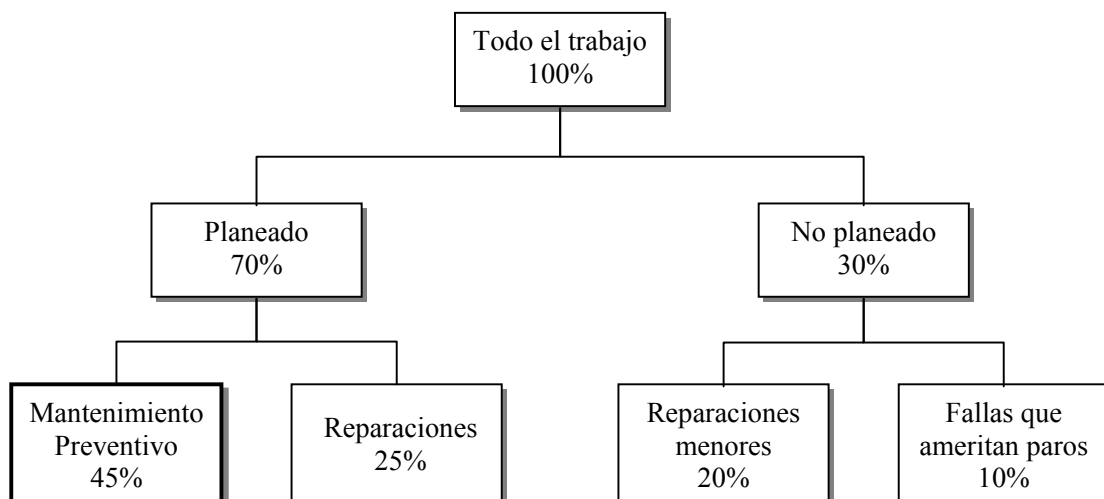


Figura 2.2. *Distribución del trabajo [9].*

Con las cifras presentadas en la figura 2.2, donde el mantenimiento preventivo debería de disponer del 45% del recurso tiempo de su función, resulta evidente la necesidad de contar con una etapa de mantenimiento preventivo en el proceso productivo y de incluirlo como propio del sistema productivo.

El no contar con una política de mantenimiento preventivo de las máquinas, trae consigo fallos inesperados de las máquinas que resultan en pérdidas para la empresa, pues mientras ocurre el fallo y éste es solucionado, no será posible seguir con las órdenes de tareas pues la máquina no estará disponible para tal efecto.

### **2.3.2 Mantenimiento preventivo.**

Toda máquina para que pueda funcionar apropiadamente requiere de mantenimiento que le permita corregir o prevenir los posibles errores que pueden presentarse. Tal como lo menciona Chen y Liao, [6], resulta deseable obtener una secuenciación que tome en consideración de manera simultánea tanto las tareas u órdenes como el mantenimiento que reducirá la tasa de paros por falta de éste.

El mantenimiento preventivo es una de las razones de no disponibilidad de las máquinas y es considerado dentro de los procesos deterministas, según Türkcan [41].

Es posible conceptualizar al mantenimiento preventivo, tomando como referencia la definición dada por Duffuaa, Raouf y Campbell [9], quienes establecen que si se considera al mantenimiento como el asegurar que una instalación, sistema de equipos, flota de vehículos, u otro activo físico continúen desempeñándose de acuerdo a sus funciones, el mantenimiento preventivo puede definirse entonces como una serie de tareas preplaneadas, llevadas a cabo para contrarrestar causas conocidas de fallas potenciales de dichas funciones.

### **2.3.3 Mantenimiento periódico o basado en tiempo.**

Es posible encontrar tres clases de mantenimiento preventivo en la literatura, los cuales son: el mantenimiento periódico o basado en tiempo, el mantenimiento basado en condiciones y el mantenimiento basado en fiabilidad.

Para este trabajo de investigación, el tipo de mantenimiento de interés es mantenimiento periódico o basado en tiempo, el cual, de acuerdo a Cuatrecasas [7]:



**Mantenimiento periódico o basado en tiempo:** El trabajo de mantenimiento empieza con el mantenimiento periódico o basado en tiempo (TBM por las siglas en inglés de *Time Based Maintenance*). Se trata de actividades básicas que facilitan un funcionamiento consistente y continuado del equipo, tales como inspeccionar, limpiar, reponer y restaurar piezas periódicamente para prevenir las averías”.

## **2.4 La secuenciación de tareas y el mantenimiento.**

Tal como puede observarse una gran cantidad de investigadores se han dado a la tarea de dirigir sus estudios hacia la secuenciación de tareas en una máquina, esto es notorio al tomar como referencia la numerosa cantidad de artículos que han sido publicados sobre este tema, de los cuales se presentó una breve muestra en los párrafos anteriores.

Sin embargo, pese a los numerosos estudios al respecto, muy pocos esfuerzos se han dado a analizar el problema de la secuenciación de tareas en una máquina donde existe una restricción de disponibilidad de la máquina.

Lee y Lin [25], mencionan en su artículo el hecho de que en las últimas cuatro décadas, se han publicado muchos artículos en el área de secuenciación. Muchos de ellos abordan problemas asumiendo que las máquinas se encuentran siempre disponibles a una velocidad constante. Sin embargo, en las aplicaciones industriales de la actualidad, se ha vuelto muy común que una máquina se encuentre en condiciones inferiores a la normal después de trabajar por un cierto periodo de tiempo.

Esta situación vuelve crítico el hecho de considerar que una máquina puede estar no disponible para realizar su función en ciertos periodos de tiempo, es decir, tomar en cuenta en la secuenciación de tareas aquellos periodos en los que la maquina no estará disponible y por lo tanto no es productiva.

Un encargado de la planeación de la producción, puede decidir parar la maquinaria y arreglarla inmediatamente o esperar y arreglarla más tarde. A la actividad de arreglar la maquinaria se le denomina mantenimiento [25].

Una de las principales ventajas del mantenimiento preventivo es, por supuesto, que puede ser programado o secuenciado con anterioridad en lugar de esperar hasta que el equipo falle y luego hacer una reparación de emergencia, de este modo lo expresa Higgins y Mobley [19].

De acuerdo con Ji, He y Cheng [20], es común observar en la práctica que las máquinas están aguardando para que se les de mantenimiento mientras existen trabajos que están en espera de ser procesados por esas máquinas. Esto es debido a una falta de coordinación entre la planeación del mantenimiento y la secuenciación de la producción, establecen Ji, He y Cheng [20] quienes resaltan también la importancia del mantenimiento preventivo, el cual deberá de incluir inspecciones periódicas, reparaciones periódicas y mantenimiento preventivo, según los autores, este mantenimiento preventivo será capaz de reducir la tasa de fallas a costa de sacrificios menores en el tiempo de producción. La importancia del mantenimiento ha sido reconocida por los tomadores de decisiones, por lo tanto, la secuenciación del mantenimiento de los sistemas de manufactura se ha gradualmente convertido en una práctica común en muchas compañías.

Con una planeación apropiada del mantenimiento periódico, la fábrica será capaz de mejorar la eficiencia y seguridad de la producción, resultando en un incremento de la productividad [20].

La planeación para el mantenimiento preventivo puede ser realizada con días, semanas e incluso meses de adelanto con el fin de asegurar que el tiempo más conveniente de producción se ha seleccionado, que los materiales y partes para dar el mantenimiento se encuentran disponibles y que la carga de trabajo del mantenimiento se encuentre relativamente uniforme [19].

#### **2.4.1 Secuenciación con restricciones de disponibilidad de las máquinas.**

Aunque el problema de secuenciación de tareas en una máquina con la restricción de disponibilidad (por mantenimiento preventivo) resulta de alta importancia, ha sido un tema un tanto olvidado e inexplorado por los investigadores.

Entre los pioneros en esta rama de la secuenciación se encuentra Adiri, Frostig y Rinnooy [2] (citado en [6], ellos lograron definir dos casos de paros por falla en una sola máquina, en el primer caso la tarea que se estaba procesando en el momento en que se da la falla, puede volverse a procesar en donde se había quedado una vez arreglada la falla, en el otro caso, la tarea en proceso al momento de darse la falla, deberá ser empezada desde el principio una vez solucionada la falla. Para los autores, el tiempo de no disponibilidad es incierto pero sigue una distribución probabilística. Adiri y et al [2], utilizaron los procedimientos de las fechas de entregas más tempranas y el de el tiempo más corto de

procesamiento modificado para ambos casos, bajo el objetivo de minimizar el número de trabajos tardíos.

Schmidth [37] (citado en [6]) abordó el problema en base a otro enfoque, el cual cabe mencionar es el más utilizado por los investigadores, el enfoque que el autor utilizó es uno en donde el tiempo de no disponibilidad se conoce, es decir, es determinista. Bajo este supuesto, Schmidth desarrolló un algoritmo que permite encontrar todas las secuenciaciones factibles de los trabajos que permiten que estos cumplan con sus fechas de entrega.

Leon y Wu [27] (citado en [6]) consideraron el problema de secuenciación en una máquina en el cual existía un tiempo de disponibilidad de la tarea y restricciones de fechas de entrega en tareas y de restricciones de paros en las máquinas por vacaciones. Su objetivo era el de minimizar la máxima tardanza.

Por su parte, Asano y Ohta [4] (citado en [6]) desarrollaron un algoritmo basado en branch-and-bound para atacar problemas de secuenciación de tareas en una máquina con restricciones de paros por falla de las máquinas y tiempos de preparación dependientes entre las tareas a procesar.

Por su parte Lee y Lin [25], motivados por un problema que resulta ser común en cierta tecnología en la línea de ensamble de aparatos electrónicos, realizaron un estudio con el propósito de simultáneamente secuenciar las tareas en el orden más conveniente mientras se secuencia la actividad de mantenimiento. Los autores asumieron tiempos de procesamiento deterministas y las fallas de las máquinas como un proceso aleatorio que sigue cierta distribución. Así mismo tomaron en cuenta dos tipos de casos de procesamiento: tareas que pueden ser empezadas del punto en el que se quedaron antes de parar el proceso y tareas que tienen que ser empezadas de cero si quedaron en proceso al momento de parar el proceso. Las funciones objetivos que se analizaron en el problema corresponde a tiempo total de terminación, máxima tardanza esperada, entre otros. Su análisis permitió obtener relaciones entre cada uno de las combinaciones de casos antes mencionados y lemas para determinar el método más viable de solución.

Por su parte, Liao y Chen [29] analizaron el problema de secuenciación de tareas en una máquina con mantenimiento periódico. El criterio que consideraron fue el de minimizar la máxima tardanza. Con tal objetivo, propusieron una heurística para determinar una

solución cercana a la óptima para problemas grandes, así mismo, establecieron un algoritmo *branch-and-bound* para acercarse más a la solución óptima. Según su análisis computacional, la heurística presentada demuestra efectividad y eficiencia al ser utilizada.

Sadfi, Penz, Rapine, Blazawicz y Formanowicz [36] realizaron una investigación con el fin de mejorar un algoritmo de aproximación para el problema de secuenciación de tareas en una máquina con la función objetivo de minimizar el tiempo total de terminación, donde existen restricciones de disponibilidad, en particular sujeto a un periodo de mantenimiento. Su algoritmo de aproximación demostró un límite de error en el peor caso de  $3/17$ . Además, con los resultados computacionales los autores lograron demostrar que el algoritmo heurístico creado mejora los resultados en el 100% de las instancias generadas para el problema, comparando los resultados del heurístico con los obtenidos con el tiempo más corto de procesamiento.

Un tiempo después, Ji, He y Cheng [20] expresaron el hecho de que pese a que el problema de secuenciación con mantenimiento ha atraído la atención de los investigadores, la mayoría de los estudios anteriores habían considerado un solo periodo de mantenimiento. Por este motivo, los autores consideraron varios periodos de mantenimiento, donde cada actividad de mantenimiento debe ser tomada en cuenta en la secuencia después de un intervalo de tiempo periódico. Su objetivo es el de determinar la secuencia que es capaz de minimizar el tiempo total de la producción, sujeto a un mantenimiento periódico y considerando que las tareas que se encuentran en proceso en cuanto llega a darse el mantenimiento deben de ser recomenzadas una vez que finalice el mantenimiento. En el artículo se probó que el radio, en el peor de los casos del algoritmo clásico LPT (*Longest Processing Time First*) es de 2. Los autores, en su artículo, demostraron que no existe una aproximación de tiempo polinomial con un radio en el peor de los casos menor que 2, con lo cual les fue posible establecer que el algoritmo LPT es el mejor posible.

## **2.5 El problema de rutas de vehículos con restricción de distancia**

Tal como se mencionó en la descripción del problema del capítulo 1, el problema se analizará haciendo una analogía con los problemas de rutas de vehículos, dado que es posible tomar el problema como uno similar al de minimizar el número de rutas para visitar

a varios clientes y la suma total de la distancia recorrida por los vehículos, con la restricción adicional de que cada vehículo puede recorrer cierta distancia máxima.

Tomando lo anterior como base, se considera necesario presentar una breve explicación de lo que consiste el problema de rutas de vehículos, en particular el tipo de problema que corresponde para el desarrollo de la investigación.

El problema de rutas de vehículos con restricción de distancia (DVRP, por sus siglas en inglés) es una variante del problema de rutas de vehículos capacitados (CVRP), donde para cada ruta la restricción de capacidad se remplaza por una restricción de longitud máxima (o tiempo máximo). En particular, una longitud no negativa,  $t_{ij}$  (o  $t_e$ ) es asociada a cada arco  $(i, j) \in A$  (o nodo  $e \in E$ ), y la longitud total de los arcos para cada una de las rutas no debe exceder de la longitud máxima  $T$  [40].

Por lo regular, los costos y las matrices de longitudes coinciden es decir  $c_{ij} = t_{ij}$  para todo  $(i, j) \in A$  (ó  $c_e = t_e$  para toda  $e \in E$ ). Por lo tanto, el objetivo del problema es minimizar la longitud total de las rutas o de su duración, cuando el tiempo de servicio está incluido en el tiempo de viaje de los arcos [40].

La similitud entre el problema de rutas de vehículos con restricción de distancia y el problema que se analiza a lo largo de la investigación, es que, dado que se cuenta con mantenimientos periódicos existe un periodo entre mantenimientos en el cual se secuenciarán las tareas posibles a ser secuenciadas, si se establecen las tareas como clientes a ser visitados, el tiempo entre mantenimientos podría ser equivalente a la distancia máxima permitida en el DVRP, donde en lugar de hablar de distancia requerida para visitar al cliente  $i$ , se hablaría del tiempo requerido para realizar la tarea  $i$ . La etapa de mantenimiento, sería lo equivalente al depósito en el DVRP.

Por otro lado, la diferencia entre DVRP y el problema de esta investigación, radica en que el DVRP establece que después de cada ruta, el vehículo deberá de regresar al depósito. En el caso del problema de investigación, el depósito corresponderá al mantenimiento de la máquina, sin embargo, no se requiere que después de la última tarea procesada se le dé mantenimiento a la máquina, equivalente a que después del último cliente visitado no sea necesario que el vehículo regrese al depósito.

## **2.6 Métodos Heurísticos**

Sin lugar a dudas, al resolver un problema de optimización lo ideal sería lograr encontrar la solución óptima a cierta situación dada, sin embargo, esto no siempre es posible. Al modelar situaciones de la vida real, tales como problemas de localización, de rutas, secuenciación de tareas, entre otros, nos encontramos con la necesidad de involucrar numerosas variables, que traen como resultado la generación de una finita pero demasiado grande cantidad de soluciones factibles. Encontrar la solución óptima al problema, dentro de la numerosa cantidad de soluciones, resulta no factible pues por lo regular el número de posibles soluciones crece exponencialmente conforme la cantidad de variables aumenta.

Feo y Resende [10] mencionan que, la mayoría de los problemas encontrados en la industria y en el gobierno son ya sea en tiempo computacional no factibles por naturaleza o lo suficientemente grandes que el uso de algoritmos exactos no sea lo más recomendado. En tales casos, los métodos heurísticos se emplean con el fin de obtener resultados buenos no necesariamente la solución óptima.

En la actualidad existen numerosos métodos metaheurísticos que han sido utilizados ampliamente por los investigadores en diversas problemáticas obteniendo resultados satisfactorios en un tiempo computacional aceptable. Entre los métodos metaheurísticos más usados en nuestros tiempos se encuentran Búsqueda Tabú, Algoritmos Genéticos, Búsqueda Dispersa, Algoritmos de Colonia de Hormigas, Recocido Simulado, GRASP, entre otras.

En los siguientes apartados, se ahondará más en las técnicas del GRASP y de Búsqueda Tabú, pues se utilizan como herramientas en el desarrollo de la metodología de solución al problema propuesto en la presente investigación.

### **2.6.1 GRASP**

GRASP (denominado así por sus siglas en inglés Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) es un procedimiento de búsqueda miope aleatorizado y adaptativo, está considerado como una metaheurística para encontrar soluciones factibles (i.e. sub-óptimas de buena calidad, pero no necesariamente óptimas) a problemas de optimización combinatoria. Se basa en la premisa de que soluciones iniciales diversas y de buena calidad juegan un papel importante en el éxito de métodos locales de búsqueda” [35].

El GRASP es catalogado como un método iterativo en donde cada iteración se utiliza para la construcción de una solución miope de forma aleatoria para después buscar localmente mejores soluciones tomando como punto de partida la solución construida. El procedimiento se realiza en repetidas ocasiones donde la mejor de todas, la que ofrezca el mejor beneficio basado en la función objetivo que busca alcanzar el modelo, se toma como la solución aproximada dada por GRASP.

En la figura 2.3 se presenta el pseudo-código de un GRASP básico para minimización, el cual fue presentado por Resende y González Velarde [35].

```

procedure GRASP
Require:  $i_{\text{máx}}$ 
 $f^* \leftarrow \infty$ ;
for  $i \leq i_{\text{máx}}$  do
   $x \leftarrow \text{GreedyRandomized}()$ ;
   $x \leftarrow \text{LocalSearch}(x)$ ;
  if  $f(x) < f^*$  then
     $f^* \leftarrow f(x)$ ;
     $x^* \leftarrow x$ ;
  end if
end for
return  $x^*$ ;

```

Figura 2.3. Pseudo-código GRASP

Es posible identificar dos componentes principales del GRASP, tal como se observa en el algoritmo presentado en la sección anterior, en primer lugar se encuentra una fase de construcción y después se observa una de búsqueda local.

En esta investigación se utilizarán las dos fases. La fase constructiva se utilizará para determinar una solución inicial y el objetivo que se persigue es determinar la menor cantidad de bloques entre estados de mantenimiento. La fase de mejoramiento se implementará para reducir la duración en cada bloque entre dos estados de mantenimiento.

#### **Fase de Construcción:**

Existen diferentes mecanismos de construcción de soluciones a través de GRASP, construcciones miopes aleatorizadas, sin embargo por diferentes que sean todos los mecanismos de construcción van formando la solución incorporando un elemento cada vez.

El procedimiento que sigue GRASP puede explicarse si se analizan cada una de las siglas que conforman su nombre.

#### *Greedy*

*Random*

*Adaptive*

*Search*

*Procedure*

*Greedy*: una vez que se cuenta con la lista preliminar de posibles candidatos a formar parte de la solución, se hace uso de una función *greedy* o miope. Esta función miope es la encargada de medir la contribución que cada elemento daría de manera local a la solución que hasta el momento se ha formado.

*Random*: esta sigla indica que de alguna forma se debe de introducir aleatoriedad en el procedimiento, para este propósito suele hacerse uso de una lista restringida de candidatos. Esa lista contiene un conjunto de elementos candidatos ordenados con los mejores valores de la función miope [35]. De forma que, el candidato siguiente que deberá ser agregado a la solución se debe de seleccionar en forma aleatoria de dicha lista restringida de candidatos.

*Adaptive*: una vez que se selecciona el valor a formar parte de la solución, seleccionado de manera aleatoria de la lista restringida de candidatos, el problema deberá de adaptarse y considerar que ese elemento candidato ya no puede formar parte de la lista de candidatos, esta adaptación deberá considerar aquellos cambios en los beneficios por parte de otros candidatos que resultan de añadir al elemento seleccionado en la solución del problema.

*Search*: establece que el procedimiento servirá para realizar una búsqueda de una solución adecuada.

*Procedure*: una secuencia de pasos que se estarán realizando tantas veces sea necesaria hasta formar una solución factible que cumpla en la mejor medida con el objetivo deseado. Es decir, una vez que es seleccionado un elemento para formar parte de la solución y que se ha adaptado apropiadamente el problema, se deberá volver a formar la lista de candidatos, obtener sus beneficios miopes y seguir el procedimiento que se mencionó en los párrafos anteriores.

**Fase de mejoramiento:**



En esta fase, por lo general, se implementa un procedimiento de búsqueda local para mejorar el valor del objetivo que fue obtenido en la fase constructiva. En nuestro caso implementaremos una búsqueda local, guiada por un procedimiento de Búsqueda Tabú.

### **2.6.2 Búsqueda Tabú**

Búsqueda Tabú está considerada dentro del grupo de las metaheurísticas, es decir, procesos que de manera iterativa modifican y regulan operaciones tomando como base soluciones obtenidas por medio de heurísticas previamente empleadas (por ejemplo de heurísticas de construcción como GRASP) con el propósito de generar soluciones de mejor calidad.

La definición de Búsqueda Tabú dada por uno de sus principales precursores, Fred Glover. En el artículo presentado por Glover y Melián [15] es la siguiente:

“La Búsqueda Tabú (*Tabu Search* – TS) es un procedimiento metaheurístico cuya característica distintiva es el uso de memoria adaptativa y de estrategias especiales de resolución de problemas. Su filosofía se basa en la explotación de diversas estrategias inteligentes para la resolución de problemas, basadas en procedimientos de aprendizaje. El marco de memoria adaptativa de TS explota la historia del proceso de resolución del problema haciendo referencia a cuatro dimensiones principales, consistentes en la propiedad de ser reciente, en frecuencia, en calidad, y en influencia. (p. 1)”

Tratando de profundizar un poco más en la definición de Búsqueda Tabú, Olegario Pérez en la tesis presentada en año 2006 [32], expone:

“*Tabu Search* es una técnica que está basada en principios generales de Inteligencia Artificial (IA) y que se utiliza en la solución de problemas combinatorios de gran dificultad. En esencia, es un metaheurístico que puede ser utilizado para guiar cualquier procedimiento de búsqueda local en la búsqueda agresiva del óptimo del problema. La agresividad se refiere a la estrategia del método de evitar que la búsqueda quede "atrapada" en un óptimo local. Para tal efecto, el método de búsqueda tabú toma de la Inteligencia Artificial el concepto de memoria y lo implementa mediante estructuras simples con el objetivo de dirigir la búsqueda, teniendo en cuenta la historia de ésta. Es decir, el procedimiento trata de extraer información de lo sucedido y actuar en consecuencia. En este sentido puede decirse que hay un cierto aprendizaje y que la búsqueda es inteligente.”

Búsqueda Tabú se basa en una filosofía que pretende superar aquellos métodos en los que se finaliza con un óptimo local en su aplicación, los óptimos locales son tomados en cuenta, más no son el punto que da fin al algoritmo, la búsqueda permite sobrepasar estos óptimos locales en el afán de encontrar el óptimo global de la situación.

En esta metaheurística, las soluciones se van generando de un modo similar que cualquier procedimiento de búsqueda local, con movimientos sucesivos que permiten pasar de una solución a otra. El procedimiento para encontrar un óptimo local se puede explicar del siguiente modo, “El proceso examina soluciones “vecinas” y se mueve o avanza de forma inteligente, hacia uno de estos vecinos que provea una mejora en a solución objetivo. Este procedimiento se repite hasta que ya no sea posible mejorar una solución con respecto a las soluciones vecinas” [32]. La diferencia entre los otros procedimientos de búsqueda local, radica en que en Búsqueda Tabú no se considera todo el entorno de soluciones vecinas, existe un entorno reducido.

Una de las formas más comunes y sencillas de generar el entorno reducido consiste en “etiquetar” como tabú (del polinesio tabú, lo prohibido) aquellas soluciones que fueron analizadas y visitadas con un corto tiempo de anterioridad. Esta forma de definir elementos tabú es conocida como memoria a corto plazo y su principal objetivo es evitar que en el procedimiento de búsqueda tabú se cree un ciclo en el que se visiten siempre las mismas soluciones que no permita superar un óptimo local.

A continuación se presenta el esquema básico de búsqueda tabú, presentado por Manuel Laguna y Rafael Martí [24].

```

Choose  $x \in X$ ;
 $x^* \leftarrow x$ ;
do {
     $iter \leftarrow iter + 1$ ;
    Find  $x' \in N(x) \setminus T(x)$  such that  $f(x')$  is minimized;
     $x \leftarrow x'$ ;
    Update  $T(x)$ ;
    if ( $f(x) < f(x^*)$ ) {
         $x^* \leftarrow x$ ;
         $iter\_to\_best \leftarrow iter$ ;
    }
} while ( stopping criterion not satisfied );

```

Figura 2.4. Seudo-código búsqueda tabú

La metaheurística de Búsqueda Tabú ha tenido numerosas aplicaciones en los últimos años sobre todo en problemáticas de índole combinatorios, obteniéndose buenos resultados, algunas de estas han incluido problemas de rutas de vehículos, problemas de secuenciación, problemas de distribución y transporte, problemas de localización, entre otros.

## **2.7 Conclusiones del capítulo Marco Teórico**

Con la revisión exhaustiva requerida para la realización del presente capítulo, fue fácil percatarse de la importancia y relevancia de temas como mantenimiento y secuenciación de tareas dentro de la industria.

En particular el mantenimiento ha venido a tomar fuerza en los últimos años, debido al ambiente cada vez más automatizado que se vive donde las empresas se tornan cada vez más dependientes del buen funcionamiento de su maquinaria.

En lo que respecta al mantenimiento fue posible observar que existen varios tipos de mantenimiento que se pueden suscitar en un proceso, sin embargo, autores han resaltado la importancia de contar con un programa de mantenimiento preventivo, periódico con el fin de cómo su nombre lo indica, prevenir posibles fallas de la maquinaria, y con ello evitar daños en el producto final o paros en las líneas de producción.

Al dar un vistazo al capítulo de Marco Teórico es posible encontrar también los avances en el estado del arte de los temas en los que se encuentra inmersa esta investigación. Esto sin duda es de importancia, pues permite al lector hacerse una idea de hacia donde se van dirigiendo los esfuerzos de los investigadores, las tendencias y herramientas que utilizan, entre otras ideas. De este modo, es posible obtener información sobre vacíos en la literatura sobre temas de interés, los cuales se pueden tomar como base para desarrollar investigaciones interesantes, que ayuden a contribuir al estado del arte de dichos temas, tal como es el caso del presente trabajo de investigación.

## **CAPÍTULO 3**

### **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA**

#### **3.1 Introducción**

La cada vez más automatizada industria de nuestros tiempos, vuelve imprescindible el contar con sistema de mantenimiento que permita asegurar hasta cierto punto el buen funcionamiento de la maquinaria con que se cuenta en la fábrica. La relevancia de este hecho se torna evidente al considerar que son éstas máquinas las encargadas, en gran medida, de la producción total de la empresa, si ellas se deterioran o existe una falla que no las permita seguir funcionando, significaría grandes costos para la empresa, desperdicios, piezas defectuosas, paros en la producción, entre otras, que dan lugar a retrabajos, devoluciones, incumplimiento de la demanda, clientes insatisfechos e inclusive a pérdidas de clientes.

Las empresas de la actualidad no pueden darse el lujo de perder su competitividad en el mercado por no contar con un sistema de mantenimiento bien establecido que favorezca a mejorar la situación con que se labora en la empresa, por esta razón, se realizan esfuerzos para hacer de la etapa de mantenimiento un aspecto imprescindible y constante dentro del departamento de producción.

La incertidumbre de la fallas en las máquinas trae como consecuencia un comportamiento de la fábrica difícil de predecir, lo que reduce la eficiencia del sistema de producción. Esta incertidumbre puede ser disminuida al contar con una buena planeación del mantenimiento, en donde etapas de mantenimiento preventivo sean programadas dentro del sistema de producción [20].

Por tales motivos, en esta investigación, se busca diseñar una herramienta que permita al personal responsable de la programación de la producción obtener una secuenciación de órdenes a procesar buena, que incluya etapas de mantenimiento preventivo periódico.

### 3.2 Formulación del problema

En esta investigación se considera un problema de secuenciación tareas en una máquina con las siguientes características:

- Las tareas deben de ser procesadas de forma ininterrumpida. Las tareas a ser procesadas deben ser terminadas una vez que se comienzan a procesar, no hay lugar a interrupciones en el procesamiento de una tarea y de llegar a darse la interrupción la tarea deberá de ser reprocesada, lo que resulta indeseable.
- Para cada tarea existe un tiempo de preparación dependiente de la secuencia, es decir, el tiempo de preparación toma en cuenta el orden en que se procesarán las tareas, los tiempos de preparación de una tarea se esperan sean diferentes en relación a la tarea que se procesaba antes de empezar su producción, es decir, para la tarea  $j$ , el tiempo de preparación será  $S_{ij}$  si la tarea  $j$  será procesada justo después de la tarea  $i$ . En general,  $S_{ij} \neq S_{ji}$ .
- Cada tarea  $i$  cuenta también con un tiempo de procesamiento  $p_i$ , que es el tiempo que tarda la tarea para ser procesada en la máquina.
- Todas las tareas están listas para ser procesadas en el tiempo cero.
- Cada cierto intervalo de tiempo  $T$  deberá de efectuarse un mantenimiento a la máquina. Es decir, existe un intervalo de tiempo  $T$  entre dos periodos consecutivos de mantenimiento y dentro de este intervalo es posible procesar tareas.
- La etapa de mantenimiento requiere una cantidad de tiempo  $t$  para ser completada, y requerirá de un tiempo de preparación dependiente de la última tarea que se procesó en la máquina. Así mismo, después de la etapa de mantenimiento la máquina deberá ser preparada según la tarea que se pretende procesar.

En la figura 3.1 se presenta un esquema, con el fin de ejemplificar gráficamente algunas de las condiciones de la problemática antes descrita.

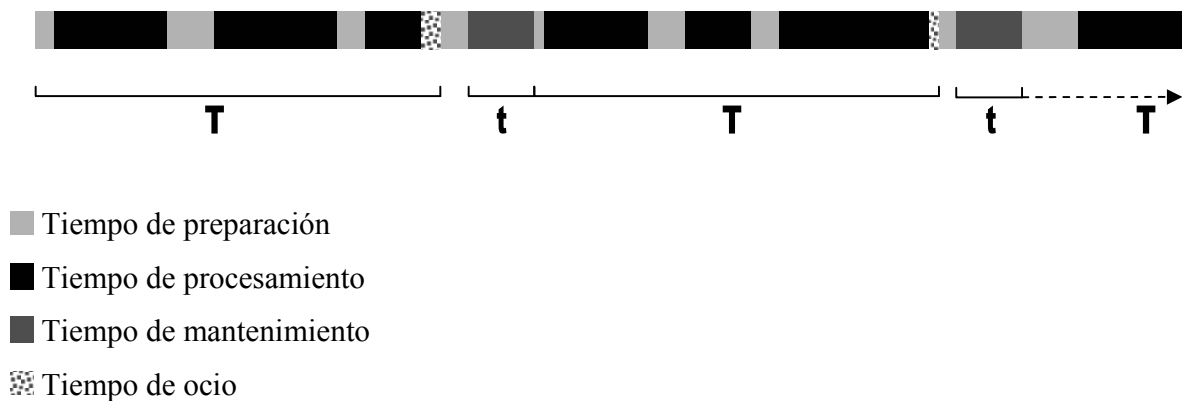


Figura 3.1. Representación gráfica de la problemática a analizar.

El objetivo del análisis del problema es el de asignar las tareas a los bloques entre dos etapas de mantenimiento para minimizar el tiempo en que la empresa demoraría en producir el total de tareas, que bien se puede traducir en minimizar el tiempo de terminación de la última tarea.

Al analizar el problema, se observó que existían similitudes con un problema de rutas de vehículos con restricción de distancia (DVRP), las cuales se enumeran a continuación.

- La restricción de tiempo entre mantenimientos  $T$  es equivalente a la restricción distancia (tiempo) para el problema de rutas, es decir, a la restricción de que el tiempo que recorra “el vehículo” no puede excederse de dicho tiempo  $T$ .
- De manera similar, la etapa de mantenimiento corresponde a un depósito tradicional en el problema de rutas de vehículos, es decir, el proceso deberá partir de él y una vez visitado un conjunto de tareas con sumatoria de tiempos de preparación y procesamiento menores o iguales al tiempo máximo de recorrido  $T$  deberá de regresar a la etapa de mantenimiento.
- Los tiempos de preparación entre tareas, pueden ser vistos como las distancias (tiempos) que deben recorrer los vehículos para visitar a los clientes
- Las secuencias de tareas entre dos estados de mantenimiento se corresponden con las rutas de los vehículos
- El número de vehículos utilizados es equivalente a la cantidad de intervalos entre mantenimientos que se requerirán para procesar el total de tareas, que representa el número de mantenimientos que serían necesarios para cumplir con las tareas.

La diferencia fundamental entre el problema bajo análisis y el problema de rutas de vehículos con restricción de distancia, se encuentra en la función objetivo, pues lo que interesa es minimizar la fecha de terminación de la última tarea que se procese. Además, para esta última tarea no se considera el tiempo de preparación para el siguiente estado de mantenimiento, que significaría en el problema de rutas que uno de los vehículos no tenga que regresar al depósito.

En la figura 3.2, es posible visualizar gráficamente la situación antes descrita, en la figura se representa la forma que tendría una solución del problema de secuenciación de tareas en una máquina con etapas de mantenimiento periódico, visto como un problema de rutas de vehículos con restricción de distancia.

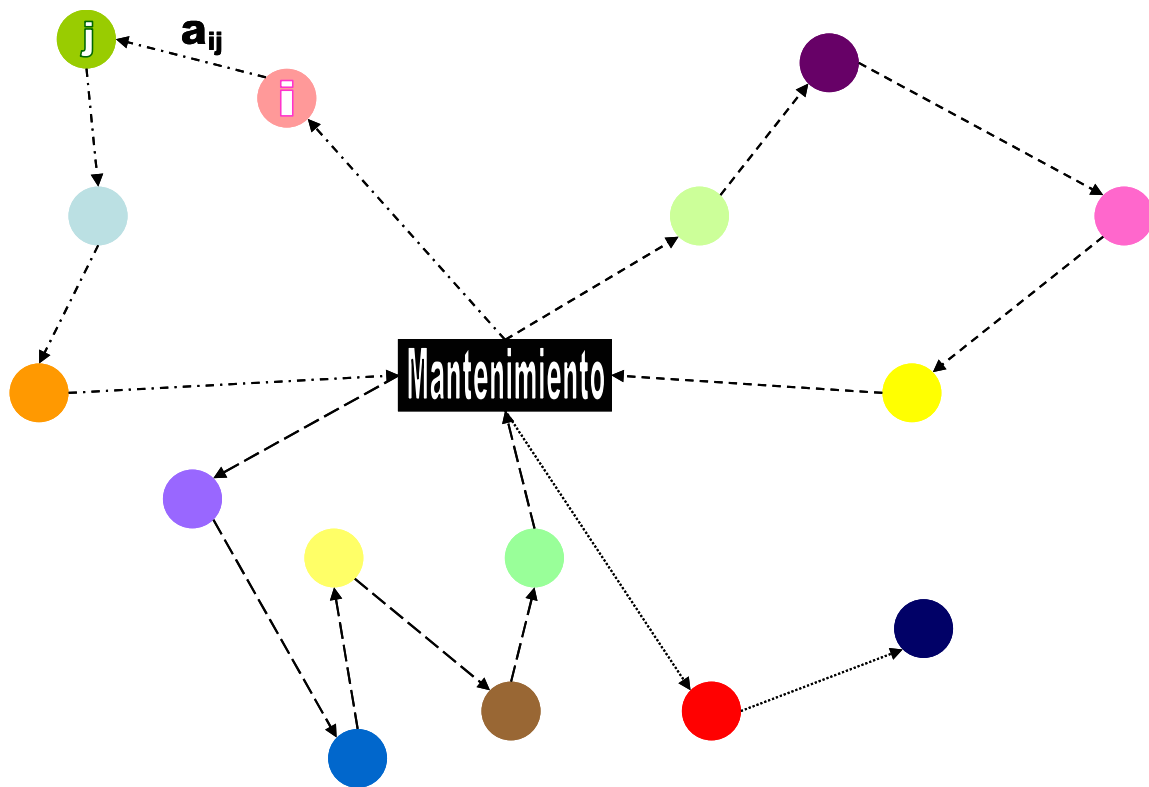


Figura 3.2. Representación como un problema de rutas de vehículo con restricción de distancia.

En la figura 3.2, claramente se puede observar que, de ser esta la solución al problema, se requerirían de tres etapas de mantenimiento para cumplir con el procesamiento de las quince tareas. Se tendrían entonces cuatro intervalos entre mantenimientos, donde se estarían programando el procesamiento de tareas, tres de ellos

serían intervalos cerrados, es decir, el tiempo restante no alcanza para programar una nueva tarea y un último intervalo en el cual es posible aún anexar tareas a la secuencia en caso de necesitarse.

### 3.3 Descripción de la metodología

Después de comprender las características fundamentales del problema planteado, se continúa con el desarrollo de una metodología para encontrar soluciones factibles de buena calidad. Con este propósito, se desarrolla una fase constructiva de GRASP, basada en modificaciones de los algoritmos de inserción más cercana (*closest insertion algorithm*) para el problema del agente viajero (*Traveling Salesman Problem*). Luego, para mejorar las soluciones iniciales, encontradas en la fase constructiva, se aplica una búsqueda local a cada bloque entre mantenimientos. Esta búsqueda local esta basada en movimientos *2-opt* y es guiada por un procedimiento de Búsqueda Tabú. Al final se desarrolla un algoritmo para reducir la fecha de terminación de la última tarea procesada, la cual se explicará en el apartado correspondiente.

#### 3.3.1 Descripción de la fase constructiva del GRASP.

Partimos de que es conocido el estado del sistema en el momento de tiempo cero. Este puede ser un estado de mantenimiento o de procesamiento de la última tarea del pan anterior. Para los siguientes bloques entre mantenimientos, siempre se comienza y se termina en un estado de mantenimiento, a excepción del último bloque que no es necesario terminarlo en un mantenimiento.

La heurística de construcción utilizada está basada en algoritmos de inserción. El principio del algoritmo es ir insertando tareas en las secuencias de cada bloque mientras quede tiempo disponible para que comience el próximo estado de mantenimiento.

El procedimiento inicia con  $S_{pk} = \{0\}$  y  $S_a = \{1, 2, \dots, n\}$ , donde  $S_{pk}$  es la secuencia parcial del bloque  $k$  y  $S_a$  es el conjunto de tareas disponibles para insertar en las secuencias parciales.

El procedimiento se realiza para un intervalo entre mantenimientos a la vez. Cuando no sea posible agregar más tareas al intervalo entre mantenimientos, debido a que se ha consumido el tiempo  $T$ , el intervalo se cierra y se comienza a trabajar con el siguiente intervalo de tiempo.

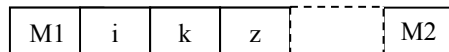


La función miope adaptativa está expresada en términos del tiempo restante  $r$  que queda al insertar una tarea en la secuencia parcial.

Con el fin de que el procedimiento cumpla con esta característica, se busca seleccionar los elementos que proporcionen el mayor beneficio para incluirlos en la solución final. El procedimiento considera en sus cálculos al total de candidatos a ser seleccionados que restan de cada paso, hasta que ya no quedan más candidatos por anexar.

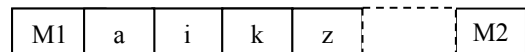
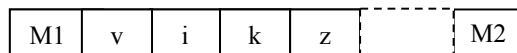
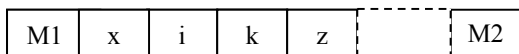
A manera de ejemplo, tomando como referencia el supuesto de que el problema parte de una etapa de mantenimiento, para determinar a los candidatos a ingresar en la solución parcial, será necesario calcular para cada par de tareas y/o etapas de mantenimiento previamente asignados e incluidos en el conjunto  $S_{pk}$  los valores en cuanto a tiempo restante  $r$  que sucedería para cada uno de los elementos del conjunto  $S_a$ .

De modo que, si se tuviera la siguiente secuencia de tareas definidas hasta el momento, donde **M** significa etapa de mantenimiento:

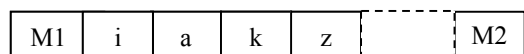
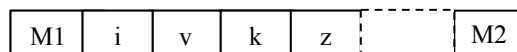
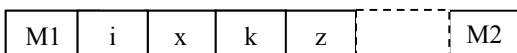


$$S_{pk} = \{i, k, z\} \text{ y } S_a = \{x, v, a\},$$

Por lo tanto, será necesario determinar los valores de  $r$  para la posición dos, de la siguiente manera: si la nueva tarea se incluyera entre **M1** y la tarea **i**, se debe determinar el costo de tener entonces las siguientes nuevas secuencias parciales.



Para la posición tres, entre la tarea **i** y la tarea **k**, se deben de determinar de igual manera el valor de  $r$ , si la tarea a incluirse fuera **x**, **v** ó **a**.



Se continúa de la misma manera hasta terminar con las posiciones existentes, de acuerdo a  $S_{pk}$ , para este ejemplo se terminaría con la posición cuatro, la que va entre la tarea **z** y **M2**.

Formalizando las operaciones antes descritas, para seleccionar la primera tarea a cada bloque entre dos estados de mantenimiento se calcula:

$$costo[i] = r - C[0][S_a[i]] - C[S_a[i]][0], \quad \forall i \in S_a$$

Donde  $r$  es el tiempo restante para el próximo estado de mantenimiento.

$C[k][j]$  corresponde al tiempo de preparación de pasar de la tarea **k** a la **j** más el tiempo de procesamiento de la tarea **j**, por lo tanto  $C[0][S_a[i]]$  es el tiempo preparación de pasar de la etapa de mantenimiento a la tarea que corresponde al elemento **i** del conjunto  $S_a$  más el tiempo de procesamiento de dicha tarea.

Cuando hay una o más tareas en la secuencia parcial, existen tantos puntos de inserción como tareas existan en  $S_{pk}$ , en este caso la contribución de cada tarea a insertar en la secuencia está determinada por la expresión:

$$costo[j] = r - C[S_{pk}[i]][S_a[j]] - C[S_a[j]][S_{pk}[i+1]] + C[S_{pk}[i]][S_{pk}[i+1]], \quad \forall i \in S_{pk}, \forall j \in S_a$$

Donde  $C[S_{pk}[i]][S_a[j]]$  es el tiempo de preparación de pasar de la tarea que corresponde al elemento **i** del conjunto  $S_{pk}$  a la tarea que corresponde al elemento **j** del conjunto  $S_a$  más el tiempo de procesamiento de esta tarea.

El procedimiento es *Greedy* (Miope) pues no ve más allá de los beneficios aportados por anexar cierta tarea en esa posición. Se considera solamente el tiempo  $r$  restante de incluirse la tarea en cierta posición, sin importar si esto es lo más conveniente o no para la solución en términos de futuras asignaciones.

Para cada punto de inserción se selecciona el mayor costo, dado que esto significa que insertando esta tarea el tiempo restante disponible es mayor, y se almacena en un vector que tiene tantos elementos como tareas existan en la secuencia parcial. Si se utilizara un procedimiento completamente miope, se seleccionaría para insertar la combinación de tarea-punto de inserción que mayor aportación en cuanto a costo proporcione al ser ingresada en la solución parcial. Sin embargo, este procedimiento no será utilizado, pues según evidencia empírica, esto no proporciona la mejor solución global. Esto trae como

consecuencia la necesidad de incorporar al procedimiento un componente de aleatoriedad el cual se describe a continuación.

La característica de aleatoriedad se da al procedimiento al tomar en consideración no solo al candidato que proporcione el mejor resultado una vez que se realizó la búsqueda, sino que para la selección de la tarea incluir, se construye una lista de candidatos restringida, entre la cual de forma aleatoria se seleccionará un candidato para que sea incluido como parte de la solución.

Se requiere de una lista restringida de candidatos tanto para tomar en consideración los mejores candidatos a ocupar cada posición, como para establecer las posiciones, que al ser ocupadas por las tareas que fueron seleccionadas previamente de la lista restringida de candidatos, que proporcionen la menor reducción del valor  $r$ . Por lo tanto, la aleatoriedad es utilizada como herramienta a lo largo de todo el proceso en la selección de las tareas a incluir en la solución en construcción.

Una vez que se inserta una tarea en la secuencia parcial, se actualizan la secuencia parcial  $S_{pk}$ , el conjunto de tareas disponibles  $S_a$  y el tiempo restante  $r$ .

El procedimiento es adaptable, pues una vez que se ha insertado una tarea en cierto punto de la secuencia para cierto intervalo entre mantenimientos, los beneficios que aportan las tareas candidatas a ser integradas en la solución diferirán para cada posición en comparación con los que aportaban cuando la última tarea asignada no había sido incluida.

El procedimiento finaliza cuando se ha dado una solución completa, cuando se ha determinado la secuencia final de las tareas. Cuando se ha establecido el orden en que deberán de ser procesadas las tareas incluyendo las etapas de mantenimiento periódico.

Para este procedimiento se ejecuta una serie de iteraciones con la finalidad de explorar el espacio de soluciones factibles y así obtener diferentes soluciones entre las que sea posible escoger la mejor.

En la figura 3.3, se presenta un diagrama de flujo del procedimiento GRASP, con el objetivo de consolidar la información descrita en los párrafos anteriores.

### **3.3.2 Búsqueda Tabú.**

Con el propósito de mejorar las soluciones generadas por GRASP, se realiza una Búsqueda Tabú para cada subsecuencia o bloque correspondiente a cada uno de los intervalos entre mantenimientos.

El objetivo de este procedimiento es el de reducir la fecha de terminación de la última tarea dentro de cada uno de los bloques de la secuencia para aumentar el tiempo restante al estado de mantenimiento y luego poder acomodar otras tareas en ese bloque.

Cada uno de los intervalos entre mantenimientos es tratado de manera similar a un problema del agente viajero, en donde se buscará mejorar el tiempo gastado en la secuencia bajo análisis mediante una serie de intercambios entre elementos vecinos en las secuencias.

La Búsqueda Tabú se realizará bajo un marco de memoria de corto plazo, con un tiempo tabú para las tareas de cierto número de iteraciones, es decir, las aristas que entran y salen en un intercambio se registran en la lista tabú de control y serán excluidas de ser intercambiadas durante un determinado número de iteraciones.

El procedimiento de búsqueda local, se basa en intercambios entre dos tareas que pertenecen al bloque, del tipo 2-opt.

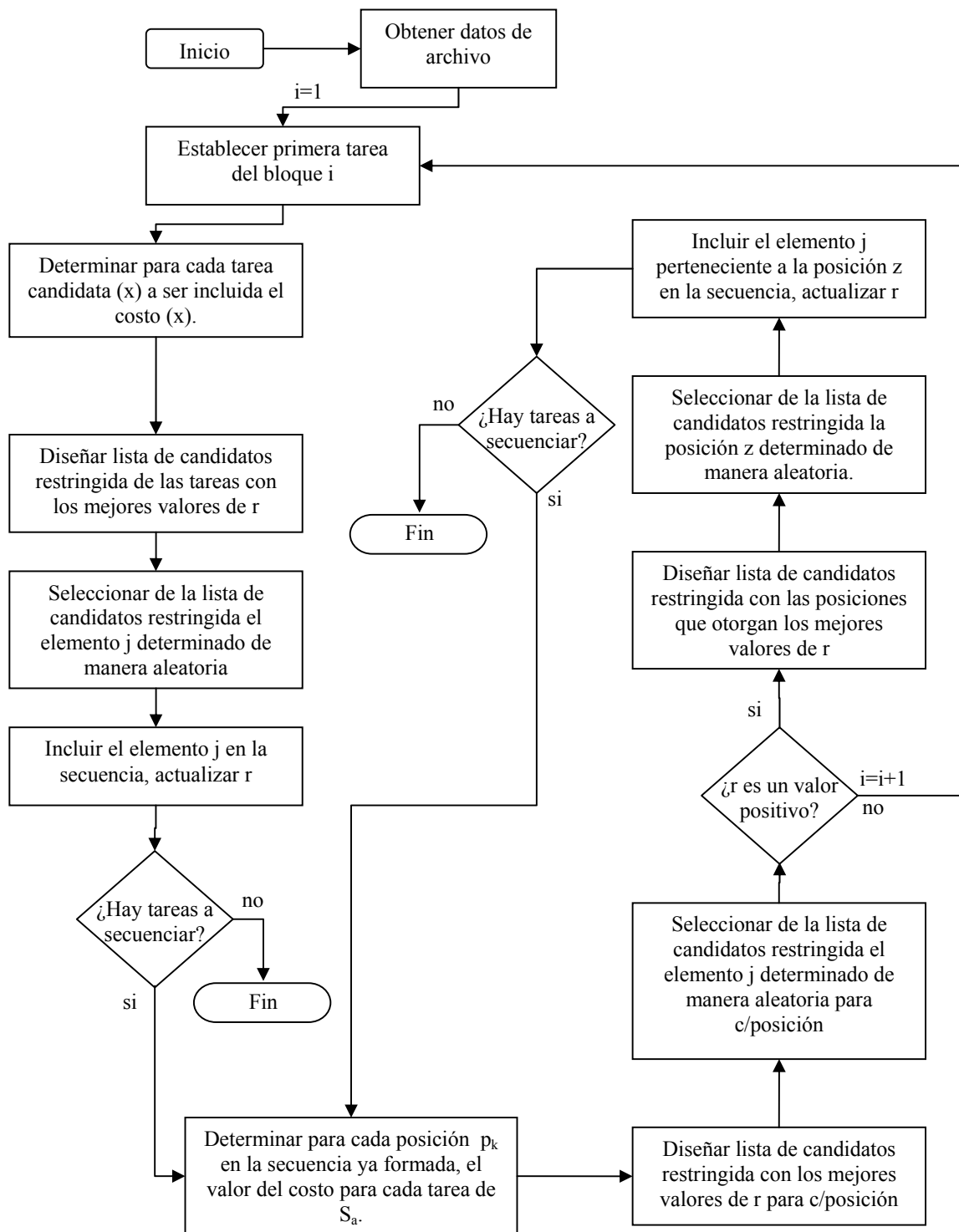


Figura 3.3. Diagrama de flujo de GRASP.

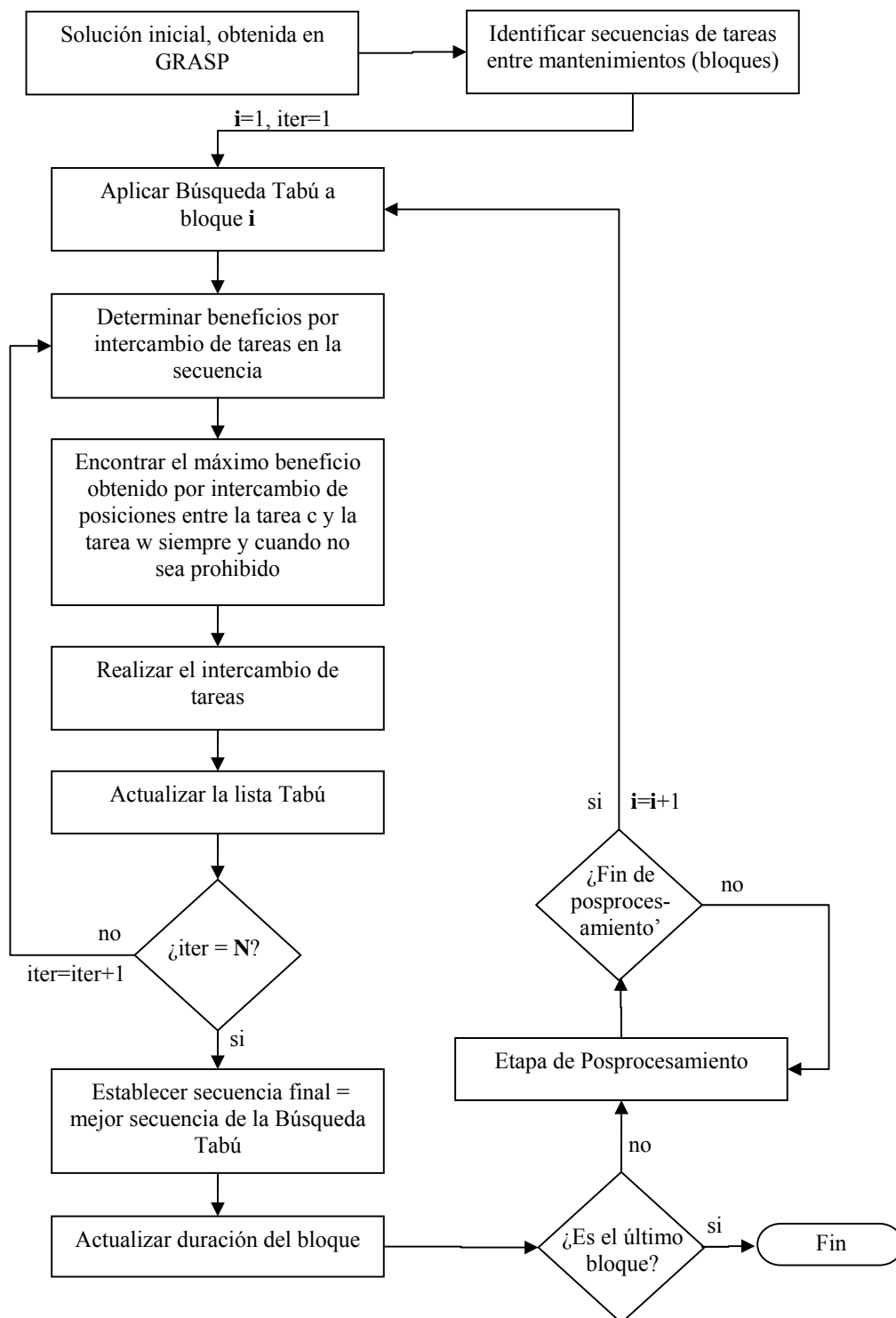


Figura 3.4. Diagrama de flujo de Búsqueda Tabú.

En caso de que en la búsqueda se encuentre una solución mejor a la original, los cambios requeridos se llevarán a cabo de tal modo que la solución final del procedimiento resulte la mejor de todas las soluciones obtenidas por la heurística para cada uno de los tiempos entre mantenimientos.

Una vez que han transcurrido cierto número de iteraciones, se obtendrá la mejor secuencia encontrada por la heurística así como su nueva duración, la cual resulta evidente, será menor o igual a la duración de la secuencia original que se generó con GRASP.

Con el objetivo de dejar más clara la descripción del procedimiento de búsqueda Tabú empleado en el desarrollo de esta investigación, se presenta la figura 3.4 correspondiente al diagrama de flujo del procedimiento. La etapa de posprocesamiento se dejó únicamente indicada, pues se desglosará a detalle en la siguiente sección.

### **3.3.3 Posprocesamiento.**

Una vez que la secuencia de tareas contenidas en un intervalo entre mantenimientos ha sido mejorada a través de Búsqueda Tabú, se continúa con una etapa de posprocesamiento en donde se evaluará la posibilidad de poder incluir en dicho bloque tareas de los bloques que aún no han sido mejorados, con el fin de dejar espacios libres en los intervalos entre mantenimientos restantes, de modo tal que sea posible liberar espacio del último bloque de tareas secuenciadas.

Cada vez que se reciba un bloque de tareas secuenciadas mejorado por Tabú, se determinará para cada una de las posiciones posibles de inserción de tareas de ese bloque los menores incrementos que resulten de insertar una tarea de los bloques posteriores al actual en dichas posiciones. Se seleccionará la posición de inserción que ofrezca el menor incremento en el tiempo de duración del bloque. Se seguirá el procedimiento hasta que no sea posible anexar más tareas al bloque, entonces, se procederá con la Búsqueda Tabú del bloque de tareas siguiente.

Para entender mejor el modo de operar de la etapa de posprocesamiento, en la figura 3.5 se presenta el diagrama de flujo correspondiente, donde podrá visualizarse de un modo más concreto el procedimiento de ésta etapa de la metodología.

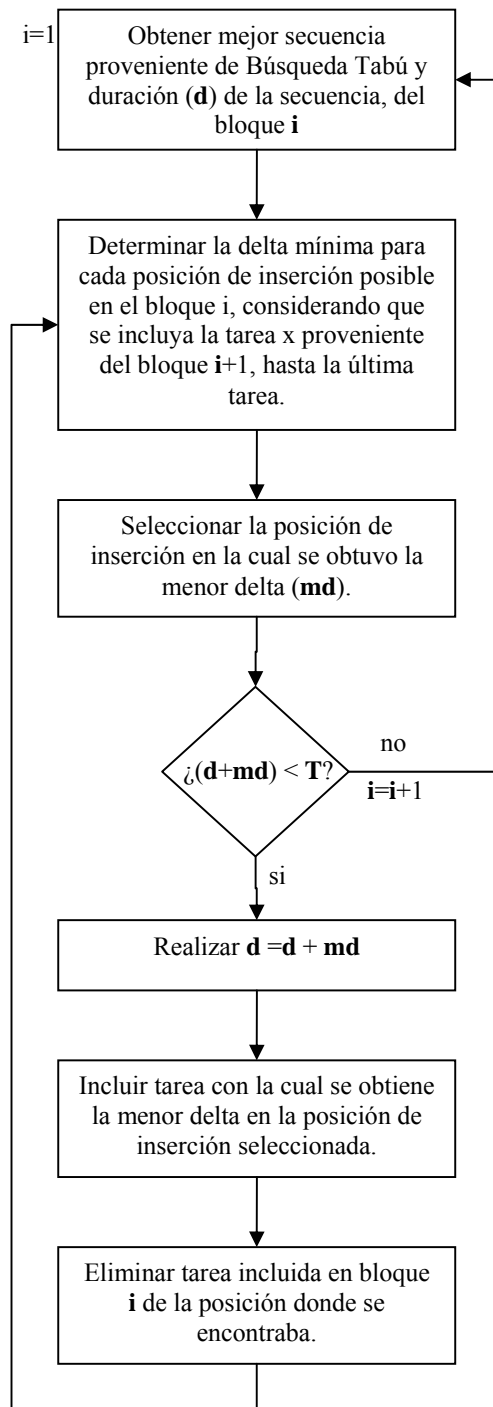


Figura 3.5. Diagrama de flujo de etapa de posprocesamiento



### 3.3.4 Instancias.

Debido a que no encontramos en la literatura revisada ninguna referencia de bases de datos y teniendo en cuenta las similitudes de nuestro problema con el problema de rutas de vehículos con restricción de distancia, se decidió utilizar instancias diseñadas para este último en evaluación del procedimiento diseñado en este trabajo de investigación.

Li, Simchi-Levi y Desrochers [28] en su artículo, tratan el problema de rutas de vehículos con restricción de distancia utilizando como instancias para su estudio un problema de 50 locaciones y otro de 75 locaciones presentado por Christofides y Eilon en 1969. Estas bases de datos fueron diseñadas para problemas de rutas de vehículos simples con distancias simétricas, y no establecen una distancia máxima de recorrido, como se esperaría para un problema con restricción de distancia, por este motivo, los autores generaron para su estudio cuatro posibles restricciones de distancia como una función de distancia del punto más alejado del depósito ( $dm$ ), La restricción de distancia  $\lambda$  toma el valor de  $2.25dm$ ,  $2.5dm$ ,  $3dm$  y  $4dm$ .

Las instancias de Christofides y Eilon, pueden ser encontradas en la página web de la OR-Library [31], donde es posible encontrar una colección de bases de datos para una variedad de problemas de investigación de operaciones.

Con el fin de contar con un punto de referencia para comparar los resultados que brinde el método de solución aquí propuesto, se tomarán para el estudio las instancias utilizadas por Li, Simchi-Levi y Desrochers [28] antes mencionadas.

De modo que, para transformar las instancias de modo que se puedan utilizar como bases de datos para la problemática bajo estudio, se tomarán a las locaciones a ser visitadas como las tareas a ser procesadas en la máquina,  $dm$  (distancia del punto más alejado del depósito) corresponderá a la tarea con el tiempo de procesamiento más el tiempo de preparación de pasar de una etapa de mantenimiento a dicha tarea mayor, mientras que la restricción de distancia  $\lambda$  que puede toma el valor de  $2.25dm$ ,  $2.5dm$ ,  $3dm$  y  $4dm$ , será ahora el tiempo entre mantenimientos.

Cada base de datos, deberá entonces de contener  $n$ , que corresponde al número de tareas a ser secuenciadas, el valor de  $\lambda$  que le corresponde, así como una matriz de  $(n+1) \cdot (n+1)$  cuyo total de columnas y líneas serán el número de tareas más la etapa de mantenimiento, de tal modo que la coordenada  $ij$  (línea  $i$ , columna  $j$ ) corresponderá al valor

$t_{ij}$  que se obtiene al sumar el tiempo de preparación para pasar de la tarea **i** a la tarea **j**  $s_{ij}$  más el tiempo de preparación de la tarea **j**  $p_j$ ,  $t_{ij} = s_{ij} + p_j$ , la matriz incluye una línea y una columna que contienen los valores que relacionan los tiempos de preparación más tiempo de procesamiento de pasar de cada tarea a la etapa de mantenimiento y viceversa.

### ***3.4 Conclusiones del capítulo de formulación del problema y descripción de la metodología***

El presente capítulo, tiene como objetivo brindar una explicación detallada del tipo de problema que se aborda en esta investigación, así como de establecer la metodología empleada para la resolución de la problemática.

En cuanto a la formulación del problema se presentó la problemática a tratar detallando las condiciones y supuestos básicos a considerar.

En lo que respecta a la descripción de la metodología se buscó describir el cómo se llegó al entendimiento del problema, el diseño de las instancias a considerar así como brindar una explicación detallada del modo de operar de las heurísticas y métodos seleccionados para la investigación.

En este capítulo se brindó la explicación detallada del problema a tratar, definiéndolo como un problema de secuenciación de tareas, con tiempos de preparación dependientes, en una máquina con etapas de mantenimiento periódico, con el objetivo de minimizar el tiempo en que la empresa demoraría en producir el total de tareas, que bien se puede traducir en minimizar el tiempo de terminación de la última tarea.

Con el fin de lograr el entendimiento completo del problema y de buscar herramientas afines al mismo, se visualizó la problemática comparándola con la situación que se trata en un problema de rutas de vehículos con restricción de distancia. En base a estas similitudes, fue posible obtener datos de instancias para probar el procedimiento heurístico que se pretende utilizar.

El problema será resuelto en básicamente dos fases. La primera fase es la llamada fase de construcción, cuyo objetivo es encontrar una solución factible buena mediante la aplicación del heurístico GRASP, la segunda fase, la fase de mejora, esta dada por dos heurísticas, la primera la de Búsqueda Tabú utilizada como una herramienta de mejora de

soluciones dadas por GRASP para bloques de tareas secuenciadas entre mantenimientos; mientras que la segunda corresponde a un procedimiento de posprocesamiento en la que el objetivo es liberar espacio de los últimos bloques con el fin de disminuir la cantidad de tareas en el último bloque y de ser posible eliminar la necesidad de alguna etapa de mantenimiento.

## CAPÍTULO 4.

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 Introducción a la discusión de resultados

En este capítulo, se presentarán los resultados obtenidos al seguir el procedimiento descrito en el Capítulo, 3 específicamente en el apartado de descripción de la metodología.

Con el fin de probar la efectividad del procedimiento heurístico propuesto en esta investigación, se realizó un trabajo experimental. Los algoritmos y procedimientos que integran la metodología fueron codificados en Visual C++ 6.1, corridos en PC Intel® Core™ 2CPU con procesador de 1.83GHz y 1.00GB de RAM, trabajando bajo el sistema operativo Windows XP.

A manera de tabla, se exponen las principales características de los resultados obtenidos para cada base de datos analizada.

Se presentan también las mejores soluciones para cada una de las instancias analizadas en forma de la mejor secuencia encontrada, así como una comparación de los resultados obtenidos con los expuestos por Li, Simchi-Levi y Desrochers [24] en su artículo titulado On the Distance Constrained Vehicle Routing Problem, donde hicieron uso de las mismas instancias.

Las instancias utilizadas en el trabajo experimenta, corresponden a las presentadas por Christofides y Eilon en 1969, mismas que han sido utilizadas en numerosos artículos, las cuales se pueden encontrar en la OR-Library [31] (Operational Research Library) donde se encuentra disponible una colección de bases de datos para una variedad de problemas de investigación de operaciones, donde se incluyen los problemas de rutas de vehículos.

Con el fin de comprobar el comportamiento del procedimiento con instancias asimétricas, se utilizaron instancias para el problema de rutas de vehículos capacitados asimétricos, que se pueden encontrar en el recurso electrónico VRPLIB [42], los resultados obtenidos se presentan en el presente capítulo.

## 4.2 Resultados obtenidos

Se presentan a continuación, los resultados obtenidos de la aplicación de la heurística condensados en una tabla.

En la tabla 4.2 es posible apreciar la columna denominada base, en ella se establece la base de datos (instancia) a los cuales pertenecen los resultados que aparecen en las columnas siguientes, dado que las instancias provienen de las presentadas por Christofides y Eilon, a cada instancia se les ha colocado en el nombre las tres letras *cye*, seguidas por la cantidad de elementos *n* de que consta la instancia. Debido a que originalmente las bases de datos están dadas para rutas de vehículos, *n* equivale a la cantidad de clientes a visitar, lo cual, aplicado en la problemática a analizar, corresponde a la cantidad de tareas a ser procesadas por la máquina; después de la especificación de la cantidad de tareas y después del guión se expresa el valor de  $\lambda$  que corresponda, en la tabla 4.1 se expresa la relación de la  $\lambda$  utilizada para establecer la máxima distancia permitida, es decir, el tiempo que debe de pasar entre mantenimientos.

$\lambda$	<i>cye50</i>	<i>cye75</i>
<i>2.25dm</i>	97.968	96.485
<i>2.5dm</i>	109.829	108.167
<i>3dm</i>	131.795	129.800
<i>4dm</i>	175.727	173.07
<i>dm</i>	43.932	43.2666

Tabla 4.1. *Tiempos entre mantenimientos para las diferentes instancias.*

En la tabla 4.2, la columna denominada Iteraciones enlista los números máximos de iteraciones que se le dio al programa, estas iteraciones tienen reflejo en la calidad de la solución generada por GRASP, así mismo, la columna # de iteración presenta la iteración en la que se suscitó dicha “mejor solución”.

La columna Tiempo, expone la cantidad de tiempo en segundos que el programa destinó para desarrollar el número de iteraciones programadas. Los segundos son redondeados a su entero menor.

En la tabla es posible observar también, dos bloques de tres columnas cada uno de ellos, denominados Resultados GRASP y Resultados Finales, tal como sus nombres lo indican, las tres columnas debajo de resultados GRASP incluyen la información sobre duración, cantidad de bloques y duración DVRP para los resultados que se obtuvieron al utilizar el heurístico GRASP, del mismo modo que el bloque de columnas de Resultados Finales engloba la información sobre duración, cantidad de bloques y duración DVRP para los resultados obtenidos al completar totalmente el procedimiento de solución.

La columna denominada Duración, se utiliza para exponer los resultados referentes a la duración total del problema visto como se expone en la formulación del problema, es decir, una serie de tareas secuenciadas dentro de un intervalo entre mantenimientos definido fijo. Por lo tanto, esta duración se tomará contemplando el número de intervalos entre mantenimientos requeridos para secuenciar el total de tareas, más el tiempo requerido para procesar las tareas del último bloque, cuyo fin no reside en un mantenimiento pues el tiempo de terminación es menor al tiempo  $T$  definido como tiempo entre mantenimiento.

En la columna Bloques se colocan la cantidad de bloques de tareas secuenciada que se requirieron para el total de tareas, es decir, si se desea saber el número de mantenimientos requeridos, bastaría con restar a cada elemento de dicha columna el valor uno.

Para finalizar, la columna Duración DVRP establece la duración si se tomará al problema como un problema de rutas de vehículos con restricción de distancia, para definir esta duración, fue necesario simplemente contemplar el costo (tiempo) requerido para pasar de una tarea a otra, sin importar si el tiempo fijo de mantenimientos se acorta, y considerando que la última tarea deberá regresar al depósito, es decir, deberá de regresar a una etapa de mantenimiento.

En las tablas de resultados se incluyen las tres mejores soluciones encontradas para cada base de datos analizada. Cabe aclarar que los resultados han sido redondeados a dos dígitos.

Base	Iteraciones	# de iteración	Tiempo	Resultados GRASP			Resultados Finales		
				Duración	Bloques	Duración DVRP	Duración	Bloques	Duración DVRP
cye50-2.25dm	450	65	1	833.76	9	832.44	827.67	9	839.90
cye50-2.25dm	6000	5192	5	810.16	9	784.82	742.84	8	751.70
cye50-2.25dm	50000	48669	51	806.83	9	772.91	748.74	8	744.62
cye50-2.5dm	370	210	0	798.77	8	788.10	722.70	7	715.79
cye50-2.5dm	1000	372	1	795.23	8	785.90	736.84	7	714.82
cye50-2.5dm	6000	5853	5	689.85	7	693.51	627.51	6	635.12
cye50-3dm	1000	202	1	691.53	6	671.38	599.19	5	611.19
cye50-3dm	6000	5506	6	691.04	6	680.45	620.35	5	638.03
cye50-3dm	20000	11865	20	597.98	5	617.39	597.98	5	616.73
cye50-4dm	1000	688	2	598.42	4	634.35	571.11	4	598.29
cye50-4dm	1300	1017	1	590.68	4	614.52	565.57	4	595.49
cye50-4dm	50000	1437	63	557.26	4	583.50	557.26	4	570.70

Tabla 4.2. *Tabla de resultados para instancias con 50 tareas.*

Base	Iteraciones	# de iteración	Tiempo	Resultados GRASP			Resultados Finales		
				Duración	Bloques	Duración DVRP	Duración	Bloques	Duración DVRP
cye75-2.25dm	1000	418	2	1287.44	14	1257.83	1115.01	12	1107.92
cye75-2.25dm	10000	3526	22	1200.24	13	1186.70	1200.24	13	1167.04
cye75-2.25dm	50000	38625	128	1192.05	13	1167.88	1192.05	13	1180.86
cye75-2.5dm	100	83	0	1118.43	11	1080.62	1010.61	10	987.84
cye75-2.5dm	2000	1492	4	1040.50	10	1040.70	1016.51	10	1016.17
cye75-2.5dm	50000	38407	127	1017.69	10	1027.62	1011.92	10	997.47
cye75-3dm	100	0	0	967.55	8	989.45	846.97	7	825.05
cye75-3dm	1000	157	2	939.01	8	931.27	849.56	7	863.91
cye75-3dm	10000	6923	23	864.43	7	872.14	864.43	7	860.35
cye75-4dm	1000	479	3	801.90	5	806.33	770.44	5	770.81
cye75-4dm	5000	1884	14	780.74	5	801.34	762.91	5	793.73
cye75-4dm	50000	13526	154	769.72	5	804.08	751.27	5	767.14

Tabla 4.3. *Tabla de resultados para instancias con 75 tareas.*



### 4.3 Mejores secuencias

A continuación se presenta un condensado de las secuencias con las cuales se obtuvieron las mejores soluciones en duración en base a la problemática que se busca analizar.

cye50-2.25dm

0 12 47 18 4 17 37 5 49 38 11 32 46 0 27 1 22 2 29 21 16 50 9 0 15 33 45  
44 42 0 48 23 7 43 24 25 14 6 0 20 3 28 31 26 8 0 13 41 19 40 0 36 35 0  
10 39 30 34

cye50-2.5dm

0 46 47 18 4 17 44 15 45 37 5 12 0 32 11 38 9 16 50 34 21 29 2 22 1 27 0  
10 30 39 33 49 0 48 8 26 23 7 43 24 6 0 31 28 36 35 20 3 0 14 25 13 41 40  
19 42

cye50-3dm

0 46 32 11 38 16 50 34 30 9 49 5 37 17 4 18 47 12 0 27 1 22 2 10 39 33 45  
15 44 0 48 8 26 23 7 43 24 14 25 6 0 21 29 20 35 36 3 28 31 0 13 41 42 19  
40

cye50-4dm

0 46 12 47 18 4 17 37 44 45 15 5 49 9 30 34 21 50 16 38 11 32 27 0 1 22  
20 35 36 3 28 31 26 8 48 23 7 43 24 14 6 0 25 13 41 40 19 42 33 10 39 0 2  
29

cye75-2.25dm

0 75 26 67 34 46 7 35 8 52 27 29 45 4 68 6 0 17 40 12 58 10 72 39 9 32 44  
3 51 0 16 63 33 1 73 62 28 74 2 30 0 53 11 14 54 19 0 48 13 57 15 5 47 0  
43 41 42 64 22 0 25 55 18 50 0 23 56 24 49 0 36 69 61 21 0 31 38 65 0 37  
71 60 70 20 0 59 66

cye75-2.5dm

0 75 6 68 4 45 29 27 52 8 19 35 7 46 34 67 26 0 17 51 16 3 44 32 9 39 72  
10 58 40 12 0 30 48 5 15 57 13 54 14 53 0 2 74 47 21 28 62 73 1 33 63 0  
25 55 18 50 0 38 11 65 66 59 0 43 42 41 56 23 49 24 0 36 69 71 60 70 20  
37 0 22 64 61 0 31

cye75-3dm

0 67 26 12 40 17 51 6 68 2 28 74 30 48 47 5 29 45 4 75 0 34 46 52 8 7 35  
53 14 19 54 57 15 13 27 0 33 73 62 22 64 42 41 43 1 63 16 3 44 32 0 23 56  
49 24 18 50 9 39 72 58 0 37 20 70 60 71 36 69 61 21 0 10 38 65 66 11 59 0  
31 55 25

cye75-3dm

0 6 51 17 40 12 26 67 34 46 8 35 19 52 27 45 29 48 30 74 28 62 73 2 68 4  
75 0 33 1 63 16 3 44 32 9 39 72 58 10 38 65 66 11 59 14 53 7 0 21 22 64  
42 43 41 56 23 49 24 18 50 25 0 61 47 36 69 71 60 70 20 37 5 15 57 13 54  
0 31 55

#### **4.4 Interpretación de resultados obtenidos**

Al realizar un análisis a las tablas de los resultados obtenidos, se pueden destacar varias conclusiones.

Entre una de las principales conclusiones que es posible asimilar de los resultados, se encuentra el hecho de que comenzar con una solución muy buena proveniente de GRASP puede resultar contraproducente, es decir, sin duda comenzar con una buena solución favorecerá a que el algoritmo de posprocesamiento otorgue resultados buenos, pues sería lo equivalente a mejorar algo que ya es bueno, sin embargo, puede darse el punto que la solución dada de GRASP resulte tan buena que sea un tanto difícil para el procedimiento de posprocesamiento realizar alguna mejora relevante. Teniendo en mente esta característica del programa, es posible que resulte mejor comenzar con una solución lo suficientemente buena para que dé buenos resultados, pero no tan buena que no sea posible mejorarla con el procedimiento de posprocesado. Es posible apreciar este fenómeno sobre todo en la bases de datos cye75-2.25dm, cye75-2.5dm y cye75-3dm, instancias en las que el mejor resultado en cuanto a duración se dio cuando se comenzó el posprocesamiento con un resultado de GRASP que no es el mejor que se pudo haber obtenido.

Algo positivo que es posible observar de los resultados, es que en cinco de ocho de las instancias probadas, se logró la reducción de al menos una etapa de mantenimiento, es decir, en el 62.5% de los casos probados el heurístico de posprocesamiento logró mejorar la solución hasta el punto de ahorrarle a la compañía una o más etapas de mantenimiento para la secuenciación de las órdenes de trabajo actuales.

Aquellas soluciones iniciales en las que fue posible reducir al menos un mantenimiento, son más propensos a ser considerados como mejor solución para esa instancia, puesto que al reducir una etapa de mantenimiento, se estará reduciendo la cantidad de intervalos entre mantenimiento (tiempo) que se debe considerar.

Sobre la mejora en el valor de la duración, refiriéndose a la duración que está relacionada directamente con la que busca minimizar la función objetivo de la problemática que se está tratando, ésta se redujo con apoyo de la heurística de posprocesamiento en el 75% de los casos considerados como “mejores soluciones” y en el 79.17% del total de casos presentados en las tablas.

En cuanto a la duración tomada como DVRP, para las iteraciones manejadas en las tablas de solución, fue posible reducir dicho costo en el 91.6% de los casos presentados.

Tal como es posible evidenciar con las tablas de resultados y las conclusiones que se presentan en este capítulo, el heurístico completo de solución de la problemática puede ser considerada como una herramienta útil para la determinación de una secuenciación de tareas con tiempos de preparación dependientes en una máquina y con etapas de mantenimiento periódico fijos con una duración del tiempo en que la empresa demoraría en producir el total de tareas considerablemente bueno, es decir, con un tiempo de terminación de la última tarea satisfactorio.

#### **4.5 Comparación de duración DVRP**

Con el fin de darle un mayor impacto y validación a la investigación, se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos por Li, Simchi-Levi y Desrochers [28], quienes determinaron la distancia DVRP de los viajes necesarios para visitar a los clientes de las instancias dichos resultados se encuentran en la tabla 4.4.

Los resultados experimentales presentados por Li, Simchi-Levi y Desrocher [28] se enfocan en el objetivo de minimizar la distancia total recorrida, dejando a parte el segundo objetivo que sería el de minimizar el número de vehículos utilizados para realizar los viajes.

Con el fin de tener un marco de referencia para validar sus resultados, los autores utilizaron una cota inferior (LB) para la solución óptima del problema de rutas de vehículo con restricción de distancia, esta cota fue obtenida al expresar el problema como un problema del agente viajero múltiple con ventanas de tiempo (mTSPTW), por Li, Simchi-

Levi y Desrocher [28] utilizaron el procedimiento de Desrosiers, Soumis y Desrochers [8] para obtener dicha cota inferior.

Para realizar la transformación del problema de rutas de vehículos con restricción de distancia a un mTSPTW, la restricción de distancia  $\lambda$  se interpreta como la restricción de la ventana de tiempo  $[0, \lambda]$  para todos los nodos a excepción del depósito, a manera de recordatorio, una restricción de ventana de tiempo  $[a_i, b_i]$  para el nodo  $i$ , significa que el nodo  $i$  no puede ser servido por un vehículo antes que  $a_i$  ni después que  $b_i$ . Si el vehículo llega al nodo  $i$  antes de  $a_i$ , puede esperar en esa locación hasta el tiempo  $a_i$  para empezar a servir al nodo [28].

Según Li, Simchi-Levi y Desrocher [28], al como en un mTSPTW, el depósito es dividido en un depósito de salidas y otro de llegadas, para el problema, el depósito de salidas posee una ventana de tiempo de  $[0, 0]$ , mientras que la ventana de tiempo del depósito de llegadas es de  $[0, \lambda]$ . Todas las rutas factibles parten del depósito de salidas y llegan al depósito de llegadas. El grafo utilizado en el mTSPTW es casi exacto al problema de rutas de vehículos con restricción de distancia. La única diferencia es que todos los arcos que salen del depósito original están ahora dejando el depósito de salidas y todos los arcos que llegan al depósito original están ahora llegando al depósito de llegadas. Todas las distancias en el grafo permanecen iguales [28].

La cota inferior presentada por los autores se representa en la columna denominada LB de la tabla correspondiente.

Los resultados obtenidos por Li, Simchi-Levi y Desrocher y su heurística, se colocaron en la columna Rh.

	2.25dm			2.5dm			3dm			4dm		
	LB	Rh	Bloq.	LB	Rh	Bloq.	LB	Rh	Bloq.	LB	Rh	Bloq.
cye50	542	686.70	8	510	616.48	7	472	547.82	6	443	485.26	4
cye75	738	1143.25	15	667	946.32	11	610	762.16	7	572	679.75	5

Tabla 4.4. Resultados presentados en Li, Simchi-Levi y Desrocher [28].

En la tabla 4.5, se observan los resultados obtenidos por medio de la metodología empleada para la presente investigación, donde la columna Bloq. establece la cantidad de intervalos entre mantenimientos requeridos para la secuenciación de las tareas, considerando también la última secuencia de tareas aún cuando no se requiera aplicar un mantenimiento por no haberse satisfecho el tiempo requerido entre mantenimientos.

Como en el artículo presentado por Li, Simchi-Levi y Desrocher [28] se obtienen resultados para un problema de rutas de vehículos con restricción de distancia, fue necesario considerar la secuencia completa del total de tareas como un problema de rutas de vehículos, de modo que no se contemple que un bloque de tareas deba cubrir un tiempo  $T$  para que se lleve a cabo un mantenimiento, simplemente se toman en cuenta los tiempos de preparación más procesamiento de las tareas en el orden que aparecen en la secuencia incluyendo las etapas de mantenimiento. De tal forma que, cada bloque de tareas secuenciadas será lo equivalente una ruta que debería seguir el vehículo en un problema de rutas de vehículos.

Debe de recordarse que al tratarse de una adaptación de un problema de rutas de vehículos, habrá que considerar el hecho de que, el vehículo, después de visitar al último cliente debe de regresar al depósito, es decir, al tiempo total obtenido de sumar los costos de pasar de una tarea a otra habrá que añadirle el costo de pasar de la última tarea del último bloque de la secuencia. El valor obtenido de realizar dicha operación en la secuencia, se colocó en la columna DVRP.

	2.25dm		2.5dm		3dm		4dm	
	DVRP	Bloq.	DVRP	Bloq.	DVRP	Bloq.	DVRP	Bloq.
cye50	751.70	8	635.12	6	616.73	5	570.70	4
cye75	1107.92	12	997.47	10	825.05	7	767.14	5

Tabla 4.5. *Resultados obtenidos por medio de la heurística.*

Se determinó una fracción que representara la relación existente entre los resultados obtenidos mediante la heurística utilizada en este estudio y los resultados obtenidos en el estudio realizado por Li, Simchi-Levi y Desrocher [28], esta fracción determina el

desempeño que obtuvo la heurística con las diferentes bases de datos, los resultados se presentan en la tabla 4.6.

	2.25dm		2.5dm		3dm		4dm	
	DVRP/LB	DVRP/Rh	DVRP/LB	DVRP/Rh	DVRP/LB	DVRP/Rh	DVRP/LB	DVRP/Rh
Cye50	1.38	1.09	1.245	1.03	1.31	1.13	1.29	1.176
Cye75	1.50	0.969	1.495	1.05	1.35	1.08	1.34	1.13

Tabla 4.6. *Fracciones de desempeño de la heurística.*

En la tabla 4.7 se presentan las fracciones de desempeño obtenida por Li, Simchi-Levy y Desrocher [28] en su artículo, lo que equivale a la relación Rh/LB.

	2.25dm	2.5dm	3dm	4dm
cye50	1.32	1.25	1.21	1.16
cye75	1.28	1.26	1.19	1.12

Tabla 4.7. *Fracciones de desempeño de la heurística (Tomada de Li, Simchi-Levy y Desrocher [28], p.11).*

Un punto importante a destacar en esta comparación, es que el principal objetivo del problema presentado en el artículo era el de minimizar la distancia total recorrida mientras que en el problema abordado en esta investigación el objetivo era minimizar la el tiempo de terminación de la última tarea (distancia recorrida para llegar al último cliente visitado) y se estableció para el problema definido para esta investigación que dado que los tiempos en que se debe de ejecutar un mantenimiento son fijos, entre menor cantidad de mantenimientos se utilicen, mejor será la solución de la problemática, trasladado a términos de DVRP, la heurística presentada en este trabajo de investigación busca minimizar la cantidad de vehículos requeridos para visitar al total de clientes.

Tomando esto como referencia, la diferencia de objetivos, se observa una disminución en la cantidad de mantenimientos (vehículos) requeridos en el 50% de los casos, lo que es bueno para la problemática a estudiar en esta investigación, pero puede o no resultar conveniente para el cumplimiento del objetivo del artículo.

En cuanto a las duraciones, resulta comprensible el hecho de que con el heurístico presentado en el artículo se obtengan mejores soluciones, es decir, soluciones que se acercan más a la cota inferior sin embargo, los resultados obtenidos con la metodología empleada en esta investigación son bastante aceptables, considerando que el objetivo del método no era el minimizar la distancia total recorrida. La mayor diferencia de las fracciones de desempeño observadas se da en la base de datos cye75-2.5dm, donde las fracciones difieren en 0.235puntos, siendo mejor el resultado brindado por la heurística.

Al comprar las fracciones de DVRP/Rh, es decir, los resultados, en cuanto a duración, encontrados por la heurística de esta investigación comparados con los resultados del método heurístico seguido en el artículo analizado, resultan muy cercanas a la unidad, lo que significaría que los valores obtenidos en ambos casos son idénticos. Inclusive en cye75-2.25dm se observa que la duración encontrada en el análisis de esta investigación (DVRP) es menor a la encontrada por los autores en su estudio. Para el peor de los casos la relación DVRP/Rh toma un valor de 1.176, es decir, el valor tomado DVRP supera en un 17.6% al valor obtenido por los autores definido como Rh.

Al comparar las respuestas obtenidas al aplicar la metodología seleccionada para ser aplicada en este estudio en las bases de datos seleccionadas, con las que se obtuvieron en el artículo tomado como referencia, es posible evidenciar que los procedimientos heurísticos definidos y aplicados resultan una herramienta válida y útil para las problemáticas en las que fue puesta a prueba, considerando que lo que se busca obtener es una solución que siga el mismo objetivo para el que la metodología fue diseñada.

#### **4.6 Desempeño del procedimiento con bases de datos asimétricas**

Con el fin de probar la comportamiento del procedimiento diseñado para esta investigación en bases de datos con costos asimétricos se tomaron instancias de prueba para ACVRP (Asymmetric Capacitated VRP), encontradas en la VRPLIB [42].

Se tomaron para ser analizadas las instancias a034-02f, a036-03f, a039-03f y a045-03f, donde los dos últimos dígitos representan la cantidad de elementos a ser secuenciados más el mantenimiento. Para estas bases de datos, al igual que con las de Christofides y Eilon, fue necesario utilizar el procedimiento descrito por, Simchi-Levi y Desrocher [28] para obtener la restricción de distancia equivalente al tiempo entre mantenimientos  $\lambda$ . Las

bases de datos fueron resueltas por medio del programa diseñado, obteniéndose los siguientes resultados.

Base	Iteraciones	# de iteración	Tiempo	Resultados GRASP		Resultados Finales	
				Duración	Bloques	Duración	Bloques
2.25dm	100	30	0	2441	4	2121	3
2.25dm	1000	491	0	2366	4	2042	3
2.25dm	5000	3381	4	2040	3	1921	3
2.5dm	100	67	0	2245	3	2245	3
2.5dm	1000	605	1	2204	3	2138	3
2.5dm	5000	1802	5	2138	3	2047	3
3dm	100	38	0	2142	3	2142	3
3dm	750	199	1	2139	3	1879	2
3dm	2000	777	2	2117	3	2117	3
4dm	100	60	0	2006	2	1798	2
4dm	1000	692	2	1955	2	1914	2
4dm	5000	1225	6	1948	2	1894	2

Tabla 4.8. Tabla de resultados para instancias con 44 tareas, a045-03f.

Base	Iteraciones	# de iteración	Tiempo	Resultados GRASP		Resultados Finales	
				Duración	Bloques	Duración	Bloques
2.25dm	100	38	0	2039	3	1895	3
2.25dm	1000	328	0	1947	3	1947	3
2.25dm	5000	4757	3	1893	3	1893	3
2.5dm	100	38	0	2061	3	1917	3
2.5dm	1000	725	1	1898	3	1785	3
2.5dm	5000	3484	3	1823	3	1823	3
3dm	20	8	0	2117	3	1910	2
3dm	1000	436	2	1924	2	1896	2
3dm	5000	1884	4	1842	2	1728	2
4dm	100	12	0	1801	2	1596	2
4dm	1000	242	1	1747	2	1596	2
4dm	5000	3240	4	1715	2	1713	2

Tabla 4.9. Tabla de resultados para instancias con 38 tareas, a039-03f.



Base	Iteraciones	# de iteración	Tiempo	Resultados GRASP		Resultados Finales	
				Duración	Bloques	Duración	Bloques
2.25dm	100	62	0	1857	3	1754	3
2.25dm	5000	1353	2	1820	3	1736	3
2.25dm	10000	7116	5	1750	3	1750	3
2.5dm	100	13	0	1924	3	1785	3
2.5dm	1000	708	0	1902	3	1902	3
2.5dm	5000	1110	3	1823	3	1785	3
3dm	5	4	0	2139	3	2139	3
3dm	5000	29	4	1649	2	1614	2
3dm	20000	15086	13	1609	2	1462	2
4dm	100	49	0	1760	2	1760	2
4dm	1000	105	1	1676	2	1676	2
4dm	5000	2961	4	1657	2	1657	2

Tabla 4.10. Tabla de resultados para instancias con 35 tareas, a036-03f.

Base	Iteraciones	# de iteración	Tiempo	Resultados GRASP		Resultados Finales	
				Duración	Bloques	Duración	Bloques
2.25dm	100	51	1	1856	3	1768	3
2.25dm	1000	420	1	1709	3	1709	3
2.25dm	5000	4029	3	1644	3	1619	3
2.5dm	100	5	0	1785	3	1493	2
2.5dm	1000	981	1	1780	3	1431	2
2.5dm	5000	4156	3	1446	2	1446	2
3dm	100	72	0	1542	2	1542	2
3dm	2000	1608	1	1529	2	1446	2
3dm	5000	3270	3	1522	2	1455	2
4dm	100	31	0	1713	2	1570	2
4dm	1000	840	1	1528	2	1493	2
4dm	5000	2885	3	1493	2	1493	2

Tabla 4.11. Tabla de resultados para instancias con 33 tareas, a034-02f.

#### **4.7 Interpretación de resultados para bases de datos asimétricas.**

Al resolver las bases de datos asimétricas con el procedimiento diseñado en este trabajo de investigación, se observó que si fue posible efectuar mejoras en las soluciones iniciales obtenidas mediante GRASP al aplicar la búsqueda tabú por bloques y el posprocesamiento. En el 75% de los casos, de las bases de datos a039 y a045, fue posible mejorar la duración, así como en el 50% de los casos en la base de datos a036 y en el 66.67% de la a034.

La heurística de posprocesamiento logró reducir la duración en el 81.25% de los casos considerados como “mejores soluciones” y en el 66.67% del total de casos analizados.

#### **4.8 Conclusiones del capítulo discusión de resultados**

En este capítulo se expusieron los resultados obtenidos mediante la utilización de la metodología descrita en el capítulo tres.

Se probó el programa a diferentes iteraciones, llegándose a la conclusión de que el comenzar con una muy buena solución de GRASP o una simplemente buena solución, se observa por supuesto que empezar con una buena solución es importante, sin embargo, si se realiza un esfuerzo por comenzar el posprocesamiento con una muy buena solución de GRASP, difícilmente se logrará mejorar dicha solución.

La etapa de posprocesamiento demostró ser exitosa, al reducir en la mayoría de los casos probados la cantidad de mantenimientos requeridos para el procesamiento del total de tareas. Punto realmente importante, al considerar que el tiempo de terminación de la última tarea, cuyo tiempo es el que se desea minimizar según la función objetivo, se encuentra total y directamente relacionado con la cantidad de mantenimientos que se emplean para completar el procesamiento del total de tareas.

Como validación de los resultados del programa, se hizo referencia al artículo presentado por Li, Simchi-Levi y Desrocher [28] en el cual se realizó un análisis de la eficacia de un procedimiento heurístico aplicado a un problema de rutas de vehículos con restricción de distancia (DVRP). Para realizar la validación, fue necesario realizar un análisis de la secuencia final obtenida en la metodología empleada en esta investigación, de tal forma que fue considerada como un problema DVRP y se obtuvo su duración. Dada esta transformación, resultó posible el realizar la comparación de los resultados entre el heurístico utilizado en el artículo y el utilizado en la presente investigación.

Se destacó el hecho de que los objetivos para el que fue diseñado cada uno de los métodos heurísticos difieren, por una parte, los autores Li, Simchi-Levi y Desrocher desarrollaron su heurístico con el fin de minimizar la distancia total recorrida, que equivaldría a minimizar el tiempo total de procesamiento de las tareas, por parte de esta investigación, el objetivo es minimizar el tiempo de terminación de la tareas, el cual se encuentra directamente relacionado con la cantidad de mantenimientos que se deban emplear, lo cual, traducido a lenguaje de DVRP equivaldría a la cantidad de vehículos a utilizar, aspecto los autores del artículo no incluyeron en el análisis.

El procedimiento mostró un comportamiento aceptable al ser probado con instancias asimétricas.

Al realizar la comparación de los resultados del artículo y los resultados de la metodología aplicada aquí, se concluye que la metodología empleada en esta investigación resulta en soluciones adecuadas, donde si bien no se lograron mejorar los resultados que Li, Simchi-Levi y Desrocher presentan en su artículo en cuanto a duración, salvo en un caso, si fue posible obtener resultados muy cercanos a estos, que pueden ser considerados como aceptables. Además de obtenerse buenos resultados en el aspecto de duración tipo DVRP, que no era el parte del objetivo de la metodología, en el 50% de los casos analizados, se logró una minimización del número de bloques (cantidad de mantenimientos, cantidad de vehículos) que como se mencionó resulta en beneficios en cuanto a mejores soluciones para la problemática presentada.

# CAPÍTULO 5.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Tal como se explicó en el capítulo 1, la creciente automatización en la industria manufacturera, aunada a la alta competitividad que enfrentan las empresas en la actualidad, vuelve importante el contar con herramientas que les permitan incrementar su productividad tomando en cuenta las necesidades de la industria moderna entre las que se encuentra el mantenimiento.

Las empresas dependen cada vez más de su maquinaria para la fabricación de sus productos, para que estas se funcionen adecuadamente, es vital realizar mantenimiento a dichas máquinas que permitan alargar la vida útil de las mismas y asegurar que su desempeño sea el mejor.

Los problemas de secuenciación de las tareas han sido abordados y estudiados en múltiples ocasiones por numerosos investigadores desde diversos enfoques, al considerar a la secuenciación de tareas como una herramienta útil para lograr beneficios en la empresa. Sin embargo, pocos han sido los estudios publicados que relacionan la secuenciación de tareas con etapas de mantenimiento de las máquinas, en las cuales se espera que la máquina quede inactiva durante dichas etapas.

Esta investigación, se abordó el problema de secuenciación de tareas en una máquina con tiempos de preparación dependientes y con etapas de mantenimiento periódico previamente programadas.

La realización del presente trabajo de investigación buscó mejorar el estado del arte referente al problema de secuenciación de tareas en una máquina con etapas de mantenimiento. Así como brindar una herramienta que pudiera ser implementada en la

industria, obteniéndose resultados aceptables que puedan traducirse en beneficios tangibles para la empresa.

La hipótesis del trabajo de investigación establece que “la aplicación de una metodología, basada en técnicas metaheurísticas, para la secuenciación de tareas en una máquina, con tiempos de preparación dependientes de la secuencia y que tome en consideración estados de mantenimiento cada cierto intervalo de tiempo fijo permite obtener soluciones de calidad en un tiempo computacional razonable al problema propuesto.”. La hipótesis, se encuentra enteramente ligada con el objetivo general de la investigación, la cual se estableció en el capítulo 1, y que consiste en “diseñar una metodología basada en técnicas metaheurísticas, para la secuenciación de tareas en una máquina, con tiempos de preparación dependientes de la secuencia y que tome en consideración estados de mantenimiento cada cierto intervalo de tiempo fijo”.

La metodología, basada en técnicas metaheurísticas, diseñada y utilizada para obtener los resultados del presente trabajo de investigación demostró en efecto dar soluciones de calidad en un tiempo computacional razonable al problema bajo estudio, tal como es posible evidenciar en el capítulo 4 de discusión de resultados, debido a lo anterior, es posible concluir que el objetivo del trabajo de investigación se cumplió pues en efecto la metodología que propone fue diseñada. Así mismo, con la puesta en marcha de la metodología en la resolución de ciertas instancias y su posterior comparación con soluciones encontradas por otros autores, es posible concluir que en efecto la metodología permite obtener soluciones de calidad en un tiempo computacional razonable al problema propuesto, por lo que se considera que no es posible rechazar la hipótesis del presente trabajo de investigación.

## **5.2 Recomendaciones**

Resulta importante destacar que el estudio realizado es solo una pequeña contribución al amplio campo de la secuenciación de tareas y mantenimiento, debido a esto, se proponen las siguientes recomendaciones y/o extensiones al presente trabajo.

Obtener bases de datos de rutas de vehículos con distancias asimétricas, para después realizar los ajustes a dichas bases de datos para transformarlas a problemas de rutas de vehículos con restricción de distancia, mediante el procedimiento utilizado por Li, Simchi-

Levi y Desrochers [28], con el fin de analizar el comportamiento de la metodología diseñada en el presente trabajo de investigación.

Con el fin de reducir el tiempo de cómputo del programa, en el procedimiento GRASP cuando en el bloque se han incluido una o más tareas, determinar de forma aleatoria la posición en la que se realizará la inserción de la tarea, una vez determinada la posición, determinar el costo de las tareas candidatas a ser incluidas en la solución para dicha posición, realizar la lista de candidatos restringida y seleccionar la tarea a incluir.

Considerar dentro del procedimiento de Búsqueda Tabú, la posibilidad de realizar intercambios de tareas entre el bloque bajo estudio y bloques que aún no han sido mejorados.

Ampliar el estudio a secuenciación de tareas en sistemas de máquinas más complicados, tales como máquinas en paralelo.

Crear instancias especiales para este problema.

Formular un modelo que represente la situación planteada en esta investigación, que permita, mediante la utilización de C-PLEX, la obtención de soluciones exactas o mejores soluciones para las instancias, con el fin de contar con un marco de referencia que sirva para realizar una comparación adecuada.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Allahverdi, Ali, Ng, C. T., Cheng, T.C.E., Kovalyov, Mikhail, Y. (en prensa). A survey of scheduling problems with setup times or costs [Versión electrónica]. *European Journal of Operational Research*.
- [2] Adiri, I., Bruno J., Frosting, Rinnooy Kan, A.H.G. (1989). Single machine flow-time scheduling with a single breakdown. *Acta Informática*, 26, 679-696.
- [3] Armentano, V.A., Mazzini, R. (2000). A genetic algorithm for scheduling on a single machina with set-up times and due dates. *Production Planning and Control* 11, 713-720.
- [4] Asano M., Ohta H. (1999). Scheduling with shutdowns and sequence dependent set-up times [Versión electrónica]. *International Journal of Production Research*, 37:7, 1661-1676.
- [5] Chang, Pei-Chann, Hsieh, Jih-Chang, Wang, Yen-Wen (2003). Genetig algorithms applied in BOPP fil scheduling problems: minimizing total absolute deviation and setup times [Versión electrónica]. *Applied Soft Computing*, 3, 139-148.
- [6] Chen, Wen-Jinn, Liao, Ching-Jong (2005). Scheduling with different maintenance policies in a textile company [Versión electrónica]. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 11, 43-53.
- [7] Cuatrecasas Lluís (2000), *TPM total productive maintenance hacia la competitividad a través de la eficiencia de los equipos de producción*. España: Gestión 2000.
- [8] Desrosiers, J., Soumis, F., Desrochers M. (1984). Routing with time windows by column generation [Versión electrónica]. *Networks*, 14, 545-565.
- [9] Duffuaa, Salih O., Raouf, A. & Campbell, John Dixon (1999), *Planning and control of maintenance systems, modeling and analysis*. EUA: John Wiley & Sons, Inc.
- [10] Feo, T.A., Resende, M.G.C. (1995), Greedy Randomized Adaptive Search Procedures [Versión electrónica]. *Journal of Global Optimizaiton*, 6, 109-133.

- [11] França, P.M., Mendes, A., Moscato, P. (2001). A memetic algorithm for the total tardiness single machine scheduling problem [Versión electrónica]. *European Journal of Operational Research* 132, 224-242.
- [12] Gagne, C., Price, W.L., Gravel, M. (2002). Comparing an ACO algorithm with other heuristics for the single machine scheduling problem with sequence-dependent setup times [Versión electrónica]. *Journal of the Operational Research Society* 53, 895-906.
- [13] Garg, Amik, Deshmukh, S.G. (2006). Maintenance management: literature review and directions [Versión electrónica]. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12, 205-238.
- [14] Gendreau, Michel, Laporte, Gilbert, Morais Guimarães, Eduardo (2001). A divide and merge heuristic for the multiprocessor scheduling problem with sequence dependent setup times [Versión electrónica]. *European Journal of Operational Research*, 133, 183-189.
- [15] Glover, Fred, Melián, Belén (2003). Tabu Search [Versión electrónica]. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 19, 29-48.
- [16] Graves, G. H., Lee, C. Y. (1999). Scheduling maintenance and semiresumable jobs on a single machine [Versión electrónica]. *Naval Research Logistics* 46, 845-863.
- [17] Graves, Stephen C. (1981). A Review of Production Scheduling [Versión electrónica]. *Operations Research*, 29, 646-675.
- [18] Gupta, Skylab R., Smith, Jeffrey S. (2006). Algorithms for single machine total tardiness scheduling with sequence dependent setups [Versión electrónica]. *European Journal of Operational Research*, 175, 722-739.
- [19] Higgins, Lindley R. & Mobley, R. Keith (2001). *Maintenance engineering handbook (6ta. Ed)*. EUA: Mc Graw Hill.
- [20] Ji, Min, He, Yong, Cheng, T.C.E. (2007). Single-machine scheduling with periodic maintenance to minimize makespan [Versión electrónica]. *Computers & Operations Research* 34, 1764-1770.
- [21] Kim, Dong-Won, Kim, Kyong-Hee, Jang, Woosung, Chen, Frank F. (2002). Unrelated parallel machine scheduling with setup times using simulated annealing [Versión electrónica]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 18, 223-231.



- [22] Koulamas, Christos, Kyparisis, George J. (en prensa). Single-machine scheduling problems with past-sequence-dependent setup times [Versión electrónica]. *European Journal of Operational Research*.
- [23] Laguna, M. (1999). A heuristic for production scheduling and inventory control in the presence of sequence-dependent setup times [Versión electrónica]. *IIE Transactions* 31, 125-134.
- [24] Laguna, Manuel, Martí, Rafael. Tabu Search, *Transparencias de apoyo a curso*, University of Colorado, USA, Universidad de Valencia, España.
- [25] Lee, Chung-Yee, Lin, Chen-Sin (2001). Single-machine scheduling with maintenance and repair rate-modifying activities [Versión electrónica]. *European Journal of Operational Research*, 135, 493-513.
- [26] Lee, Wen-Chiung, Wu, Chin-Chia (en prensa). Multi-machine scheduling with deteriorating jobs and scheduled maintenance [Versión electrónica]. *Applied Mathematical Modelling*.
- [27] Leon, V.J., Wu, S.D. (1992). On scheduling ready-time, due-dates and vacations. *Naval Research Logistics*, 39, 53-65.
- [28] Li, Chung-Lun, Simchi-Levi, David, Desrochers, Martin (1992). On the Distance Constrained Vehicle Routing Problem [Versión electrónica]. *Operations Research*, 40, 790-799.
- [29] Liao, C. J., Chen, W. J. (2003). Single-machine scheduling with periodic maintenance and nonresumable jobs [Versión electrónica]. *Computers & Operations Research*, 30, 1335-1347.
- [30] Liu, Zhaohui, Cheng, T.C. Edwin (2002). Scheduling with job release dates, delivery times and preemption penalties [Versión electrónica]. *Information Processing Letters*, 82, 107-111.
- [31] OR-Library, Recurso electrónico, Beasley, J. E. accesado por última vez el día 8 de mayo de 2007, en el sitio: <http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/info.html>
- [32] Pérez González, Olegario (2006). *Solución de un Problema de Transbordo Mediante los Metaheurísticos Grasp y Tabu Search*. TESIS presentada como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias Especialidad en Sistemas de Calidad y

Productividad, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Nuevo León, México.

- [33] Pinedo, Michael (1995), *Scheduling theory, algorithms and systems*. EUA: Prentice Hall.
- [34] Qi, X., Chen, T., Tu, F. (1999). Scheduling the Maintenance on a Single Machine [Versión electrónica]. *The Journal of the Operational Research Society*, 50, 1071-1078.
- [35] Resende, Mauricio G.C., González Velarde, José Luis (2003). *GRASP: Procedimientos de búsqueda miopes aleatorizados y adaptativos*.
- [36] Sadfi, Cherif, Penz Bernard, Rapine, Christophe, Blazewicz, Jacek, Formanowicz, Piotr (2005). An improved approximation algorithm for the single machine total completion time scheduling problem with availability constraints [Versión electrónica]. *European Journal of Operational Research*, 161, 3-10.
- [37] Schmidt, G., Scheduling independent tasks with deadlines on semi-identical processors. *Journal of Operational Research Society*, 39, 271-277.
- [38] Tan, K.C., Narasimhan, R. (1997). Minimizing tardiness on a single processor with sequence-dependent setup times: A simulated annealing approach. *Omega* 25, 619-634.
- [39] Tan, K.C., Narasimhan, R., Rubin, P.A., Ragatz, G.L. (2000). A comparison of four methods for minimizing total tardiness on a single processor with sequence dependent setup times. *Omega* 28, 313-326.
- [40] Toth Paolo, Vigo Daniele (2002), *The vehicle routing problem*. Siam Monographs on Discrete Mathematics and Applications.
- [41] Türkcan, Ayten, *Machine Scheduling with Availability Constraints*, Bilkent University, Departamento de Ingeniería Industrial.
- [42] VRPLIB, Recurso electrónico, Vigo, Daniele, accesado por última vez el día 17 de mayo de 2007, en el sitio:  
[http://or.ingce.unibo.it/research/cvrp-and-dcvrp/asymmetric\\_cvrp.zip/view](http://or.ingce.unibo.it/research/cvrp-and-dcvrp/asymmetric_cvrp.zip/view)