

UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y TURISMO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



TRABAJO DE DIPLOMA

Asistencia decisional en el proceso de optimización relativo al
enrutamiento de vehículos. Aplicación a la reparación de averías
eléctricas en Santa Clara

Autoras: Ivón Labrada Rodríguez

Yudmila Sánchez García

Tutor: MSc. Ing. Yasel J. Costa Salas

Santa Clara, 2010

*“Lo fundamental, es que seamos capaces de hacer
cada día algo que perfeccione lo que hicimos
el día anterior”*

Ernesto Guevara de la Serna

Dedico este Trabajo de Diploma:

*A mis padres Rafael y Reynelda, por guiarme hacia el camino de la
verdad y la sabiduría, por su apoyo incondicional en el logro
de este sueño.*

*A mi hermanito Dairon, por la paciencia que ha tenido, por soportarme
y quererme tanto, por enseñarme a correr, por protegerme siempre
y por estar presente en mi corazón.*

A toda mi familia y amigos.

*A mis compañeras de cuarto 506C, por lograr la ardua labor de
soportarme y convivir conmigo estos largos y hermosos años.*

A los que están y, a los que no están.

*A todos los que una forma u otra han sido parte de mi vida y me han
brindado su mano franca.*

De Ivón.

Lograr nuestros sueños es fácil cuando no te falta el amor ni el apoyo de los que te rodean. Quiero dedicar este trabajo que representa el sueño por el cual he luchado toda mi vida de estudiante a:

Mi abuela, Gladys Abadesa , que estaría muy orgullosa si pudiera verme. Espero te llegue donde sea que estés.

Mis padres, María Eugenia y Jorge Luis, por dedicarse día a día a mi bienestar. Por todo su empeño y esfuerzo en ayudarme a lo largo de mi carrera y poder lograr gracias a ellos todo lo que hoy poseo. Por ser lo más grande que tengo.

Los quiero mucho.

Mi hermana, Yudmalis, por ayudarme siempre y quererme.

Mis abuelos, Heriberto, Jorge y Rosa, por ser guías y ejemplo en mi vida.

Mis tías y primos, por su cariño incondicional.

Mi esposo, Julio César, por el apoyo y el amor que siempre me ha brindado.

De Yudmila.

Nuestros más sinceros agradecimientos a:

Nuestra familia que con su apoyo, dedicación y confianza han sabido encaminarnos hacia el logro de este sueño. Por convertirnos en las personas que somos, sacrificándose día a día por nuestro bienestar.

Nuestro tutor M.Sc. Ing. Yaser Costa Salas, ídolo de toda persona que ame la ciencia. Por brindarnos su valiosa ayuda durante la realización de este trabajo de diploma.

Nuestros profesores, que con sus sabios conocimientos han hecho de nosotras profesionales.

Humberto, trabajador de la Empresa Eléctrica, por dedicarnos su tiempo y ayuda sin medida.

A la Revolución.

Todos los que de una forma u otra nos han ayudado en este largo trayecto.

A todos, de corazón, muchas gracias.

RESUMEN

La presente investigación se desarrolla en la Unidad Empresarial Básica (UEB) Despacho de Santa Clara perteneciente a la Empresa Organización Básica Eléctrica por la necesidad de reducir los costos de transportación y elevar el nivel de servicio al cliente, con el objetivo de asistir el proceso decisional relativo a la planificación de recorridos para la reparación de averías eléctricas.

La UEB, carece de una herramienta de optimización para llevar a cabo el enrutamiento de vehículos, por lo que requiere de la aplicación de un procedimiento, que en función del objetivo anterior, permita de forma efectiva asistir la toma de decisiones en el proceso de optimización en sus diferentes etapas (pre-optimización, optimización y post-optimización).

En la realización del presente trabajo se utilizan una serie de técnicas estadísticas matemáticas, de investigación de operaciones e Inteligencia Artificial, las cuales permiten la obtención del procedimiento que se sustenta en los objetivos y necesidades de esta empresa.

Los resultados obtenidos son validados comprobando el incremento de la efectividad del proceso de toma de decisiones para el enrutamiento de vehículos, éste se verifica a través de los términos de calidad de las soluciones obtenidas y el tiempo de cómputo empleado en dicho proceso.

ABSTRACT

This research is based on the Basic Business Unit (BBU) Santa Clara Office of belonging to the Organization Basic Electric Company by the need to reduce transportation costs and raise the customer service level, with the objective of assisting the decision making process on the routes planning for the repair of electrical breakdowns.

The BBU lacks of an optimization tool to perform the vehicle routing, which requires the procedure application, based on the previous objective, allowing effectively assist decision making in the optimization process at different stages (pre-optimization, during optimization and post-optimization).

In the research is used several statistical mathematic, operations research and artificial intelligence techniques, which allows obtaining the procedure based on the objectives and needs of this company.

The results are validated by checking the increase of the effectiveness of decision-making process for the vehicle routing, it is checked through the performance terms, solution quality and computational time used in this process.

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN	
1.1. Estrategia para la construcción del Marco Teórico y Referencial de la Investigación.....	5
1.2. Conceptos generales de logística.....	6
1.3. Cadena de suministro. Definiciones y categoría.....	8
1.4. Gestión sobre en enfoque de Cadena de Suministro.	11
1.5. Procesos logísticos en las cadenas de suministro	12
1.6. Clasificación de las actividades logísticas... ..	14
1.7. Niveles jerárquicos en las decisiones logísticas... ..	15
1.8. El transporte como una decisión logística. Características de éste en Cuba.....	17
1.8.1 Características del transporte en Cuba	17
1.9. Decisiones de enrutamiento de vehículos. Particularidades y métodos de solución	18
1.9.1 Búsqueda Tabú... ..	22
1.9.2 Recocido Simulado.....	23
1.9.3 Algoritmos Genéticos.....	23
1.9.4 Colonia de Hormigas.....	24
1.9.5 Algoritmo de GRASP.....	25
1.9.6 Hiperheurística.....	26
1.10. Desarrollo del proceso de reparaciones de averías eléctricas.....	27
1.11. Conclusiones Parciales.....	28
CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO PARA ASISTIR EL PROCESO DECISIONAL DE OPTIMIZACIÓN RELATIVO AL ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS	
2.1. Introducción.....	29
2.2. Desarrollo del procedimientos por etapas.....	29
2.2.1 Clasificación del problema.....	29
2.2.2 Optimización basada en métodos exactos.....	41
2.2.3 Optimización basada en métodos aproximados.....	43
2.2.4 Validación y control en el proceso de optimización.....	46
2.3. Conclusiones Parciales.....	47
CAPÍTULO III. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA OPTIMIZACIÓN DEL PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS PRESENTE EN EL PROCESO DE REPARACIONES DE AVERÍAS ELÉCTRICAS	
3.1. Introducción... ..	49
3.2. Caracterización de la empresa eléctrica de Villa Clara.....	49
3.3. Aplicación del procedimiento por etapas.....	50
3.3.1 Clasificación del problema.....	51
3.3.2 Optimización basada en métodos aproximados. Barrido y ACS.....	55

3.3.3 Validación y control en el proceso de optimización de enrutamiento de vehículos.....	59
3.4. Conclusiones Parciales.....	61
CONCLUSIONES GENERALES.	62
RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

El proceso de reparación de averías adjudica un peso significativo en el Sector Eléctrico, el cual juega un papel crucial en la economía de cualquier país, ya que constituye la base para el desarrollo industrial y social. Las ventajas que aporta a la sociedad y la toma de medidas para su uso racional, trae aparejado la mejora económica.

En la actualidad, la economía a nivel internacional presenta constantes transformaciones y las empresas cubanas influenciadas por las condiciones externas no están exentas a estos cambios. Cuba se enfrasca en adoptar nuevas estrategias de competitividad para obtener un lugar de prestigio y el reconocimiento en el mercado internacional; para obtenerlo, las empresas deben cumplir las expectativas de los clientes. En este sentido, es necesario buscar herramientas con basamento matemático que permitan, de una manera rápida, situar a la empresa en posición de satisfacer al cliente y disminuir los costos.

La Gestión Logística se ha convertido en uno de los elementos más significativos para elevar la competitividad de una empresa. El proceso decisional relacionado con el desempeño logístico en una empresa puede condicionar el éxito o el fracaso en muchas ocasiones. Por lo general, en la logística se practican dos tipos de decisiones: diseño y optimización, siendo esta última la de mayor rigor matemático y computacional. Un ejemplo de este tipo de decisión lo constituyen las decisiones de transportación, las cuales relacionan un grupo de aspectos que parten desde la selección del vehículo hasta la planificación del recorrido de los mismos, siendo el último de éstos el de mayor importancia en la presente investigación.

El establecimiento de rutas para vehículos que atienden a un grupo de clientes constituye un problema habitual que no siempre se resuelve de manera adecuada. Las decisiones erróneas en el enrutamiento de vehículos afectan la imagen y la capacidad competitiva de la empresa, una buena elección de rutas ayudará al desarrollo de las operaciones de forma efectiva, mientras que una elección desacertada acarreará una disminución significativa en la cuenta de resultados de la empresa

El problema de enrutamiento de vehículos ha sido ampliamente estudiado por diferentes autores, generalmente especialistas en las áreas de la Investigación de Operaciones y la Logística. En ocasiones este problema se hace tan complejo que requiere algoritmos que encuentren su solución en tiempo factible y con adecuada calidad. Diversas investigaciones científicas han mostrado el uso efectivo de algoritmos aproximados en problemas reales de enrutamiento de grandes dimensiones Corona [2005]. Por otra parte, en un grupo no menos importante de investigaciones se evidencian valiosas soluciones con algoritmos exactos aplicados a problemas de dimensiones inferiores Díaz Parra, O. & Cruz Chávez, M.A. [2006].

El desarrollo de la mayoría de las investigaciones consultadas en la literatura especializada se enfocan hacia la optimización concreta de un problema de enrutamiento dado Valverde & Gachet [2007], sin tener en cuenta un análisis previo a la optimización, el cual permita conocer las herramientas de solución pertinentes acorde con la complejidad del problema. En otros trabajos realizados por Ahuja et al. [1999] y Aynos Ambite & Hernández [2008], se plantean afirmaciones teóricas en función de demostrar la complejidad P o NP (*polynomial bounded or non-deterministic polynomial bounded*, polinomialmente o no polinomialmente acotado) de los problemas genéricos¹ de enrutamiento, no encontrándose análisis enfocados a clasificar la complejidad de variantes de pequeño y mediano tamaño. Además puede apreciarse que estas investigaciones se identifican mayormente con un método de solución previamente establecido, sin tenerse en cuenta condiciones de aplicación que permitan hacer efectivo el proceso de optimización, en la mayoría de éstos se prueba la permanencia de los algoritmos contrastando los resultados obtenidos, pudiendo resultar no factible el uso de los mismos. Por otra parte, estudios realizados por Colmenares [2002], Maguera & Panacho [2007] entre otros, no incluyen en sus trabajos análisis de indicadores posterior al proceso de optimización que permitan validar definitivamente la selección de herramientas utilizadas.

Para la optimización referida al enrutamiento de vehículos pueden ser implementados métodos exactos o aproximados, dentro de esta última categoría diversas investigaciones han planteado el uso de heurísticas y meta-heurísticas. Por lo general, son herramientas matemáticamente complejas y, por ende, de poca aceptación por los decisores. Si bien se conoce que el enrutamiento de vehículos es inminentemente complejo, existen variantes de este tipo de problema con dimensiones relativamente pequeñas. Para estas variantes se ha demostrado alcanzar soluciones óptimas en tiempos factibles mediante el uso de métodos exactos, sin embargo se desconocen valores umbrales para las componentes del modelo (cantidad de clientes, tamaño de la flota de vehículos) con vista a elegir en qué grupo de herramientas de optimización estará la solución pertinente del problema.

La UEB de Despacho de Santa Clara perteneciente a la Organización Básica Eléctrica (OBE) de Villa Clara, constantemente presenta insuficiencias en el servicio de reparación de averías eléctricas. Dichas insuficiencia se deben, fundamentalmente, al proceder empírico en el proceso de planificación de los vehículos que realizan tales reparaciones. Actualmente la empresa ha manifestado la necesidad de sustentar dicho proceso decisional a través de una herramienta computacional, la cual posibilite atenuar errores humanos en la planificación, así como incrementar la efectividad en las decisiones de enrutamiento. En los

¹ Se define como problema genérico al problema clásico inicial TSP (agente viajero por sus siglas en inglés) a partir del cual se generan otras variantes de este problema.

momentos actuales la empresa no cuenta con un procedimiento, matemáticamente sustentado, que posibilite asistir la toma de decisiones descrita anteriormente con vista a elevar la efectividad en dicho proceso. Todo lo que se expone anteriormente es una síntesis de la situación problemática de la siguiente investigación.

Por tanto, se puede plantear como problema científico de esta investigación:

La ausencia de un procedimiento, fundamentado sobre bases matemáticas y computacionales, el cual posibilite asistir la toma de decisiones en el proceso de optimización relativo al enrutamiento de vehículos para sus diferentes etapas (pre-optimización, optimización y post-optimización), así como la necesidad de la aplicación de algoritmos pertinentes que permitan solucionar de manera efectiva la planificación de recorridos para la reparación de averías eléctricas en Santa Clara dirigidas por la UEB Despacho perteneciente a la OBE de Villa Clara.

El objetivo general de la investigación es asistir el proceso decisonal relativo a la planificación de recorridos para la reparación de averías eléctricas en la empresa objeto de estudio, mediante el desarrollo y aplicación de un procedimiento científicamente argumentado que posibilite el incremento de la efectividad en las decisiones anteriormente mencionadas.

Los objetivos específicos de la investigación se abordarán a continuación:

1. Realizar una revisión bibliográfica nacional e internacional con la finalidad de recopilar los conceptos más actuales de logística, cadena de suministro, procesos, actividades y decisiones logísticas, así como las herramientas matemáticas y computacionales utilizadas en el enrutamiento de vehículos.
2. Clasificar el problema objeto de estudio planteado en la investigación de acuerdo con las áreas de solución Exacta o Aproximada.
3. Seleccionar métodos de optimización pertinentes para la solución del problema de enrutamiento en la UEB de Despacho de Santa Clara, Villa Clara.
4. Establecer parámetros durante la tercera etapa (post-optimización) con vista a la elección y comprobación final del algoritmo de solución.
5. Plantear propuestas de solución (matemática y computacional) para el problema de optimización objeto de estudio.

Como hipótesis de la investigación se plantea, será posible incrementar la efectividad en las decisiones de enrutamiento de vehículos referidas a la reparación de averías eléctricas mediante el desarrollo y aplicación de un procedimiento, científicamente argumentado, el cual posibilite integrar las diferentes etapas del proceso de optimización (pre-optimización,

optimización y post-optimización), además de las complejidades del problema objeto de estudio.

La hipótesis quedará validada comprobando el incremento de la efectividad del proceso de toma de decisiones para el enrutamiento de vehículos. El término efectividad en el proceso de toma de decisiones se verificará a través de los términos calidad de las soluciones obtenidas y el tiempo de cómputo empleado en dicho proceso.

Para lograr los objetivos planteados, la presente investigación se constituye de la forma siguiente:

Capítulo I. Marco teórico de la investigación, en el que se realiza una minuciosa revisión bibliográfica de la literatura especializada en busca de los conceptos más actuales de logística, cadenas de suministros, procesos, actividades y decisiones logísticas, herramientas matemáticas para la optimización de enrutamiento de vehículos, así como las evolución del transporte en Cuba.

Capítulo II. Se elaboró un procedimiento para la toma de decisiones en la optimización de enrutamiento de vehículos.

Capítulo III. Aplicación del procedimiento para la toma de decisiones en la optimización de enrutamiento de vehículos.

Por último se realizan las conclusiones y las recomendaciones de la investigación teniendo en cuenta los resultados obtenidos.

En la presente tesis se utilizaron una serie de técnicas estadísticas matemáticas y de investigación de operaciones, las cuales unidas a otras herramientas del campo de la Inteligencia Artificial, permitieron clasificar de acuerdo a la complejidad del problema dado la solución exacta o aproximada, además de formular una propuesta algorítmica para la solución de dicho problema.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Estrategia para la construcción del Marco Teórico y Referencial de la investigación

Este capítulo se conformó con el objetivo de crear una plataforma que sustente teóricamente el problema científico a solucionar, precisado en la introducción de esta tesis, donde por medio de un análisis crítico de la literatura consultada y otras fuentes, se detallan los aspectos conceptuales y de la práctica involucrados en la investigación. Es por esta razón que la estrategia seguida por las autoras para la construcción del Marco Teórico y Referencial (ver Figura 1.1) se estructuró de forma tal que permitiera el análisis del estado del arte y de la práctica en la temática objeto de estudio, permitiendo sentar las bases teórico-prácticas del proceso de investigación.

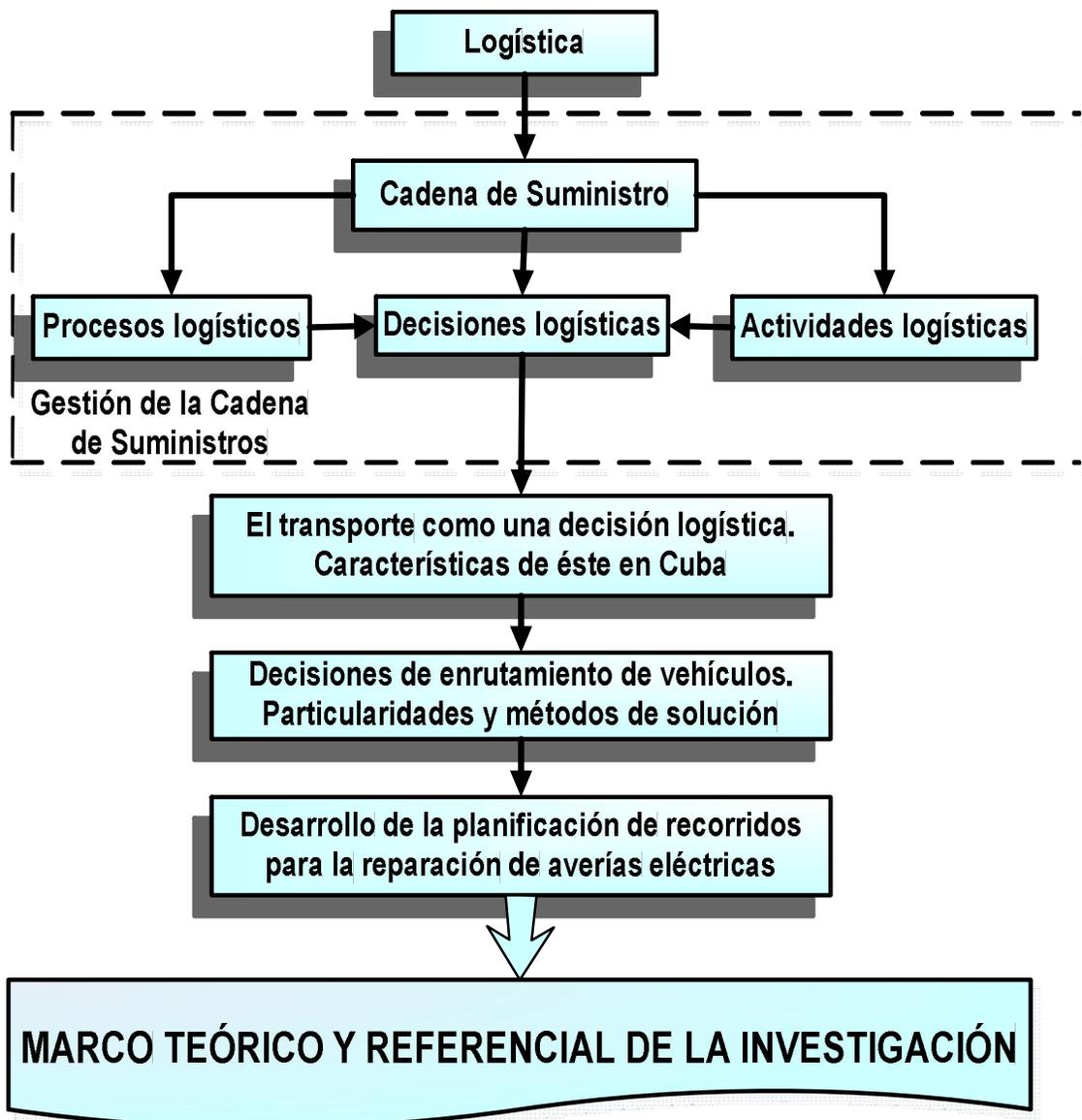


Figura 1.1: Hilo conductor del Marco Teórico y Referencial de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

1.2. Conceptos generales de logística

Existen en la actualidad diferentes definiciones cada vez más precisas y modernas de la Logística halladas en la literatura especializada, algunas simples y otras más abarcadora, las cuales constituyen la base de los enfoques actuales (ver Anexo1).

En sus inicios la Logística era vista como una parte de la ciencia militar que calcula, prepara y realiza cuanto se refiera a la vida, movimientos y necesidades de las tropas en campaña, a fin de conseguir la máxima eficacia de una operación... [Sarabia, 1995].

Concluida la Segunda Guerra Mundial, los sectores industriales y comerciales se apoderaron del término, adjetivándole ocasionalmente como Logística Empresarial, Logística de Abastecimiento o Logística Industrial... [Marrero Delgado, 2001].

En Cuba, varios profesionales han expuesto sus propias definiciones sobre el tema: Collazo Pérez [1995] y Santos Norton [1995] destacan el papel de la optimización e interrelación del flujo material y el flujo informacional en la Logística, pero otros autores han sido más amplios y han incluido el flujo financiero, como por ejemplo Gómez Acosta & Acevedo Suárez [2001] quienes describen la Logística como la acción del colectivo laboral dirigida a garantizar las actividades de diseño y dirección de los flujos material, informativo y financiero desde sus fuentes de origen hasta sus destinos finales, y que deben ejecutarse de forma racional y coordinada con el objetivo de proveer al cliente de productos y servicios en la cantidad, calidad, plazos y lugar demandados con elevada competitividad y garantizando la preservación del medio ambiente.

Por otra parte, Santos Norton [1995] considera necesario para definir la Logística, mencionar cinco funciones básicas que se desarrollan en las organizaciones: la Gestión de Aprovisionamiento, la Gestión de los Procesos, la Distribución Física, la Planificación Integrada y el Aseguramiento de la Calidad.

Conejero González & Hernández Ávila [2003], puntualizan la Logística como un sistema que garantiza el movimiento óptimo de las cargas y la información desde la fuente hasta el cliente.

Cespón Castro, R. & Auxiliadora, M. [2003], argumentan la Logística como el proceso de gestionar los flujos material e informativo de materias primas, inventario en proceso, productos acabados, servicios y residuales desde el suministrador hasta el cliente, transitando por las etapas de gestión de los aprovisionamientos, producción, distribución física y de los residuales.

Para la mejor comprensión del término logística, es importante destacar la definición brindada por el CSCMP [2005], el cual considera que la Logística es aquella parte de la gestión de la cadena de suministro que planifica, implementa y controla el flujo hacia adelante e inverso eficiente y efectivo y el almacenaje de productos, servicios e información relacionada entre el punto de origen y el punto de consumo para satisfacer los requisitos de los clientes.

A pesar de las disímiles definiciones planteadas en la literatura especializada las autoras de esta investigación decidieron adoptar la siguiente; “Logística no es más que la relación del flujo de materiales, informativo y financiero desde un origen a un destino, garantizando un buen servicio de calidad en el lugar y tiempo establecidos logrando un buen servicio al cliente”.

A finales de los 90 surge la era de la Logística Integral, la cual puede interpretarse “como una forma de gestionar la empresa en un entorno altamente competitivo en la que los conceptos de oportunidad y rapidez en el suministro de los productos, el servicio y la calidad total constituyen un complemento imprescindible a las clásicas variables de calidad del producto y precio competitivo que el mercado exige. La Logística Integral es, a largo plazo, el único camino para asegurar y mantener una competitividad continuada en el mercado” [Anaya, 2000].

Para entender precisamente la Logística Integral, puede analizarse el concepto operativo conocido como Operaciones Fluidas de Distribución y Producción, (ver Figura 1.2).

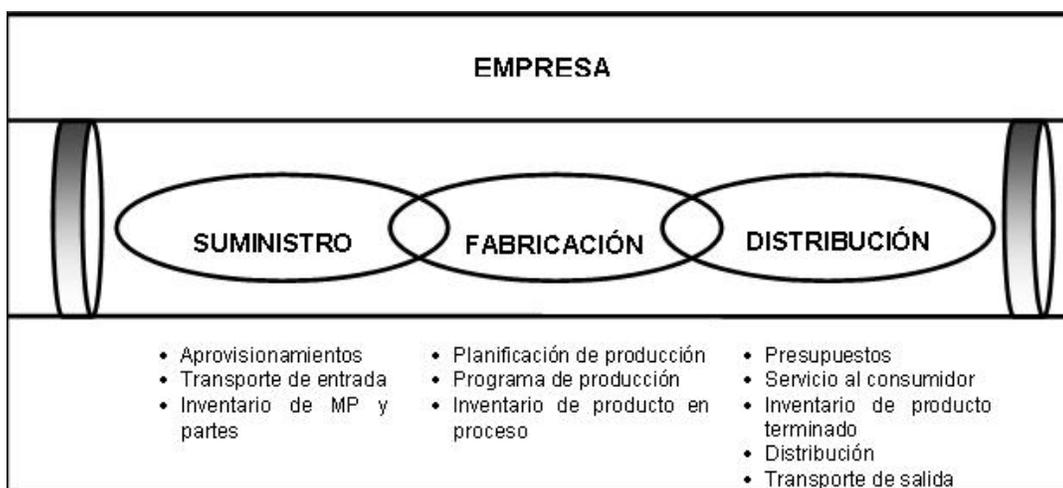


Figura 1.2: Operaciones Fluidas de Distribución y Producción.
Fuente: Copacino [1997].

Porter [1985] enuncia los conceptos de valor añadido y cadena de valor, que cambiaron los enfoques empresariales existentes hasta la fecha; por ese tiempo también aparece el término Logística Estratégica, que no es más que el uso de las capacidades y fortalezas

logísticas de la empresa, obtenidas en las alianzas a largo plazo con proveedores y distribuidores, todo esto combinado con la necesidad de las empresas de aplicar el concepto de Logística Integrada fuera de los límites de la empresa, es decir, en sus relaciones con suministradores, distribuidores y clientes, propició una nueva forma de organización, (ver Figura 1.3), que se conoció como Cadenas de Suministro (*Supply Chains*) [Conejero González, 2003].



Figura 1.3: Origen de la Cadena de Suministro.
Fuente: Elaboración Propia a partir de Conejero González [2003].

1.3. Cadena de suministro. Definiciones y categoría

El concepto de Cadena de Suministro es realmente novedoso, pero si se analiza detalladamente, es un proceso que ha estado presente siempre. En épocas pasadas se ha almacenado, transportado, transformado la materia prima, vendido y cobrado, lo que constituye la cadena de suministros, lo que ha variado es que en nuestros días el tamaño de las empresas no es importante, sino el nivel de competitividad que presentan los integrantes de dicha cadena; si esto ocurre, la empresa se comporta de manera competitiva.

El concepto de Cadena de Suministro es algo que se ha estado haciendo, ya sea de manera manual u otra, pero se ha hecho y se hace aunque no exista la ventaja de las nuevas tecnologías en las comunicaciones que están rompiendo barreras facilitando el proceso [Galvano, 2000].

Una Cadena de Suministro es una red global usada para suministrar productos y servicios desde la materia prima hasta el cliente final a través de un flujo diseñado de información, distribución física y efectivo. La configuración está determinada en gran medida por el servicio al cliente que se proyecte y la estrategia de tercerización y alianzas que se diseñe [Acevedo Suárez et al. 2001].

Porter [1997] entiende la Cadena de Suministro como un proceso que integra el trabajo de clientes, consumidores y vendedores para anular los costos que no agregan valor, mejorando la calidad, el cumplimiento de los pedidos, mayor velocidad y para introducir nuevos productos y tecnologías.

Según Tompkins [2000] la Cadena de Suministro es una serie de firmas que pasan materiales hacia delante, normalmente varias firmas independientes están involucradas en la producción de un producto y su ubicación en las manos del cliente al final de la Cadena de Suministro – materia prima, componentes, ensambladores, vendedores al por mayor, al por menor y compañías de transporte, son todos miembros de esta cadena.

De igual manera Stock et al. [1990], Lalonde [1994], Clarkston [2000] y Donovan [2000], Gómez Acosta & Acevedo Suárez [2001] precisan a la Cadena de Suministro como una alineación de formas que traen producción y servicios al mercado, a través de un flujo diseñado de información, distribución física y efectivo. Quedando demostrado, que el consumidor es parte de la cadena.

Definiciones más amplias son las que ofrecen Christopher [1972] y Mentzer [2001] quienes además de los flujos hacia arriba, incluyen los flujos hacia abajo de productos, servicios, finanzas e información desde una fuente hasta un cliente.

El SCC [2001] considera que la cadena de suministro incluye todos los esfuerzos involucrados para la producción y entrega de un producto final desde el proveedor del proveedor hasta el cliente de cliente. Estos esfuerzos se definen en cuatro procesos básicos: plan, fuente, fabricación y entrega.

Para García de Castro [2003] básicamente la Cadena de Suministro es un conjunto de procesos que lleva acompañado el ciclo de vida de un producto, esencialmente desde su diseño, el aprovisionamiento de materias primas, su proceso productivo, su proceso logístico incluida la distribución final, así como también la gestión de su logística inversa.

Clarkston [2000] puntualiza características básicas que presentan la mayoría de las cadenas de suministro:

- Incluyen todas las actividades y procesos para proporcionar un producto o servicio a un cliente final.
- Permiten la unión de cualquier número de compañías.
- Pueden tener un número determinado de relaciones de proveedor-cliente (un cliente puede ser proveedor de otro cliente).
- El sistema de distribución puede ser directo del proveedor al cliente o puede contener varios distribuidores (comerciantes, almacenes, minoristas) en dependencia de los productos y mercados.
- Los productos o servicios fluyen del proveedor al cliente (*downstream*) y la información de la demanda fluye de cliente al proveedor (*opstream*).

Por otra parte Donovan [2000] añade las siguientes:

- La necesidad de operar sobre la tecnología de “hala” a la demanda real y no “empuja” en toda cadena.
- La necesidad de aplicar técnicas eficaces en el tiempo real de planeación, ejecución y control; incluyendo la simulación de alternativas, para apoyar el ciclo corto de flujo material.

Como resultado de la amplia gama de conceptos encontrados en la literatura y debido a la complejidad de la Cadena de Suministro, Cespón Castro & Auxiliadora [2003], la clasifican de la siguiente forma (ver Figura 1.4):

- Cadena de Suministros Directa: Contiene los suministradores, la empresa y sus clientes, donde el vínculo entre estos eslabones es predominantemente de índole material.
- Cadena de Suministros Extendida: Contiene suministradores de suministradores a la empresa en diferentes grados y clientes de sus clientes, pero en las relaciones sigue predominando el flujo material.
- Cadena de Suministros Compleja: Cadena de suministros extendidos pero con vínculos más allá del flujo material, tales como diseño, finanzas y otros.

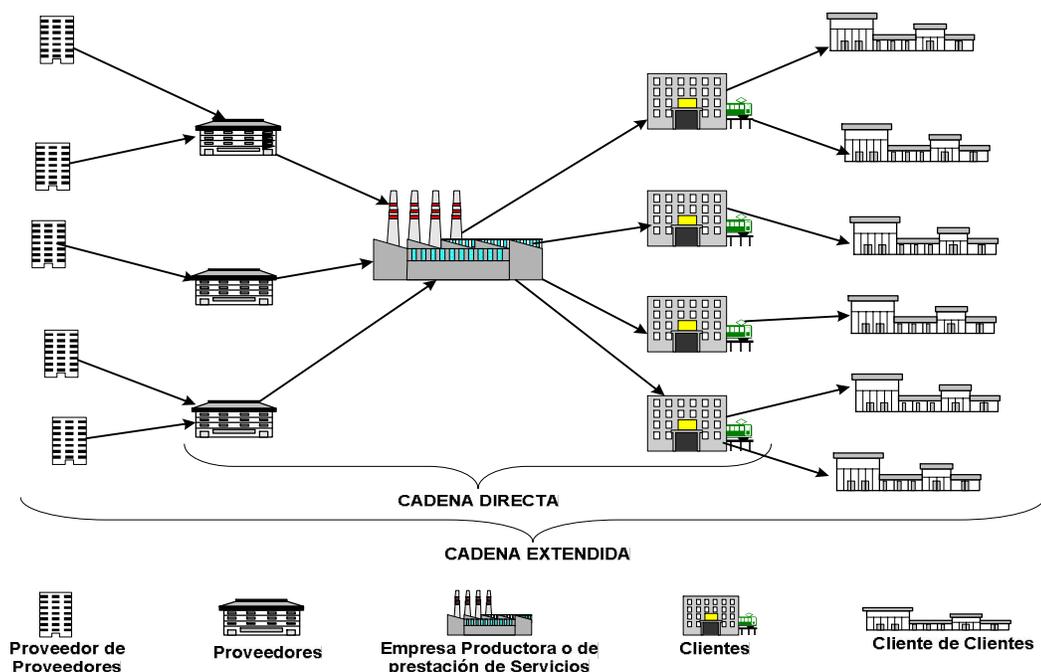


Figura 1.4: Clasificación de la Cadena de Suministros.
Fuente: Elaboración Propia basada en Cespón Castro & Auxiliadora [2003].

1.4. Gestión sobre el enfoque de Cadena de Suministro

La Gestión de la Cadena de Suministros (*SCM-Supply Chain Management*), ha emergido en la actualidad como la nueva etapa en la gestión logística de las empresas como un grado superior de integración, lo cual constituye el eje central del desarrollo histórico de la logística.

Este término fue introducido por primera vez en 1982 por dos consultantes Olivier & Webber. Otto & Kotzab [1999] estipulan que la Gestión de Cadena de Suministro consiste en integrar unidades organizacionales a lo largo de una Cadena de Suministro, coordinar las materias primas, la información y los flujos financieros para satisfacer las demandas de los clientes con el objetivo de mejorar la competitividad de la cadena de suministro. Esta es tratada también como la coordinación sistemática y estratégica de negocios en una sociedad particular.

Tan [2001] por otra parte, identifica dos grandes líneas de investigación que han hecho emerger el concepto de Gestión de Cadena de Suministro, por una parte es vista y tratada como una aproximación que considera las compras y el aprovisionamiento y, por otra parte, el transporte y la logística [Ortiz Araya & Albornoz, 2009].

Desde el punto de vista intraorganizacional, gestión de la cadena de suministros significa integrar la logística con la producción. A veces incluye la integración de la gestión del flujo de cobros y pagos y parte del proyecto del producto (diseño de la cadena de suministro). Este ámbito intraorganizacional engloba también la selección y la organización de los asociados, la colaboración y el compartimiento de información. [Acevedo Suárez et al. 2001].

Gestión de la Cadena de Suministro es una filosofía de gestión que busca unificar los recursos y competencias productivas de la empresa y sus aliadas, localizadas a lo largo de la Cadena de Suministro dentro de un sistema altamente competitivo dirigido a desarrollar soluciones innovadoras y sincronizar el flujo de productos, servicios e información hacia el mercado para crear una fuente de valor para el cliente, única e individualizada [Lario & Pérez, 2001].

La Gestión de la Cadena de Suministro es la planificación, organización y control de las actividades de la cadena de suministro. De acuerdo con Pilot [2004], en estas actividades está implicada la gestión de flujos monetarios, de productos o servicios de información, a través de toda la Cadena de Suministro, con el fin de maximizar, el valor del producto/servicio entregado al consumidor final, a la vez que disminuimos los costos de la organización (ver Figura 1.5).

Pilot [2004], menciona además un requisito indispensable para alcanzar un buen proceso de Gestión de la Cadena de Suministro. Es necesario hacer un buen proceso de gestión e integración logística en el interior de cada empresa; no se puede pretender alcanzar altos niveles de rendimiento a escala global si cada organización tolera ineficiencias operativas y no hace un buen uso de sus procesos y recursos.

CSCMP [2005] considera que gestionar la Cadena de Suministro es lograr una combinación sistemática y estratégica de las funciones y tácticas de negocio tradicionales entre las diferentes empresas que conforman una cadena de suministro, así como en el interior de cada unidad independiente; con el fin de mejorar el desempeño a largo plazo.



Figura 1.5: Gestión de la Cadena de Suministro.
Fuente: Ros et al. [2003].

Luego de ser tratada la referencia especializada las autoras llegan a la conclusión que gestión de cadena de suministros es la unión de procesos de negocio, desde el consumidor final hasta los proveedores originales, que suministran productos/servicios e informaciones que agregan valor al cliente.

1.5. Procesos Logísticos en las cadenas de suministro

Beamon [1998] plantea dos procesos principales: Proceso de Planificación de la Producción y Control de Inventarios, y Proceso de Distribución Logística, incluyendo en el primer proceso actividades productivas y de aprovisionamiento.

Méndez García & Oubiña Barbolla [2002], distinguen en el concepto de Logística hasta tres tipos de procesos logísticos, la logística industrial, la logística de aprovisionamiento y la logística externa.

- La primera de ellas hace referencia a la logística de producción.

- Actualmente se está produciendo un nuevo ajuste en la logística de aprovisionamiento con el comercio electrónico.
- La logística externa, comercial o de marketing, es la que se ocupa de todos los movimientos de mercancías, información y materiales que afectan a la fase de comercialización del producto, incluidos los necesarios para su venta, promoción y *merchandising*.

Por su parte Acevedo Suárez et al. [2001] denominan de una manera diferente estos tres procesos como se representa en la Figura 1.6.

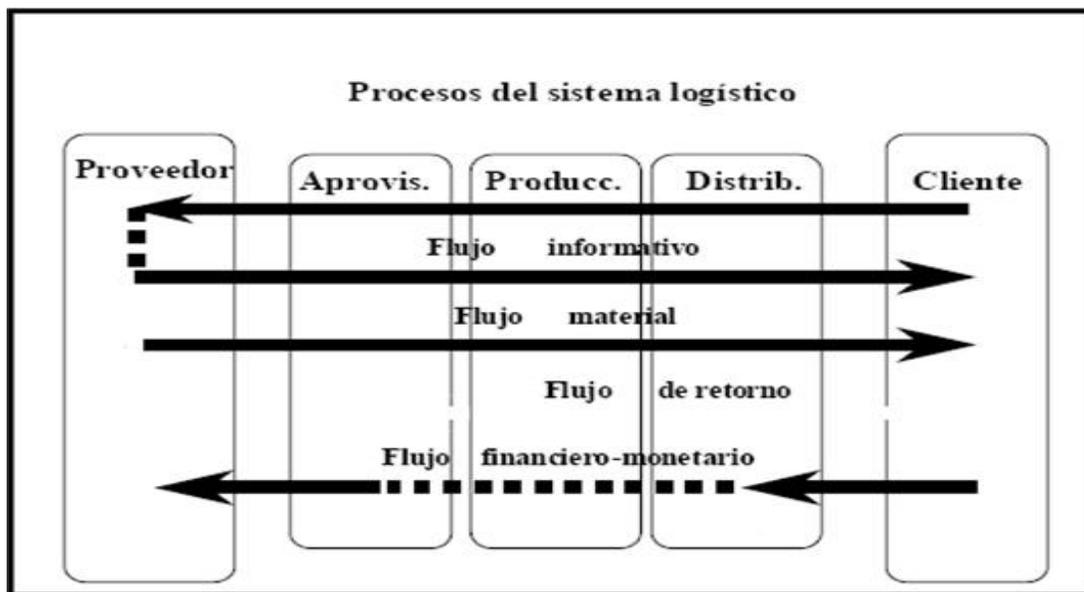


Figura 1.6: Procesos del sistema logístico.
Fuente: Acevedo Suárez et al. [2001].

Fontena Faúndez [2004] concuerda con Acevedo Suárez et al. [2001], mientras que Monterroso [2000] ofrece la misma categorización sobre procesos logísticos pero los denominan como subsistemas.

Pilot [2004], coincide con la clasificación anterior de los procesos logísticos, aunque separa el proceso de venta del proceso de distribución.

Otros autores han desagregado los procesos claves, que indispensablemente necesita realizar toda empresa para poner el producto en manos del cliente, con respecto a los anteriormente citados. Ros, et al [2003] plantea los cinco procesos logísticos siguientes:

- Gestión de la Demanda.
- Gestión de los Pedidos.
- Gestión de la Producción.

- Gestión de los Aprovisionamientos.
- Gestión de la Distribución.

Cada autor tiene su propio criterio acerca de los procesos logísticos presentes en las cadenas de suministros y los denominan mayormente como: subsistemas, funciones, procesos. Se pueden identificar tres grandes procesos logísticos: Aprovisionamiento, Producción y Distribución, dentro de los cuales se agrupan las actividades logísticas.

1.6. Clasificación de las actividades logísticas

Sobre actividades logísticas también se pueden encontrar disímiles enfoques y denominaciones, algunas de las cuales se muestran en el Anexo 2.

Bowersox & Close [1996] sintetizan en cuatro actividades todo el alcance de la Logística, para lo cual utilizan el soporte de manufactura como actividad que agrupe otras más específicas. Por el contrario Pau I COS et al. [2001] son muy explícitos a la hora de plantear dichas actividades, por ejemplo, dividen el transporte en: transporte de fábrica a los depósitos, suministro a línea y transporte interfábrica y transporte de materias primas; el almacenamiento en: manutención de los depósitos de distribución, almacenes de fábrica y almacenes de materias primas; la gestión de inventario en: gestión de stock de productos acabados y gestión de stock de materias primas. Es criticable el hecho de incluir en la denominación de las actividades, términos como: fábricas, depósitos, stock de productos acabados ya que se suscriben al caso de empresas productoras de bienes.

Ballou [2004] específicamente, divide dichas actividades en claves y de apoyo. Para él las actividades claves son aquellas que están presentes en todo sistema logístico y las de apoyo, tienen como propósito sustentar el correcto desempeño de las actividades claves.

A pesar de las diferentes clasificaciones, Bowersox & Close [1996], Comas Pullés [1998], Arbonés [1999], Pau I Cos et al. [2001], Jáuregui [2002], Ballou [2004], CSCMP [2005], Curso [2005-2006] y DSLC [2006] concuerdan en que: el transporte, el almacenamiento y la gestión de inventario son actividades logísticas. Algunos de estos autores coinciden además en otras actividades, como se muestra en la Tabla 1.1, aunque no las nombren de igual manera.

Existen coincidencias de los puntos de vista de los diferentes autores en cuanto a las actividades logísticas. Las autoras de esta investigación prefieren adoptar la clasificación hecha por Ballou [2004].

Tabla 1.1: Coincidencias de autores con respecto a las actividades logísticas

ACTIVIDADES LOGISTICAS	AUTORES
Manejo de Materiales	Arbonés [1999], Ballou [2004] y CSCMP [2005]
Previsión de la Demanda	Arbonés [1999], Pau I COS et al. [2001], Curso [2005-2006]
Servicio al cliente	Ballou [2004], Curso [2005-2006]
Procesamiento de pedidos	Comas Pullés [1998], Jáuregui [2002], Ballou [2004]
Compras	Pau I COS et al. [2001], Jáuregui [2002], Ballou [2004], CSCMP [2005], Curso [2005-2006], DSLC [2006]
Empaquetamiento	Pau I COS et al. [2001], Jáuregui [2002], Ballou [2004], Curso [2005-2006]
Planificación del producto	Pau I COS et al. [2001], Ballou [2004], Curso [2005-2006]
Gestión de información	Comas Pullés [1998], Ballou [2004]

Fuente: Elaboración Propia.

1.7. Niveles jerárquicos en las decisiones logísticas

La primera estructura jerarquizada fue idea de Anthony en 1965. Él clasificó las decisiones en tres niveles: la planificación estratégica, el control de gestión y el control operacional, categorías que actualmente conforman la gestión encontrada en las organizaciones existentes.

Ballou [2004] aborda el tema de las decisiones logísticas, específicamente por área de decisión (localización, inventario, transporte, procesamiento de pedidos, servicio al cliente, almacenamiento y compras).

Curso [2004-2005], considera tres niveles en la toma de decisiones logísticas en función del grado de abarcamiento de la inversión a realizar, del horizonte temporal y la frecuencia de decisión dentro de los cuales está: el estratégico, táctico y el operativo. Con ellos concuerdan Hernández Pascual et al. [2003] y Knudsen González [2005].

Estos autores comparten también el criterio de que:

- Las decisiones estratégicas tienen un plazo largo de ejecución y por tanto una influencia a largo plazo, que implican grandes inversiones.
- Las decisiones tácticas son de menor inversión y de corto y mediano plazo.

- Las decisiones operativas dicen el día a día de la empresa, son de baja inversión y pueden ser alteradas sin grandes costos adicionales ocupándose de la adecuada utilización de los fondos existentes, normalmente ya detallados en los planes estratégicos.

Ballou [2004] resume las decisiones por niveles. En la Tabla 1.2 las autoras muestran estas decisiones, sin tener en cuenta el área de decisión a la que pertenezcan.

Tabla 1.2: Decisiones Logísticas por niveles de decisión

NIVELES	DECISIONES
ESTRATÉGICO	<ul style="list-style-type: none"> • Número, tamaño y ubicación de almacenes, plantas y terminales • Ubicación de inventarios y políticas de control • Selección del modo de transporte • Ingresos de pedidos transmisión y diseño del sistema de procesamiento • Establecimiento de estándares • Manejo de la selección de equipo, diseño de la distribución • Desarrollo de relaciones proveedor-comprador
TÁCTICO	<ul style="list-style-type: none"> • Arrendamiento estacional de equipo • Niveles de inventario de seguridad • Reglas de prioridad para pedidos de clientes • Opciones de espacio estacional y utilización de espacio privado • Contratación, selección de vendedor, compras adelantadas
OPERATIVO	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidades y tiempos de reabastecimiento • Asignación de ruta, despacho • Procesamiento de pedidos, cumplimiento de pedidos atrasados • Aceleración de entregas • Selección de pedidos y reaprovisionamiento • Liberación de pedidos y aceleración de suministros

Fuente: Elaboración propia basada en Ballou [2004].

Pilot [2004] vincula las diferentes decisiones logísticas con sus niveles de decisión y procesos logísticos correspondientes (Anexo 3), pero deja de mencionar decisiones importantes. Por tanto se propone un modelo más amplio en el Anexo 4.

1.8. El transporte como una decisión logística. Características de éste en Cuba

El transporte constituye una de las principales funciones logísticas. Ballou [2004], el transporte absorbe un porcentaje muy alto de los costos en la mayoría de las organizaciones, juega un papel fundamental en el desempeño de diversas dimensiones del servicio al cliente. Según Norman [2000], desde el punto de vista de los costos, este representa cerca del 60% de los gastos logísticos, por lo que se hace necesario mejorar la eficiencia del mismo, a través de la reducción de sus costos, para lo que es conveniente una adecuada planificación de la selección de rutas que minimicen el tiempo y la distancia a recorrer, de ahí que, Puchades Cortés et al. [2008], establece la gestión de rutas como una decisión fundamental en las empresas cuya actividad principal se basa en el transporte y la describe como una técnica que determina las rutas de un conjunto de vehículos que deben iniciar un recorrido en los almacenes, para atender la demanda en una red logística.

Aunque las decisiones de transporte se expresan en una variedad de formas, las principales son la selección del modo de transporte, el diseño de rutas, la programación de los vehículos y la consolidación de los envíos [Ballou, 2004].

La selección de los medios de transporte, ubicación de los puntos de origen-destino y el servicio al cliente son decisiones de transporte, puntualiza [Knudsen, Cespón & Boffil, 1997].

1.8.1 Características del transporte en Cuba

El transporte constituye una actividad vital en el desarrollo económico-social del país, tanto por su volumen como por la complejidad de su funcionamiento. Su tarea fundamental estriba en asegurar el desarrollo interrelacionado de todos los tipos de transporte, con el fin de satisfacer con la mayor eficiencia posible, las necesidades crecientes de la economía nacional.

Las empresas que se clasifican dentro de la rama del transporte automotor o aquellas que poseen vehículos destinados para esta actividad, a fin de evitar la subutilización de recursos o de eliminar obstáculos en el proceso de distribución, producción y movilidad poblacional, deben conocer los medios con que cuentan para hacer frente a los requerimientos de los usuarios, ser capaces de analizar las características propias de cada fase en que se realiza la transportación y tomar las decisiones oportunas que garanticen el suministro interrumpido [García Marrero, García Calderón et al.1989].

La situación en el período actual se caracteriza, por el decrecimiento de los niveles de actividad del transporte de carga y de pasajeros, la descapitalización de los fondos básicos, la paralización de inversiones en proceso y el deterioro de la red vial, las instalaciones portuarias y la infraestructura en general. En esta situación existen, sin embargo, las

siguientes excepciones principales: el transporte turístico, la aviación internacional y la introducción masiva de la bicicleta. A estas excepciones se añade el desarrollo de las actividades de transporte automotor del sector emergente de la economía, con la adquisición de modernos vehículos de alta tecnología, que han garantizado la logística de aprovisionamiento y distribución de las nuevas cadenas comerciales creadas en la etapa como CUBALSE, CIMEX S.A., ABATUR-ITH y otras. En este contexto cabe destacar, por el contrario, el debilitamiento de los servicios de carga por camiones de transporte de la Unión de Camiones del Ministerio del Transporte (UCMT) [Sendas, 2009].

1.9. Decisiones de enrutamiento de vehículos. Particularidades y métodos de solución

Las decisiones de enrutamiento están compuestas por dos decisiones muy complejas: la asignación de clientes a vehículos y el establecimiento de la secuencia adecuada de visita a los clientes que debe realizar un vehículo, señala Benavente & Bustos [2001]; según Ballou [2004], reducir los costos de transportación y mejorar el servicio al cliente encontrando los mejores caminos que debería seguir un vehículo en una red de carreteras que minimice el tiempo o la distancia, son las decisiones de enrutamiento a tener en cuenta.

El objetivo del enrutamiento de vehículos es encontrar una ruta óptima y factible para cada uno de los vehículos. Esta decisión incluye tres aspectos fundamentales refiere Qiu & Hsu [1999], primero es necesario saber si existe una ruta, la cual podría ir del punto de origen al punto de destino, segundo, la ruta seleccionada debe ser factible, es decir libre de congestión, de conflictos, de embotellamiento, según Taghaboni & Tanchoco [1995] y tercero, el camino debe ser óptimo, o al menos casi- óptimo, de acuerdo a la función objetivo.

Todo el análisis de la literatura especializada define el problema científico, planteado en la introducción de la investigación, como una decisión de enrutamiento y no una decisión de transporte. Esto se debe a que en las decisiones de transportación se definen otros aspectos que no fueron abordados tales como: tipo de vehículo, régimen de trabajo, mantenimiento entre otros.

Muchos autores como Diez de Castro et al. [1993], Felipe Valdés [2002] y Torres Gemeil et al. [2003] identifican el término de enrutamiento de vehículos como el conjunto de relaciones comerciales, financieras y jurídicas que tienen el fin de dar valor de lugar, tiempo, posesión a los productos de los proveedores, de acuerdo a las expectativas de los clientes y asegurar relevantes ventajas competitivas.

Otros como Corominas [1991] y Garza Ríos [1997] coinciden en que, el desarrollo de la actividad de distribución de una empresa es un proceso que se hace cada vez más complejo, debido a la diversidad de clientes a satisfacer, los vehículos con que se cuenta y las restricciones a considerar, que en muchos casos, como lo argumenta Blanchard [1998], especialmente las pequeñas y medianas empresas encargadas de la producción y distribución de productos de consumo masivo, no cuentan con una herramienta matemática adecuada que apoye el proceso de toma de decisiones sobre rutas de distribución de productos.

Según Pirabán [2008] el problema de enrutamiento de vehículos es un problema de optimización combinatoria de gran importancia en diferentes entornos logísticos, y consiste en servir a una serie de clientes ubicados geográficamente de manera dispersa; para ello se cuenta con una flota de vehículos que parten desde un depósito central, el problema consiste en asignar a cada vehículo una ruta de clientes, de manera que se minimice el costo de transporte.

Los problemas de ruteo, teniendo en cuenta lo planteado por Fernández [2006], tienen sus propias características tal y como se muestra en la Figura 1.7.

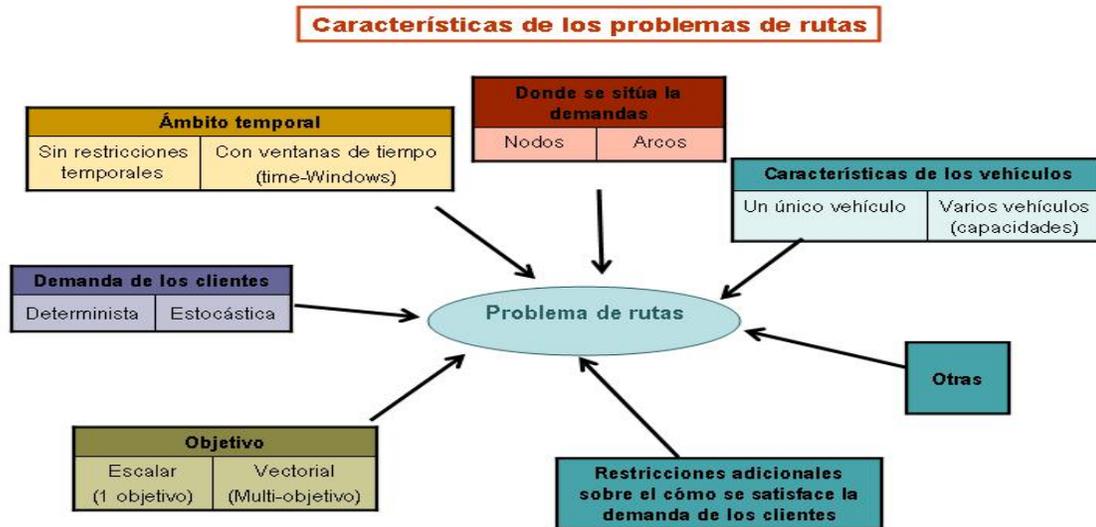


Figura 1.7: Características de los problemas de Rutas.
Fuente: Fernández [2006].

El Problema del Agente Viajero (*Traveling Salesman Problem*, TSP) es sin duda el problema de enrutamiento más estudiado en la literatura científica y sobre el cual se abordará en esta investigación.

Este constituye la situación general y de partida para formular otros problemas combinatorios más complejos (también se define como problema genérico). Según Bodin et

al. [1983] y Lawler et al. [1985], el problema consiste en que un vendedor, que se encuentra en la ciudad origen, debe visitar exactamente una vez un conjunto de ciudades vecinas de tal forma que pueda obtener una ruta de costo mínimo, comenzando y finalizando en la ciudad origen.

El problema radica en hacer un recorrido que pase por “n” ciudades sin repetir ninguna y volviendo a la ciudad de partida de manera que la distancia (o tiempo o costo) total sea mínima. Es un problema de asignación pero con la condición de que la asignación sea un ciclo. Es uno de los problemas más importantes en la historia de la programación matemática por todas las investigaciones [Vitoriano, 2009].

En la Tabla 1.3 se presenta un análisis de diferentes variantes del problema de agente viajero, sus características y algunos autores consultados que han abordado la temática.

Tabla 1.3: Variantes y características del TSP

Variantes	Características	Autores consultados
<i>On-Line Travelling Salesman</i>	Tiene un tiempo mínimo de finalización requerido para atender todas las solicitudes presentadas y retornar al origen	Ausiello et al.[2001]
<i>Deadline-TSP</i>	Localidades que se deben visitar dentro del tiempo programado que tiene cada punto	Bansal et al.[2004]
<i>K-delivery TSP</i>	Transportar un sólo artículo desde un conjunto de distribuidores a un conjunto de puntos de demanda, usando un vehículo de capacidad limitada en una ruta de longitud mínima, empezando y terminando en un lugar fijo	Charicar[1998]; Hernández Pérez & Salazar González [2004]

Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo 5 se muestra un conjunto de autores, los cuales han realizado estudios acerca de los tipos de métodos para la solución de problemas de rutas de distribución, clasificando estos en dos grandes grupos: exactos; aquellos métodos que se complementan a partir de

la programación matemática y aproximados; emulan estrategias eficientes empleadas por la naturaleza y utilizadas en Inteligencia Artificial.

Los algoritmos óptimos o exactos, entre los que destacan los métodos de enumeración implícita, como los algoritmos tipo *branch & bound*, plano de corte o las técnicas de programación dinámica, refiere Papadimitriou & Steiglitz [1982]. Dentro de la clase de algoritmos de aproximación se describen los heurísticos y los metaheurísticos, inmersos en los primeros se encuentran; búsqueda local, algoritmos constructivos, (como los voraces), búsqueda incompleta, etc., y dentro de los segundos se tiene; temple simulado, búsqueda tabú, GRASP, genéticos, entre otros.

Sin embargo, existen otros autores entre los que se destacan Ballou [1991] y Cespón Castro & Amador Orellana [2003], que también han abordado el tema de las rutas de distribución; pero de manera más detallada, y ofrecen una denominación diferente a los tipos de procedimientos, teniendo en cuenta orígenes y destinos diferentes y coincidencia de los puntos de origen y destino, tal y como se muestra en el Anexo 6, orientado hacia dos grandes grupos: aproximados y exactos.

Los métodos aproximados son los de mayor aplicación en la práctica, ya que encuentran soluciones apropiadas de una manera relativamente rápida como lo exigen la mayoría de los Sistemas Logísticos; por su carácter práctico y de fácil análisis los hacen deseados por la mayoría de los profesionales que se desempeñan en el campo de la Administración de Cadenas de Suministros. No obstante, también es conveniente señalar a favor de los métodos de optimización, sus potencialidades para llegar a una solución óptima en presencia de una gran diversidad de variables y donde los supuestos que los limitan, poco a poco han ido reduciéndose, sin embargo requieren una gran cantidad de tiempo de ordenador incluso para los problemas más pequeños, lo que constituye una desventaja notable en el proceso de toma de decisiones. Para detallar lo anteriormente expuesto se propone la tabla que se muestra en el Anexo 7, resultado de una amplia revisión bibliográfica, por parte de las autoras de la investigación.

No ha sido hasta aquí, que ha llegado el desarrollo de métodos u algoritmos capaces de solucionar problemáticas complejas que diariamente se presentan, por el contrario, según Glover [1986], con el surgimiento de una nueva clase de algoritmos aproximados, que combinan las características de los métodos heurísticos básicos, en estructuras de mayor nivel, intentando con ello alcanzar una mayor eficiencia y efectividad en la exploración del espacio de búsqueda, aparecen los denominados métodos metaheurísticos, algunos de los cuales están inspirados en la naturaleza y en vez de basar la búsqueda en un proceso

constructivo que va explorando el espacio de búsqueda con una única solución, lo hacen sobre varias soluciones simultáneamente.

El término "metaheurística" para muchos autores tales como Campos et al. [2007], Gendreau et al. [1997] y Glover & Laguna [1997], constituye una estrategia maestra e inteligente que guía y modifica otras heurísticas para producir soluciones más allá de aquellas que son normalmente generadas en una solicitud por optimalidad local. Las heurísticas guiadas por tal meta-estrategia pueden ser procedimientos de alto nivel o nada más que una descripción de movidas disponibles para transformar una solución en otra, junto con reglas de evaluación asociadas. Blanco et al. [2003], añade que, precisamente la aplicabilidad de las metaheurísticas, se sustenta en su generalidad, adaptabilidad y robustez.

1.9.1 Búsqueda Tabú

Según su creador Glover [1989], la búsqueda tabú, utiliza una estrategia basada en el uso de estructuras de memoria para escapar de los óptimos locales, en los que se puede caer al "moverse" de una solución a otra por el espacio de soluciones. Al igual que en la búsqueda local, esta metaheurística selecciona de modo agresivo, el mejor de los movimientos posibles en cada paso. Las soluciones se obtienen en un escaso tiempo de cómputo y son suficientemente buenas. Sin embargo no se conoce una demostración formal sobre su buen funcionamiento, así como se requiere de una memoria adaptativa como parte del algoritmo. Glover & Laguna [1997], es un procedimiento que "explora el espacio de soluciones más allá del óptimo local".

Es un procedimiento metaheurístico utilizado para manejar un algoritmo heurístico de búsqueda local y así evitar que el proceso se detenga en un óptimo local, este realiza una exploración a través del espacio de configuraciones delimitando adecuadamente los óptimos locales. La búsqueda tabú clasifica los movimientos más recientes en "movimientos tabú" para evitar que el proceso regrese a los óptimos locales y entre en un ciclo repetitivo. Gallego et al. [2004], para esto utiliza unas estructuras de memorias de corto y largo plazo. En cada iteración se pretende pasar de una solución a la mejor solución vecina sin importar si esta es mejor o peor que la solución actual. El criterio de terminación puede ser un cierto número máximo de iteraciones o un valor de la función a optimizar [Barbarosoglu & Ozgur, 1999].

Esta es la más conocida entre la metaheurística y ha sido extensamente aplicada a numerosos problemas combinatorios, De acuerdo a Laporte, Gendreau, Potvin, & Semet [1999], TS ha sido la más exitosa metaheurística.

1.9.2 Recocido Simulado

El Recocido Simulado fue primeramente considerado por algunos autores tales como Eglese [1990] y Reeves [1993] sólo como una heurística para búsqueda local o de vecindario pero más sofisticada, en tanto que otros como Glover & Laguna [1997] y Van [2001], han convenido en clasificarla como metaheurística, sin memoria que podría emplear ya sea búsqueda de vecindario o muestreo aleatorio a medida que se mueve de una solución a otra.

Según Reinelt [1994], esta metaheurística entrega resultados de muy buena calidad, pero para ello requiere de un largo tiempo de corridas. Constituye un algoritmo altamente dependiente del problema y sujeto a numerosos experimentos, además es un meta-algoritmo probabilístico genético para problemas de optimización global, localizando una buena aproximación al óptimo global de una función dada en un gran espacio de búsqueda.

Es un método de búsqueda por entornos caracterizado por un criterio de aceptación de soluciones vecinas que se adapta a lo largo de su ejecución y pertenece a una clase más amplia de algoritmos conocidos como algoritmos de umbral.

1.9.3 Algoritmos Genéticos

Los Algoritmos Genéticos son considerados por Moraga [2002] y Medina & Yepes [2007], como una metaheurística introducida con la idea de imitar los procesos de selección y evolución natural. Su enfoque simula el proceso cuando las especies se adaptan a un ambiente complejo y cambiante a objeto de maximizar su probabilidad de sobrevivencia.

Es una técnica, inspirada en la reproducción de los seres vivos, en la que las soluciones del problema son capaces de reproducirse entre sí, combinando sus características y generando nuevas soluciones. Es usada en la computación como búsqueda técnica y para encontrar soluciones reales o aproximadas para la optimización y solución de problemas de búsqueda. Son categorizados como metaheurísticas avanzadas y son una clase particular de los algoritmos de evolución que usan técnicas inspiradas en la biológica evolutiva, tales como herencia, mutación, selección y cruzamiento (también llamado recombinación) [Gallego & Escobar, 2000].

A consideración de Goldberg [1989] se pueden citar una serie de ventajas de esta metaheurística tales como:

- Pueden resolver problemas difíciles de forma rápida y confiable.
- Son fáciles de enlazar a simulaciones y modelos existentes.
- Son extensibles.

- Son fáciles de hibridizar.
- Trabajan con una codificación del conjunto de parámetros, no con los parámetros en sí.
- Las soluciones obtenidas son buenas o cercanas al óptimo, dependiendo del tamaño del problema y calidad de la población inicial.
- Realizan la búsqueda a partir de una población de puntos, no de un punto simple.
- Sólo utilizan la información de la función objetivo, sin derivadas u otro conocimiento auxiliar.
- Utilizan reglas de transición probabilísticas, no determinísticas.

Por su parte Schaffer & Eshelman [1996], manifiestan que estos algoritmos no son la mejor alternativa en el caso de problemas combinatorios. Además plantean que la obtención de buenos esquemas de cruzamiento es difícil de encontrar pues no existe una clara teoría de ellos. A esto Reinelt [1994] agrega que encontrar soluciones óptimas podría requerir considerable tiempo de cómputo, así como su pobreza en la fase de construcción.

Como lo establece Moraga [2002], cada una de las metaheurísticas anteriormente presentadas no balancean las fases de construcción y mejoramiento. Es decir, la fase de construcción de soluciones factibles es mínima en comparación a una larga fase de mejoramiento a través de heurísticas de búsqueda local. Por lo general, estas metaheurísticas proponen generar aleatoriamente una solución factible en la fase de construcción; incluso, los Algoritmos Genéticos que toman ventajas de un excelente paradigma aprovechando mecanismos de paralelismo, son pobres en la fase de construcción. Algunos autores sugieren que es necesario en la generación de la primera solución, incorporar mayor conocimiento del problema mediante el uso de una heurística de construcción.

Es precisamente el Algoritmo de Sistemas de Colonia de Hormigas el que a partir de la construcción de las rutas de distribución, busca soluciones cercanas a las estrategias óptimas.

1.9.4 Colonia de Hormiga

El Sistema de Colonia de Hormigas es una técnica de resolución de problemas de Optimización Combinatoria introducida por Dorigo & Stützle [2004] como una metaheurística basada en población que unifica, bajo un esquema general, varias técnicas de resolución de problemas de optimización combinatoria que se caracterizan por usar un conjunto de agentes (hormigas artificiales) para construir soluciones en forma incremental, las cuales

siempre encuentran según Gambardella & Dorigo [1997] el camino más corto entre el lugar donde habitan y las fuentes de comida, debido al intercambio indirecto de información a través de la deposición de feromona y por una información calculada a priori de manera heurística. Esta metaheurística, posee mecanismos de explotación y exploración de caminos, lo cual evita el fácil atrapamiento en óptimos locales.

Adicionalmente, Campbell & Savelsberg [2003], precisan que debe ser empleada una heurística de inserción eficiente para completar las rutas en caso de que algún cliente quede sin ser evaluado por la Colonia de Hormigas.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente planteado las autoras consideran, que a grandes rasgos, el algoritmo de colonias de hormigas consta de tres procesos que se repiten a lo largo de una serie de iteraciones: construir soluciones, evaluar soluciones, y depositar feromonas.

Esta metaheurística tiene una serie de ventajas entre las que se pueden citar fundamentalmente:

- Construyen soluciones partiendo de cero.
- Constituyen un tipo bastante amplio de algoritmos de mejora, en los que en cada iteración se obtiene una solución mejorada buscando en la vecindad de la solución existente.
- Para el desarrollo de soluciones altamente precisas o con óptimos locales muy pobres la búsqueda de vecindad dependerá el tipo de estructura que se elija.

1.9.5 Algoritmo GRASP

El algoritmo GRASP viene de las siglas "*Greedy Randomize Adaptive Search Procedure*", significa que son procedimientos de búsqueda voraces, adaptativos y aleatorios, Feo & Resende [1995], este método ha tenido un desarrollo más reciente que los otros metaheurísticos.

Son procedimientos de búsqueda que no necesariamente evalúan a todos los elementos del problema, son voraces ya que eligen a los mejores candidatos que cumplan ciertas propiedades, son adaptativos porque cada generación de candidatos puede variar de acuerdo a las condiciones necesarias del problema y son aleatorias ya que de la lista de candidatos se escoge un elemento al azar.

Encuentran soluciones aproximadas (es decir, 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. La búsqueda local juega un papel importante en GRASP ya que sirve para buscar soluciones localmente óptimas en regiones prometedoras del espacio de soluciones [De- Alba, 2004].

1.9.6 Hiperheurística

Tuvo sus primeras aplicaciones reportadas por Fisher [1961], Thompson [1963] y Crowson [1963] enfrentando el problema de *Job Shop Scheduling* (elección de heurísticas en base a probabilidades) [Garrido, 2006].

En la Tabla 1.4 aparecen características y clasificaciones de hiperheurística según Garrido [2006].

Tabla 1.4: Características y clasificación

Características	<ul style="list-style-type: none"> • Pueden ser aplicadas a un amplio rango de problemas • Su fin no es vencer a técnicas construidas a la medida, sino demostrar que son competitivas y capaces de generar resultados de calidad • No son sensibles a perturbaciones del problema y a distintos problemas
Clasificación	<ul style="list-style-type: none"> • Sin aprendizaje <ul style="list-style-type: none"> – Aleatorias – Greedy
	<ul style="list-style-type: none"> • Con aprendizaje <ul style="list-style-type: none"> – Función de elección – Metaheurísticas
	<ul style="list-style-type: none"> • Basadas en razonamiento
	<ul style="list-style-type: none"> • Aprendizaje incremental

Fuente: Elaboración propia basada en Garrido [2006].

Un concepto aún más novedoso de la hiperheurística obedece al enfoque de los agentes inteligentes pues consisten en estrategias para determinar en cada momento de un proceso global de búsqueda de una solución la elección de la metaheurística más apropiada para abordar la etapa en la que se encuentra el proceso utilizando el conocimiento y la información disponible acerca del problema y del propio proceso de solución [Medero & Melián, 2005].

Según Garrido [2006] este método “inteligentemente” controla la elección de la heurística (método) de bajo nivel que debiera ser aplicada en cada punto de decisión dependiendo de las características de las heurísticas y de la región del espacio de solución que se está

explorando (estado del problema). Para ello, la hiperheurística debiera tener un mecanismo de aprendizaje.

Las hiperheurísticas son procedimientos de búsqueda de muy alto nivel que se sitúan por encima de las metaheurísticas, estas se encargan de seleccionar, de cada momento y para cada problema, el método heurístico o metaheurístico más adecuado [Garrido, 2006].

1.10. Desarrollo del proceso de reparaciones de averías eléctricas

A mediados de los años 80, en los municipios existían sucursales donde los consumidores reportaban las afectaciones que presentaban en sus servicios, anotándose en un libro y por esta lista se mandaba en vehículo a resolver dichas interrupciones. Esta gestión era así sobre todo en los niveles secundarios (110V o 220V) y de servicios, ya que para la atención a las quejas primarias (4kV o 13KV) y de Subtransmisores (33kV) existían 3 despachos, uno en Sagua, otro en Remedios y un tercero en Santa Clara. En los niveles de Redes de Transmisión (110kV y 220kV) existía un despacho Territorial que atendía estos niveles de voltaje de las provincias de Villa Clara, Cienfuegos y Santi Spiritus. La comunicación de los consumidores con estas sucursales y despachos eran a través de teléfonos o personalmente y de estos despachos con los carros de reparación a través de *walking-talking*.

Posteriormente se crearon Centros de Quejas en las subestaciones de 110kV, aprovechando los medios de comunicación que existían en estas instalaciones, con la desavenencia que después de las 5:00 PM el oficial de guardia recogía las quejas y las dejaba en las oficinas, las cuales eran atendidas al otro día de trabajo, solamente reparaban rápidamente aquellas de alto nivel. A partir del año 2000, tomando experiencia de otros países, se decide centralizar el despacho, creando el despacho provincial en Santa Clara que atiende todos los municipios de Villa Clara, mejorando las comunicaciones con estos y los carros de guardia con el empleo de nuevas tecnologías.

En la actualidad el proceso empieza con las llamadas de los clientes que entran al Grupo de Control y Atención al Cliente (108), donde obtienen atención ininterrumpida a sus quejas. De ser problemas técnicos son pasadas al Grupo Despacho, el cual se divide en cinco departamentos que atiende a los diferentes municipios de la provincia de Villa Clara. El despachador en turno se mantiene atento a los reportes de falta de servicio y/o daños en las redes eléctricas. Si existen varias notificaciones, en todo momento, la prioridad en la atención de las averías eléctricas esta dada por el nivel de voltaje en la que está presente y en los casos de quejas de servicio (que es el mayor porcentaje) se tiene en cuenta la antigüedad de la queja y la distribución de estas.

Cuando ocurre la avería se notifica al personal técnico y de dirección los cuales cuentan con experiencia y habilidad para la planificación y ejecución del recorrido de los vehículos para la reparación de averías eléctricas. Si surge de forma imprevista una avería primaria o secundaria se debe resolver con rapidez y agilidad ya que son los niveles que más afectan a la población y a la sociedad en general. De acuerdo con el tipo de avería se verifica si la forma de resolverla es en caliente o en frío y si es necesario tocar partes primarias o no, como lo determine el jefe de brigada y si puede ser resuelto por el personal de la guardia.

1.11. Conclusiones Parciales

Después de realizado el estudio bibliográfico del tema mediante lo plasmado en el capítulo se puede concluir:

1. Los sistemas logísticos y la cadena de suministros han sido temas tratados por diferentes autores, tanto nacionales como internacionales demostrando la necesidad de su conocimiento para una correcta toma de decisiones.
2. El transporte constituye una de las principales funciones logísticas por su alto nivel de costos dentro de una organización, los autores especializados en el tema refieren que para lograr una adecuada decisión de enrutamiento de vehículos se debe encontrar una ruta óptima garantizando un adecuado servicio al cliente.
3. Las herramientas para resolver problemas de optimización combinatoria encontradas en la literatura se dividen en dos áreas de solución; la exacta que obtiene la solución óptima pero en un tiempo excesivo y la aproximada que encuentra soluciones cercanas al óptimo pero en tiempo reducido.
4. El proceso de toma de decisiones referido al problema de enrutamiento de vehículos involucrado en la planificación de recorridos para la reparación de averías eléctricas, usualmente, se basa en la experiencia y habilidad del personal encargado de esta tarea, debido al desconocimiento por parte del alto mando de la empresa de herramientas con basamento matemático, que permitan la obtención de la mejor solución acorde a la complejidad del problema.

CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO PARA ASISTIR EL PROCESO DECISIONAL DE OPTIMIZACIÓN RELATIVO AL ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS

2.1. Introducción

En la actualidad el desarrollo de las empresas ha traído consigo la necesidad de enfocarse hacia un mejor comportamiento del proceso logístico. Esto ha servido como impulso a especialistas y conocedores de este proceso, que implementen, como se evidencia en el marco teórico y referencial de la investigación, procedimientos y modelos de optimización relacionados al enrutamiento de vehículos. En este capítulo, para dar solución al problema científico planteado en la investigación, se expone un procedimiento general (ver Figura 2.1) para asistir a la toma de decisiones en el proceso de optimización relativo al enrutamiento de vehículos.

2.2. Desarrollo del procedimiento por etapas

El procedimiento propuesto esta estructurado por tres etapas. En la primera de ellas, se realiza un análisis previo a la optimización, donde se selecciona el área de solución (exacta o aproximada), que requiere el problema objeto de estudio. La segunda etapa consiste en elegir un método de optimización específico para un caso de estudio dado, según la clasificación previamente realizada. Por último, en la tercera etapa se realiza un análisis posterior a la optimización, el cual se desarrolla a través de parámetros que permitirán, durante la aplicación del procedimiento, constatar la efectividad de las soluciones propuestas.

Etapas I: Pre-optimización en las decisiones de enrutamiento

2.2.1 Clasificación del problema

En este epígrafe se definirá el problema genérico de enrutamiento de vehículos, con el objetivo de proporcionar elementos que serán necesarios para la comprensión del procedimiento propuesto. Además, se establecerán las variables que permitirán clasificar problemas de enrutamiento de acuerdo con su posible área de solución (exacta o aproximada), para posteriormente proponer una herramienta para la clasificación de un problema de enrutamiento de vehículos dado.

Planteamiento del problema genérico de enrutamiento de vehículos

El planteamiento del problema del viajante, también conocido como *Traveling Salesman Problem* (TSP), aparentemente sencillo, puede enunciarse del siguiente modo: se disponen de “n” ciudades, con una serie de caminos entre ellas. El objetivo final es que, comenzando

y finalizando en la misma ciudad, se recorran el resto de las ciudades una sola vez, empleando el menor tiempo y costo posible, tal y como se muestra en la Figura 2.2.

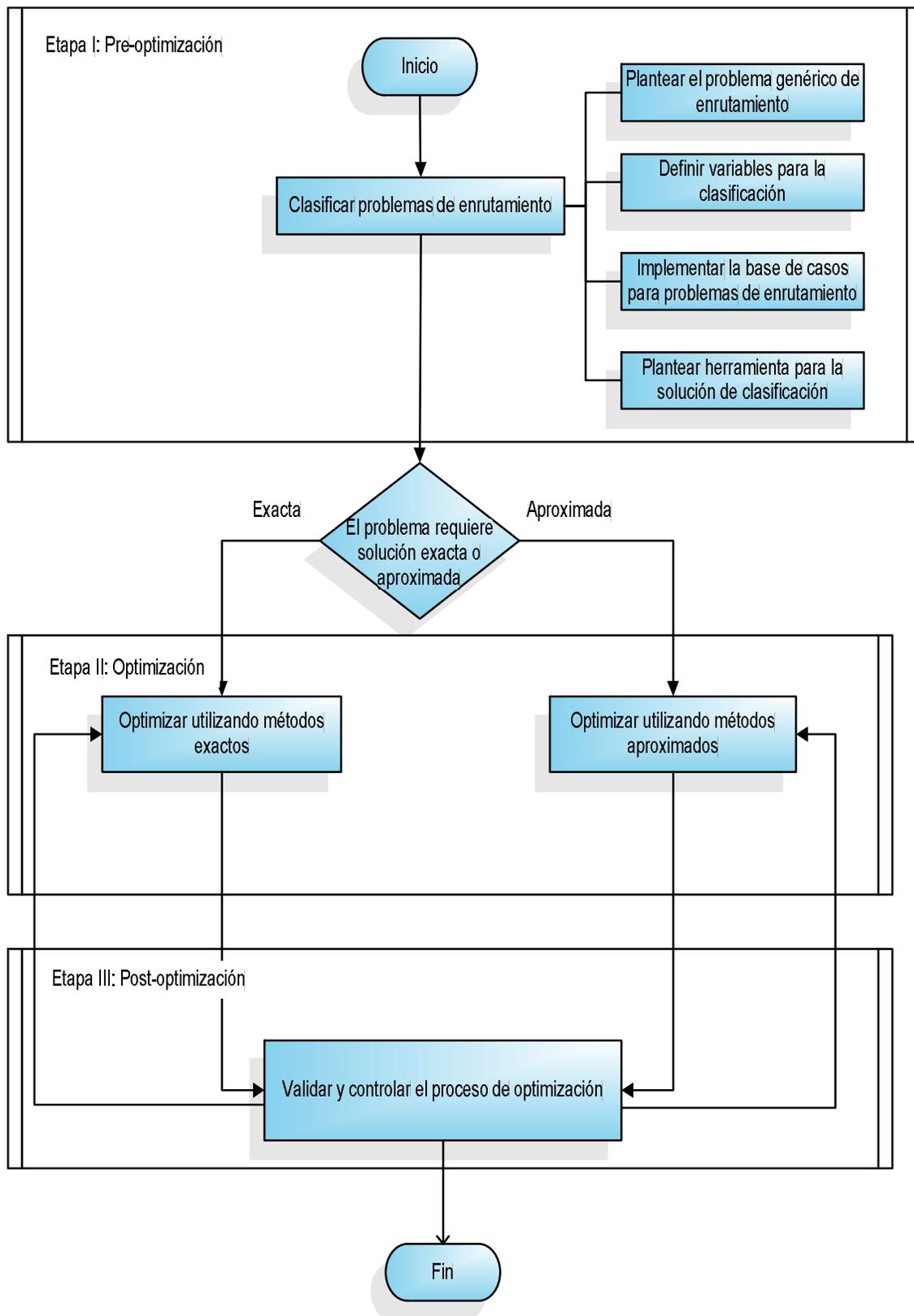


Figura 2.1: Procedimiento para la toma de decisiones en la optimización del enrutamiento.
Fuente: Elaboración propia.

Formulación matemática

Para formular el problema se introduce la siguiente terminología: sea un grafo completo llamado $G = (N, E)$, donde $N = \{N_0, N_1, \dots, N_n\}$ representa todos los nodos del grafo, también llamados ciudades y $E = \{(V_i, V_j) | V_i, V_j \in V, i < j\}$ indica los diferentes arcos que conectan completamente todos los nodos. Cada arco $(i, j) \in E$ tiene asignado un valor d_{ij} que representa la distancia entre las ciudades "i" y "j". El TSP es el problema de encontrar el recorrido más corto o óptimo, denotado como r^* , que visite cada uno de los N nodos del grafo una vez exactamente. Para TSP simétricos la distancia entre las ciudades es independiente de la dirección en que se atraviesen los arcos, esto es $d_{ij} = d_{ji}$ para cada par de nodos.

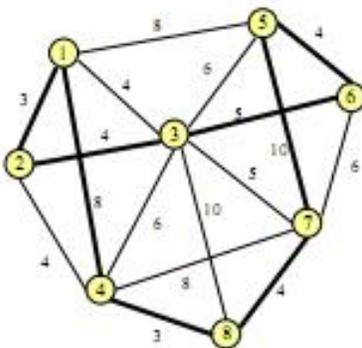


Figura 2.2: Representación del problema genérico del TSP.
Fuente: Martí Cunquero [2001].

Complejidad computacional del problema de enrutamiento de vehículos

En la literatura especializada, el término complejidad computacional puede ser encontrado en las dos variantes siguientes, complejidad espacial y temporal [Hsu & Huang, 1994]. Investigaciones recientes en el campo del diseño y análisis de algoritmos han planteado que la variante complejidad espacial resulta irrelevante para el análisis de la complejidad computacional. Esto en lo fundamental, está condicionado al desarrollo tecnológico de los ordenadores, es decir, la capacidad de memoria física presente hoy día en los ordenadores puede almacenar cualquier dimensión de problema de la vida real. Por tales motivos, este paso del procedimiento se centra en el análisis de la complejidad temporal del problema del enrutamiento de vehículos.

En reiteradas ocasiones diversos autores como Garey & Johnson [2003], Aynos Ambite & Hernández [2008], Díaz Parra & Cruz Chávez [2006] y Coy Calixto [2005], han planteado que el problema de enrutamiento de vehículos es un problema NP que por sus siglas en idioma inglés significa (*non-deterministic polynomial bounded*). Se dice que un problema es NP cuando resulta altamente improbable que existan algoritmos que garanticen la obtención de soluciones óptimas en tiempos polinómicos [Garey & Johnson, 1979]. El concepto de

tiempo polinómico se puede expresar teniendo en cuenta que, en la medida que crecen numéricamente los componentes del problema, el tiempo para encontrar las combinaciones generadas por este crecimiento, puede ser acotado por una ecuación polinómica. Para el caso de los problemas NP, este tiempo no puede ser expresado en términos de una ecuación polinómica, por lo general se pueden establecer acotamientos a través de ecuaciones exponenciales, fraccionarias y logarítmicas.

Cuando se hace alusión al tiempo empleado, no se está asociando esta variable con el tiempo empleado por el ordenador, ya que este tiempo depende de una gran cantidad de factores tecnológicos, como son: cantidad de procesos que se ejecutan en el instante de procesamiento, recursos de hardware del ordenador, lenguaje de programación en que fueron implementados los algoritmos, entre otros.

En múltiples investigaciones realizadas por autores como: Aynos Ambite & Hernández [2008], Laporte et al. [1999] y Jaque Pirabán [2008], se establecen comparaciones entre algoritmos de solución, para el problema de enrutamiento de vehículos, a través del tiempo que consume el ordenador en una corrida del algoritmo. Como fue planteado anteriormente este tiempo depende de muchos factores, pero en estas investigaciones las comparaciones se realizan a través de análisis estadísticos para múltiples corridas de la implementación, garantizando ciertos niveles de homogeneidad en los experimentos. Por lo general en estos análisis estadísticos se utilizan herramientas de la estadística inferencial como pruebas de hipótesis y análisis de varianza, permitiendo realizar múltiples comparaciones entre los tiempos de corridas.

Las comparaciones que se realizan no solo están basadas en los tiempos de corridas, sino que también se recrean comparaciones para la calidad de la solución de los algoritmos. En este sentido se aprecian dos tipos de comparaciones, una contrastando algoritmos aproximados [Ahuja et al., 1999] y otra comparando aproximados con exactos [Díaz Parra & Cruz Chávez, 2006]. En el primer caso las soluciones varían para cada corrida, no siendo así para el segundo caso de comparación, ya que el valor de la solución exacta siempre es la misma. Para este tipo de comparación, se verifica si la solución aproximada no es significativamente diferente del valor de solución exacta.

La complejidad temporal de un problema determinado puede expresarse a través de las posibles combinaciones, que como máximo, pudieran generarse con el planteamiento del mismo. Para comprender esta afirmación se muestra la Figura 2.3, donde se aprecia que para encontrar el mínimo valor en una lista de “n” elementos, y además asumiendo que a la operación de consultar cada elemento de la lista se asigna un tiempo “t”, entonces se puede plantear que este problema tiene complejidad $O(t \cdot n)$. Como se puede apreciar la complejidad de este problema queda expresada en una forma polinómica, en la medida que

aumenta el componente “n” la complejidad temporal del problema crece de manera polinomial.

<u>Elementos</u>
3.4
1.3
6.4
.
.
.
n

Figura 2.3: Lista de “n” elementos.
Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta el análisis anterior se plantea, de manera análoga, que para el problema del viajero vendedor (*Travel Salesman Problem, TSP*), variante simple del VRP la complejidad estaría dada por la expresión $O(t \cdot 2^{n-1})$, ver Figura 2.4. Como se aprecia en dicha figura las combinaciones de solución para el problema son expresadas en forma exponencial. Por tales motivos queda demostrado que el problema de enrutamiento de vehículo, como mínimo, es un problema NP, debido a que en la medida que se incrementa la componente “n” la complejidad temporal del problema experimenta un crecimiento no polinomialmente acotado.

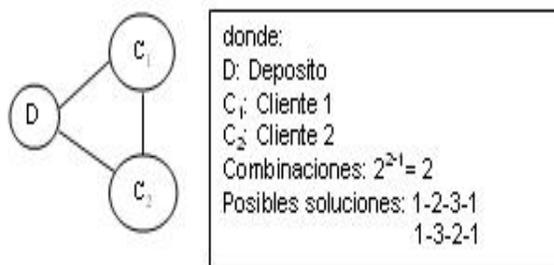


Figura 2.4: Representación de las soluciones del TSP.
Fuente: Elaboración Propia.

Como fue demostrado anteriormente el problema de enrutamiento de vehículos en su variante más simple, es al menos NP, esto se pudo constatar con el crecimiento exponencial del tiempo para encontrar la mejor solución. Para encontrar soluciones de calidad a estos problemas de complejidad NP Corona [2005], Jaque Pirabán [2008], Ahuja et al. [1999] y Dorigo & Stützle [2004] entre otros, han planteado el uso de métodos heurísticos y meta-heurísticos dentro de la categoría de métodos aproximados. Estas herramientas de la Inteligencia Artificial, han demostrado ser muy eficientes para la solución de problemas complejos y dinámicos, sobre todo para problemas inminentemente grandes en cuanto a cantidad de variables y restricciones. Por lo general, son herramientas matemática y computacionalmente complejas y de poca aceptación por los decisores por lo anteriormente

mencionado. Si bien se conoce que el enrutamiento de vehículos es de complejidad NP, existen variantes de este tipo de problema en la que los valores de sus componentes son relativamente pequeñas, tal como se muestra en la Figura 2.4. Para estas variantes se ha demostrado alcanzar mejor optimización de esta decisión a través de métodos exactos [Díaz Parra & Cruz Chávez, 2006], sin embargo se desconocen valores umbrales para los componentes del modelo con vista a elegir en qué campo de herramientas de optimización estará la solución pertinente del problema.

La problemática descrita en los párrafos anteriores, requiere de un proceso de clasificación relativa a conocer, si la complejidad de un problema dado requiere su formulación y posible solución a través de métodos exactos o aproximados. Para ello se propone, en los pasos posteriores de esta etapa del procedimiento, realizar la clasificación de casos de enrutamiento de vehículos cualesquiera, de acuerdo con un grupo de variables, dichas variables permitirían ubicar la solución del mismo con herramientas de optimización exacta o aproximada.

Definición de las variables para la clasificación

Como fue descrito en el paso anterior, para valores relativamente pequeños y de tamaño medio de las componentes del modelo, se podría utilizar un método de solución exacto; mientras que variantes en las que las componentes del problema resulten ser elevadas, se ajusta la solución aproximada. También se puede inferir que no existen valores umbrales para las componentes del problema, con los cuales se pueda establecer si la solución del mismo es exacta o aproximada.

Por tales motivos, este paso del procedimiento propone un grupo de variables, que permitan establecer un proceso de clasificación con vista a ubicar la solución de un problema de enrutamiento determinado, en el campo de los métodos exactos o aproximados.

Precisamente, la selección de las variables involucradas, fue producto de un minucioso análisis de la literatura especializada, específicamente en Fernández [2006], como se demuestra en el capítulo anterior y de la valoración de las autoras de la presente tesis.

La inclusión o no de una variable de clasificación va a depender de su influencia en la complejidad del problema. En ocasiones se aprecia en la literatura especializada afirmaciones relacionadas con el crecimiento de los problemas, por lo general se expresa, que este crecimiento está relacionado simplemente con la cantidad de vehículos y la cantidad de nodos. Estos criterios acerca de las complejidades de los problemas evidencian una perspectiva limitada, ya que, como se muestra en el desarrollo de este paso, existen otros aspectos que pueden incrementar la complejidad de los problemas. Además no deben

ser olvidadas las posibles interacciones entre las variables que definen la complejidad, a este último elemento se le pretende dar solución en los pasos siguientes de la presente etapa.

De manera independiente, para definir las variables propuestas, es necesario la conformación de un grupo de expertos, encargados de establecer según su juicio (ver Tabla 2.2), una puntuación a partir de cuan representativas sean estas variables con vista a ser incluidas para el análisis de la complejidad.

Para ello se seleccionaron, como miembros del equipo, a aquellos con conocimientos de la disciplina de Logística, específicamente de los temas de transporte.

La cantidad o número de expertos, se obtuvo a partir de la expresión 2.1.

$$n_e = \frac{p(1-p)k}{i^2} \quad [2.1]$$

donde:

n_e : Cantidad necesaria de expertos.

i : Precisión deseada en la estimación.

k : Constante computarizada que depende del nivel de confianza (1- α).

p : Error estimado.

(1- α)	K
0.90	2.6896
0.95	3.8416
0.99	6.6564

El número de expertos (siete) fue calculado según la ecuación 2.1, estableciéndose para ello los valores siguientes: $p = 0,01$; $i = 0,1$ y $1-\alpha = 0,99$. Los valores de índice de consenso mostrados en la Tabla 2.2, fueron obtenidos a través de la expresión 2.2 formulada por Abreu Ledón [2004]. En el Anexo 8 aparecen los expertos con el cargo que ocupan y su grado científico.

$$ICS_i = \left(1 - \frac{s_i}{s_L}\right) \times 100\% \quad [2.2]$$

donde:

ICS_i : Índice de Consenso entre los expertos con relación a la inclusión de una variable “i” en el proceso de clasificación.

s_L : Desviación estándar máxima posible. (ver Tabla 2.1)

s_i: Desviación estándar del juicio de los expertos para la inclusión de una variable “i” en el proceso de clasificación.

Tabla 2.1: Valores de la desviación estándar máxima posible para el juicio de los expertos dados a las distintas variables

n _e	7	8	9	10	11	12	13	14	15
s _L	2,673	2,673	2,635	2,635	2,611	2,611	2,594	2,594	2,582

Fuente: Abreu Ledón [2004].

Los valores en la Tabla 2.2 varían de uno (1) a cinco (5), siendo (1) el valor más desfavorable referido a la inclusión de esa variable en la clasificación, y (5), valor más favorable referido a este suceso descrito.

Tabla 2.2: Juicio emitido por los expertos para la inclusión de variables para la clasificación

VARIABLES	EXPERTOS							VALOR PROMEDIO	INDICES DE CONSENSO
	1	2	3	4	5	6	7		
Cantidad de Nodos	5	5	5	5	5	5	5	5.000	100
Cantidad de Vehículos	4	4	4	4	4	4	4	4.000	100
Tipo de flota	5	5	5	4	5	5	5	4.857	99.9
Cantidad de Objetivos	5	5	5	5	5	5	5	5.000	100
Ámbito Temporal	4	4	4	4	3	4	4	3.857	99.9
Demanda de los Clientes	5	5	4	5	5	5	5	4.857	99.9

Fuente: Elaboración Propia.

Como resultado del trabajo con los expertos, se decidió establecer como variables para la clasificación del área de solución (exacta o aproximada) del problema de enrutamiento, todas las planteadas anteriormente. Para el caso de índices de consenso se consideró como adecuado, un índice mayor que el 85%, dicho valor límite se establece bajo la base de experiencias de aplicaciones en tesis doctorales, maestrías, trabajos de diploma e innumerables proyectos de curso de estudiantes de Ingeniería Industrial.

Implementación de la base de conocimiento para problemas de enrutamiento

La construcción de la base de casos (problemas de enrutamiento ya resueltos), resultado de la consulta de la literatura especializada, se detalla en el Anexo 9, donde se reflejan los métodos de solución, variables y referencias de cada caso, en una estructura que puede ser utilizada por un gestor de base de datos. En cada uno estos casos anteriormente detallados, el algoritmo utilizado es el resultado de demostraciones matemáticas y análisis de pertinencia por parte de cada autor, los cuales demuestran la factibilidad del mismo

comparando en muchas ocasiones, unos algoritmos con otros, para comprobar sus capacidades de solución en términos de tiempo computacional y calidad de la misma.

En esta base de casos, 28 pertenecen a la categoría de exactos y 93 a la de aproximados. Considerando la demanda de los clientes, 99 se pueden clasificar como determinísticos y 22 estocásticos, partiendo del ámbito temporal, se registraron 69 con ventanas de tiempo y 52 sin restricciones temporales, mientras que con respecto a la cantidad de objetivos, 76 resultaron mono-objetivo y 45 multi-objetivo. En todos los casos también se analiza la cantidad de nodos a visitar, así como la cantidad de vehículos a utilizar en la transportación, con su respectiva clasificación según la capacidad de carga de la que resultaron 76 homogéneos y 45 heterogéneos.

Planteamiento de la herramienta para la clasificación

Para realizar la clasificación de los problemas de acuerdo a su solución exacta o aproximada, se propone la utilización del método de Discriminante, el cual, a partir de un grupo de variables independientes predictivas, obtiene valores de una variable dependiente o de clasificación.

La selección de esta herramienta de clasificación estuvo basada fundamentalmente en el tamaño del problema a tratar, la cantidad de casos a utilizar como base para la clasificación, así como en la cantidad de categorías a clasificar; a los efectos de esta investigación, se tienen en cuenta dos categorías: área de solución exacta y aproximada. Existen otros métodos de clasificación como los planteados por Segovia Vargas et al. [2003] y Valverde & Gachet [2007], los cuales se utilizan para problemas de gran magnitud referidos a gran cantidad de casos (en el orden de los miles), gran cantidad de variables y gran cantidad de categorías; no correspondientes con el problema de clasificación abordado en esta investigación.

En la Tabla 2.3 se muestra la variable de clasificación (dependiente) y las respectivas variables independientes (discriminantes), así como las instancias que implican los mismos.

Para la solución de este problema de clasificación, se propone la ecuación 2.3, la cual incluye todas las variables anteriormente aprobadas por los expertos.

$$D = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_6x_6 \quad [2.3]$$

donde:

D: Función de combinación lineal de todas las variables dependientes capaz de diferenciar lo más posible entre los grupos.

b_1, \dots, b_6 : Ponderaciones de las variables independientes.

Tabla 2.3: Variables de clasificación

VARIABLES	TIPO DE VARIABLES	INSTANCIAS DE LAS VARIABLES
Área de Solución	Dependiente	Exacto/Aproximado
Ámbito Temporal (X_1)	Independiente	Sin restricciones temp. / Con ventanas de tiempo
Demanda de Clientes (X_2)	Independiente	Determinístico / Estocástico
Objetivo (X_3)	Independiente	Mono-Objetivo / Multi-Objetivo
Cantidad de Nodos (X_4)	Independiente	Unidades
Cantidad de Vehículos (X_5)	Independiente	Unidades
Tipo de Flota (X_6)	Independiente	Homogéneo / Heterogéneo

Fuente: Elaboración propia.

Para la construcción de la ecuación discriminante en función de aquellas variables que tengan un alto grado de contribución a la predicción de clasificación, se proponen cuatro estadígrafos, los cuales serán descritos seguidamente:

- Lambda de Wilks: este estadígrafo de manera similar al método Paso a Paso (Step-Wise) de la regresión múltiple, establece una jerarquía para las variantes independientes, las cuales resultarán candidatas a conformar la ecuación discriminante. El estadígrafo mide el cambio que se produce al incorporar cada una de las variables en el modelo, favoreciendo a aquellas variables de mayor valor acorde con la expresión 2.4.

$$F_{cambio} = \left(\frac{n - g - p}{g - 1} \right) \left(\frac{1 - \frac{\lambda_{p+1}}{\lambda_p}}{\lambda_p} \right) \quad [2.4]$$

donde:

n: Número de casos válidos.

g: Número de grupos (en este caso son dos grupos).

λ_p : Lambda de Wilks que corresponde al modelo antes de incluir la variable que se está evaluando.

λ_{p+1} : Lambda de Wilks que corresponde al modelo después de incluir la variable que se está evaluando.

- Varianza no explicada: se basa fundamentalmente en la suma de la variación no explicada por las variables ya incluidas en el modelo para el par de grupos. Como regla

general se incorporan al modelo, aquellas variables que minimicen la cantidad de varianza no explicada. En la expresión 2.5 se aprecia que la varianza no explicada es directamente proporcional a la distancia H Mahalanobis.

$$R^2 = cH_{ab}^2 \quad [2.5]$$

Para calcular la varianza no explicada se propone el estadígrafo R en la expresión 2.6:

$$R = \sum_{a=1}^{g-1} \sum_{b=a+1}^g \frac{4}{4 + H_{ab}^2} \quad [2.6]$$

donde:

"a" y "b": Dos grupos de clasificación.

- Distancia de Mahalanobis: para la determinación de la distancia, se propone la expresión 2.7 a partir de Mahalanobis [1936], incorporándose en cada caso la variable que maximiza dicha distancia entre los dos grupos.

$$H_{ab}^2 = (n - g) \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p w_{ij} \cdot \left(\bar{x}_i^{(a)} - \bar{x}_i^{(b)} \right) \left(\bar{x}_j^{(a)} - \bar{x}_j^{(b)} \right) \quad [2.7]$$

donde:

$\bar{x}_i^{(a)}$: Media del grupo a en la i-ésima variable independiente.

$\bar{x}_i^{(b)}$: Media del grupo b en la i-ésima variable independiente.

w_{ij} : Elemento de la inversa de la matriz de varianza-covarianza intra-grupos de acuerdo con Morrison [1976].

- Menor razón F: la inclusión radica en potencial aquellas variables que minimicen la menor razón del valor del estadígrafo de los grupos. Este estadígrafo, (ver expresión 2.8), se basa en la completación de la distancia de Mahalanobis de acuerdo al tamaño de los grupos.

$$F = \frac{(n - p - 1)(n_1 n_2)}{p(n - 2)(n_1 n_2)} H_{ab}^2 \quad [2.8]$$

donde:

n_1 : Cantidad de casos de la clase o grupo 1.

n_2 : Cantidad de casos de la clase o grupo 2.

En el segundo paso de esta etapa del procedimiento propuesto, se realiza un análisis a través del trabajo con los expertos, para aquellas variables que deberían ser incluidas para la clasificación del área de solución del problema. En dicho paso los expertos expresaban a

través de una calificación, si una determinada variable pudiera predecir que la complejidad del problema meritaba una solución exacta o aproximada.

Por otra parte, los estadígrafos descritos anteriormente nos permiten demostrar matemáticamente, qué variables deben ser incorporadas a la ecuación discriminante, con el objetivo de desarrollar de manera eficiente el proceso de clasificación.

Como puede apreciarse, han sido descritas dos formas de incluir variables predictivas en el proceso de clasificación. Una primera, con alto grado de subjetividad y una segunda forma expresada en un sentido más cuantitativo. El proceso de toma de decisiones relativo a esta problemática debe estar basado, en última instancia, en la segunda forma descrita sin demeritar los valores cualitativos aportados por la elección de los expertos.

La elección de las variables de clasificación por parte de los expertos, permite introducir diversidad en este proceso, incorporando al estudio variables que pudieron ser incluidas, producto a un desconocimiento práctico de la decisión a tomar. El análisis matemático y estadístico favorece la elección preeliminar realizada por los expertos, sobre todo en aquellas variables, en las que es difícil registrar información proveniente de los casos consultados en la literatura especializada.

La utilidad esencial de este paso del procedimiento radica en la clasificación de nuevos casos. Desde el punto de vista de la toma de decisiones, esta herramienta debe permitir que para un determinado problema de enrutamiento, del cual se haya registrado los valores de las variables que definen su complejidad, se pueda conocer en qué área de solución (exacta o aproximada), se encuentra la herramienta de optimización a utilizar.

El problema de clasificación desde el punto de vista gráfico se puede apreciar en la Figura 2.5, donde los centroides ploteados representan las clases o categorías y d_c indica el punto de corte para la clasificación final.

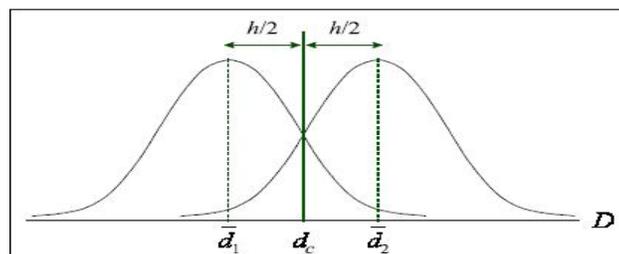


Figura 2.5: Utilización de un punto de corte equidistante de ambos centroides ($n_1 = n_2$).
Fuente: Obson [1992].

En la Figura 2.5 se describe un caso de clasificación donde el punto de corte es equidistante y el tamaño de los grupos es igual, esto extrapolado al problema de clasificación que ocupa

a esta investigación, significa que se debe tener la misma cantidad de casos resueltos mediante métodos exactos que mediante métodos aproximados.

En la práctica, el registro de igual cantidad de casos aproximados y exactos resulta no factible, es por ello que se propone la expresión 2.9, para calcular este punto de corte de clasificación, la cual tiene en cuenta, tamaños de muestras diferentes para los casos tratados. En la Figura 2.6 se refleja una perspectiva gráfica para esta situación específica.

$$\bar{d}_c = \frac{n_1 \bar{d}_1 + n_2 \bar{d}_2}{n_1 + n_2} \quad [2.9]$$

El proceso de clasificación depende de las expresiones matemáticas descritas anteriormente, las cuales tienden a complejizarse en la medida que crece la cantidad de casos registrados, no siendo viable para el logro exitoso de los objetivos propuestos. Es por ello que en el Capítulo III de la presente investigación, se propone el desarrollo del proceso de clasificación mediante el uso del paquete estadístico SPSS (por sus siglas en inglés), el cual permitirá la obtención eficaz y eficiente de los resultados.

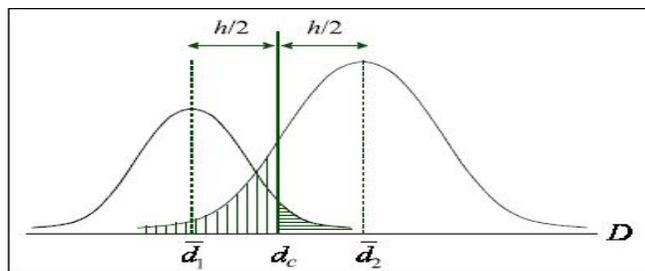


Figura 2.6: Utilización de un punto de corte equidistante de ambos centroides ($n_1 \neq n_2$).
Fuente: Obson [1992].

Estos resultados están acorde con las expresiones de cálculo planteadas y fundamentalmente la herramienta de clasificación desarrollada se resume en:

- La ecuación de discriminante.
- Variables predictivas incluidas en la ecuación discriminante.
- Clasificación de un nuevo problema de enrutamiento dado (caso).

Etapla II: Optimización en decisiones de enrutamiento

2.2.2 Optimización basada en métodos exactos

Luego de seleccionar el área de solución a la cual corresponde un problema de enrutamiento de vehículos determinado y acorde con su complejidad, es necesario seleccionar una técnica de optimización específica. Para esto hay que analizar las características de dicho problema con las consideraciones de aplicación de cada método, con el objetivo de hacer una selección más detallada que cumpla con los intereses del decisor.

Con el propósito de facilitar el proceso de toma de decisiones y específicamente la elección de la técnica de solución a emplear, se ofrece en la Tabla 2.4 un resumen de las técnicas más utilizadas, las cuales son objeto de revisión en la literatura especializada, con su descripción y consideraciones para su aplicación.

Es recomendable, en los casos que presenten condiciones de aplicación muy similares para más de un método de solución, desarrollar el proceso de optimización basado en los diferentes métodos exactos con los que tengan similitud, para poder determinar la mejoría en el costo computacional, ya que la solución óptima resultaría la misma.

Tabla 2.4: Descripción de los métodos exactos para la optimización de enrutamiento

METODOS EXACTOS	
<i>Descripción del Método</i>	<i>Consideraciones para su aplicación</i>
Programación Entera Mixta (PEM)	
<ul style="list-style-type: none"> • Las variables de decisión establecidas representan valores binarios relacionados con la inclusión o no de un determinado arco en la ruta de transportación • Se plantea una función de costo que permita visitar a todos los clientes • De manera general el modelo establece las restricciones descritas para el problema general 	<ul style="list-style-type: none"> • Linealidad en las funciones objetivo que se establecen, así como en las restricciones del modelo • Determinismo en las componentes del modelo: los costos y las cantidades a transportar no pueden tener un comportamiento probabilístico • Soluciona variantes estáticas del problema
Programación Dinámica	
<ul style="list-style-type: none"> • Permite resolver el problema mediante una secuencia de decisiones • Se establecen funciones recursivas que expresan a través de iteraciones la conformación de la ruta alcanzada hasta el momento • Se plantea una función de costo que permita visitar a todos los clientes • La recursividad incluye la valoración de las restricciones del modelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Cumplimiento del principio de optimalidad: cualquier subsecuencia de decisiones de una secuencia óptima que resuelve un problema también debe ser óptima respecto al subproblema que resuelve • Considera estrategias de rutas para un número fijo de vehículo • Su uso eficiente requiere una reducción sustancial del número de estados, esto puede realizarse por medio de un procedimiento de relajación (criterios de dominación)

Tabla 2.4: (Continuación)

METODOS EXACTOS	
<i>Descripción del Método</i>	<i>Consideraciones para su aplicación</i>
<i>Branch and Bound (Ramificación y Poda)</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Se plantean soluciones en forma de árbol de exploración, el algoritmo establece un recorrido por las ramas del mismo • El recorrido del espacio de soluciones se realizará verificando en qué ramificaciones de dicho árbol, las soluciones no mantienen su optimalidad, eliminando de ese modo las ramas del árbol (podar) 	<ul style="list-style-type: none"> • Los nodos que conforman el espacio de soluciones en árbol deben expresar las rutas que han sido procesadas hasta ese momento • El árbol de soluciones creado debe incluir tantos niveles como variantes de rutas posibles • Fijar una cota inferior: Permite crear una solución inicial • Fijar cota superior: variantes óptimas

Fuente: Elaboración propia.

2.2.3 Optimización basada en métodos aproximados

En este caso se debe realizar un análisis semejante al del epígrafe anterior, aunque para la elección de una técnica de optimización basada en métodos aproximados. En la Tabla 2.5 se detallan las técnicas más utilizadas en la literatura especializada con su descripción y consideraciones de aplicación. Esta información sirve de apoyo para el proceso de toma de decisiones relativo al enrutamiento.

Tabla 2.5: Descripción de los métodos aproximados para la optimización en el enrutamiento

METODOS APROXIMADOS	
METAHEURISTICOS	
<i>Descripción del Método</i>	<i>Consideraciones para su aplicación</i>
Algoritmo Genético	
<ul style="list-style-type: none"> • Generar una población de soluciones iniciales: Cada solución sería una configuración de rutas acorde con el problema general • Establecer operadores evolutivos: selección, cruzamiento y mutación • Establecer función <i>fitness</i>: la misma permite jerarquizar las soluciones de acuerdo con la calidad de estas, por lo general son la o las funciones objetivo ponderadas • Realizar generaciones hasta que se cumpla un determinado criterio de parada y escoger la mejor solución 	<ul style="list-style-type: none"> • Funciona de manera factible para problema no lineales • Requiere de la representación de las soluciones en cromosomas: en ocasiones estos cromosomas son expresados en cadenas binarias (0,1), lo cual representa la inclusión de un arco en la solución, o la secuencia de los clientes visitados • En dependencia de su modelación pueden resolver variantes complejas del VRP: ordenes dinámicas, enrutamiento con flotas no homogéneas, múltiples orígenes múltiples destinos

Tabla 2.5: (Continuación)

METAHEURISTICOS	
Descripción del Método	Consideraciones para su aplicación
Tabú Search (Búsqueda Tabú)	
<ul style="list-style-type: none"> • Se basa en un procedimiento iterativo de exploración inteligente y memoria adaptativa, guiada en el espacio de soluciones del problema a tratar. • A partir de una solución inicial, utiliza una estructura de vecindario local para derivar inteligentemente una solución cercana al óptimo. Sin embargo, a veces puede realizar movimientos en los que la solución obtenida es peor en busca del mínimo global 	<ul style="list-style-type: none"> • Definir estrategia de búsqueda en la vecindad, cambia de acuerdo al problema y en ocasiones resulta complejo su formulación • Con relativa frecuencia se estanca en óptimos locales
<i>Ant Colony System</i> (Sistema de Colonia de Hormigas)	
<ul style="list-style-type: none"> • El algoritmo lleva a cabo una búsqueda constructiva en paralelo y de manera probabilista, se establece además una estructura dinámica de memoria que contiene información de la calidad de las soluciones previas (Feromona) • Este proceso se realiza de manera iterativa hasta cumplir un determinado criterio de parada eligiendo finalmente la mejor solución alcanzada 	<ul style="list-style-type: none"> • Formularse una heurística para la construcción de las rutas, que debe quedar escrita en términos de poder ser evaluada, además debe incluir las complejidades de las variantes del problema: tiempos de ventana, tiempo de servicio en las entidades de los clientes entre otros • La feromona inicial en ocasiones se establece aleatoriamente, también puede emplearse la heurística del vecino más cercano • La heurística propuesta debe potencial de manera probabilística las mejores soluciones a lo largo de las iteraciones • En dependencia de su modelación pueden resolver variantes complejas del VRP: ordenes dinámicas, enrutamiento con flotas no homogéneas, múltiples orígenes múltiples destinos, enfoque multi-objetivo

Tabla 2.5: (Continuación)

MÉTODOS HEURISTICOS	
<i>Descripción del Método</i>	<i>Consideraciones para su Aplicación</i>
Método de Clarke y Wright (Ahorro)	
<ul style="list-style-type: none"> • Se basa en combinar sucesivamente <i>subtours</i> hasta obtener un ciclo hamiltoniano • Heurística constructiva, crea soluciones nuevas agregando componentes repetidamente a una solución vacía hasta que esta completa • El objetivo es minimizar la distancia total y el número de vehículos satisfaciendo la demanda 	<ul style="list-style-type: none"> • A partir de una solución inicial, utiliza una estructura de vecindario local para derivar inteligentemente una solución cercana al óptimo • No garantiza optimalidad en las soluciones que se obtienen • En la implementación del algoritmo se tiene que hacer una lista y actualizarla con combinaciones posibles
Vecino más cercano	
<ul style="list-style-type: none"> • Para construir soluciones se seleccionan aristas de bajo costo, pero al final del proceso quedan vértices cuya conexión obligará a introducir aristas de costo elevado • El procedimiento se basa en la miopía, ya que, en una iteración escoge la mejor opción disponible sin “ver” y esto puede obligar a realizar malas elecciones en iteraciones posteriores 	<ul style="list-style-type: none"> • Precisan de la definición de una métrica que ayude a comparar las distancias entre los distintos vértices. • Pueden ser programados en unas pocas líneas de códigos • La implementación será muy lenta sobre problemas de gran tamaño, es importante pensar en la eficiencia y velocidad de su código • Gozan de Simplicidad Conceptual: la clasificación de un nuevo espacio de representación se calcula en función de las clases, conocidas de antemano, de los puntos más próximos a él

Tabla 2.5: (Continuación)

MÉTODOS PRUEBA Y ERROR	
<i>Descripción del Método</i>	<i>Consideraciones para su Aplicación</i>
Tanteo	
<ul style="list-style-type: none"> • La reiteración de probar y probar un problema y la inteligencia de que cada ensayo fallado es una lección de la cual se aprende porque se analizan las causas del fallo • La reiteración de los ensayos se realizan sobre un mismo problema 	<ul style="list-style-type: none"> • Logra buenos resultados, si el problema es complejo, nunca llegará a un dominio total

Tabla 2.5: (Continuación)

MÉTODOS PRUEBA Y ERROR	
<i>Descripción del Método</i>	<i>Consideraciones para su Aplicación</i>
Simulación	
<ul style="list-style-type: none"> • Consiste en representar relaciones funcionales matemáticas a código de computadoras • Por lo general se establece escenarios de simulación para cada alternativa de solución • Un sistema contiene componentes y/o procesos que interactúan entre sí para el logro de al menos un objetivo común, definido explícita o implícitamente • Siempre debe realizarse un proceso de validación demostrando la similitud entre el modelo real y artificial 	<ul style="list-style-type: none"> • No será factible su uso en aquellos problemas donde exista un elevado número de alternativas de solución (requiere de mucha experimentación) • Es mucho más sencillo comprender y visualizar los métodos de simulación que los métodos puramente analíticos • Los modelos de simulación en una computadora son costosos y requieren mucho tiempo para desarrollarse y validarse • Los modelos de simulación no dan soluciones óptimas y puede dar al analista un falso sentido de seguridad • Permite encontrar soluciones a problemas matemáticos o de sistemas para los cuales no se conoce solución analítica • Facilita la solución de problemas de sistemas para los cuales su experimentación es costosa

Fuente: Elaboración propia

Es recomendable la utilización de más de un método de solución, siempre que exista relación entre las condiciones de aplicación del método y las características del problema, para luego compararlos según criterios establecidos en la etapa posterior. Esta comparación entre métodos aproximados se debe fundamentalmente a que este tipo de algoritmo no encuentra una solución óptima del problema y además tiene un basamento aleatorio en la generación de soluciones, por tanto, la solución hallada por uno de ellos no tiene por qué coincidir con la hallada por el otro, como tampoco los tiempos de cómputo empleados.

Etapa III: Post-optimización en las decisiones de enrutamiento de vehículos

2.2.3 Validación y control en el proceso de optimización

Para la validación y control en el proceso de optimización se plantea un análisis post-optimización referido al establecimiento de criterios que permitan constatar la adecuada selección del método de optimización. Esta etapa es aplicable en aquellos casos donde le sea posible al decisor aplicar más de una estrategia de solución para la optimización. Lo más pertinente sería siempre resolver el problema por ambos métodos, con la finalidad de

validar el resultado obtenido en la primera etapa del procedimiento, por lo general estos serán comparados de acuerdo con los criterios establecidos (ver Tabla 2.6).

Pudiera establecerse otros criterios en dependencia del tipo de problema; pero en esencia, aquellos que se establezcan deben permitir de manera cuantitativa y cualitativa la elección de una técnica de solución posterior a la optimización.

En el caso que se utilice un solo algoritmo para la optimización, se debe realizar un análisis de factibilidad referido al tiempo en que se toma la decisión con respecto al tiempo de corrida del algoritmo. Además, se debe tener en cuenta la calidad profesional del decisor, en cuanto a la comprensión de los resultados.

Tabla 2.6: Criterios para el análisis de post-optimización en el enrutamiento de vehículos

	CRITERIOS
ENTRE METODOS APROXIMADOS	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo cómputo • Calidad de la solución • Complejidad de la implementación
ENTRE METODOS EXACTOS	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo cómputo • Complejidad de la implementación
ENTRE METODOS EXACTOS Y METODOS APROXIMADOS	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo cómputo • Calidad de la solución • Complejidad de la implementación

Fuente: Elaboración propia.

Posterior a la implementación de la solución se pueden manifestar cambios de las variables en el tiempo. A estos cambios se le debe dar un seguimiento con el objetivo de realizar un proceso de reclasificación en caso de ser necesario. Esto conllevaría a introducir nuevamente la variabilidad manifestada en el clasificador y una vez obtenida la nueva clasificación, elegir dentro de la gama de métodos de solución la(s) herramienta(s) que permita la optimización.

2.3. Conclusiones Parciales

1. El procedimiento propuesto para asistir el proceso decisional relativo a la optimización en un problema de enrutamiento permite desarrollarlo de manera sencilla, estructurado y relativamente rápida, sustentado científicamente, facilitando la utilización pertinente de herramientas matemáticas para la solución de este tipo de problema.
2. La demostración matemática de la complejidad NP del problema de enrutamiento de vehículos, evidencia la necesidad de sustentar, por lo general, la solución de este problema en métodos aproximados, aunque a pesar de esto existen variantes de

pequeño y mediano tamaño que no necesariamente lo requieren.

3. El proceso de clasificación para las posibles áreas de solución (exacta y aproximada) en los problemas de enrutamiento, posibilita predecir qué grupo de herramientas pueden optimizar dicho problema, teniendo en cuenta las características del mismo.
4. Las herramientas exactas y aproximadas propuestas para la optimización, así como las condiciones de aplicación de las mismas, permiten desarrollar un proceso de selección efectivo de acuerdo con las características específicas de un problema de enrutamiento dado.
5. Los indicadores planteados para el análisis posterior a la optimización, conducen a la confirmación o replanteamiento de las herramientas seleccionadas para la solución de problemas de enrutamiento de vehículos.

CAPÍTULO III. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA OPTIMIZACIÓN DEL PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS PRESENTE EN EL PROCESO DE REPARACIONES DE AVERÍAS ELÉCTRICAS

3.1. Introducción

En el presente capítulo se aplican las etapas y pasos del procedimiento para asistir la toma de decisiones en el proceso de optimización relativo al problema de enrutamiento de vehículos descrito en el Capítulo II. Para su aplicación específicamente se utiliza el proceso de planificación de recorridos de reparación de averías eléctricas en el municipio de Santa Clara dirigidas por la UEB Despacho en la Empresa Organización Básica Eléctrica (OBE) de Villa Clara.

3.2. Caracterización de la Empresa Eléctrica de Villa Clara

La Empresa Organización Básica Eléctrica (OBE) de Villa Clara dirige la actividad eléctrica en la provincia de Villa Clara, controlando la distribución y suministro de la electricidad en cada uno de sus municipios, dirigida a los sectores residenciales, privados y estatales, llevando a cabo el mantenimiento y reparación de las líneas de transmisión, postes de alumbrado público, instalación de servicios a nuevos consumidores, además de efectuar el cobro del consumo eléctrico.

La Empresa Eléctrica de Villa Clara, con el propósito de lograr la satisfacción del cliente trabaja en el mejoramiento continuo del Sistema de Gestión para ofrecer de manera segura, estable y eficaz los servicios de generación distribuida, transmisión, distribución y comercialización de la electricidad. Cuenta para esto con un Sistema de Gestión Integrado acorde con los requisitos de las normas NC-ISO 9001:2001, NC-ISO 14001:2004 y NC 18001:2005: Calidad, Medio Ambiente, y Seguridad y Salud en el Trabajo respectivamente, que le garantiza a la dirección la gestión de todas las dependencias.

Este Sistema de Gestión asegura el cumplimiento de los requisitos, la legislación vigente aplicable y otras regulaciones, procedimientos o normas que se requieran para garantizar las gestiones de seguridad y salud en el trabajo, ambiental, y de calidad, así como la disminución de los riesgos laborales y de la contaminación ambiental.

A su vez este sistema propicia un ambiente de trabajo favorable a la promoción de la calidad en el seno de la organización al disponer de un personal altamente calificado y motivado, conocedor de sus obligaciones y responsabilidades individuales con respecto a la calidad del servicio, conservación del entorno, y la seguridad y salud en el trabajo.

Misión:

Generar, transmitir, distribuir y comercializar la energía eléctrica con eficiencia y de forma oportuna, para satisfacer a todos sus clientes, mediante el empleo de métodos y técnicas avanzadas, con un nivel de profesionalidad que garantice el éxito de los objetivos previstos.

Visión:

Brinda el servicio eléctrico para la plena satisfacción de todos sus clientes, combinando tecnología de punta con una fuerza de trabajo altamente profesional. Liderar en Cuba la calidad del servicio prestado a nuestros clientes al tener los menores índices de afectados, al ser lo mas rápidos y eficientes en atender nuestros reclamos, al brindar la mejor atención personalizada a nuestros clientes que garantice su bienestar y ser con nuestros esfuerzos los mejores.

En la Figura 3.1 aparece la estructura organizativa que presenta hoy día la UEB Despacho.

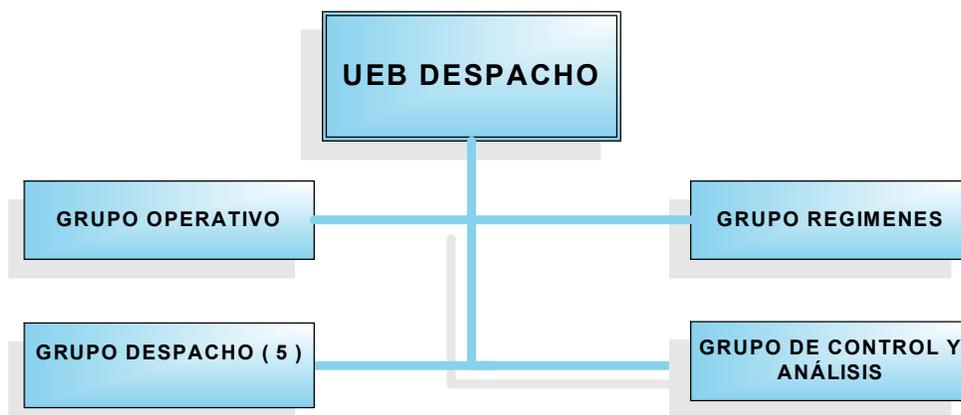


Figura 3.1: Estructura Organizativa de la Unidad Empresarial de Base Despacho.
Fuente: Consulta al expediente de perfeccionamiento de la UEB

3.3. Aplicación del procedimiento por etapas

Para la aplicación del procedimiento propuesto en el Capítulo II de la presente investigación, fue necesario una búsqueda minuciosa de casos de estudio, en los que se trataran las diferentes variables, características, complejidades y dinamismo de problemas de enrutamiento, así como la colaboración del personal de la UEB Despacho de la OBE de Villa Clara, encargada de la planificación y organización del proceso de reparación de averías eléctricas. Luego de planteado el proceso de reparaciones de averías eléctricas en la empresa mencionada, se procede a su clasificación utilizando la técnica estadística Análisis de Discriminante, con la cual se determina el área de solución a la que pertenece dicho problema y posteriormente se determina qué método es pertinente utilizar para la optimización, planteándose la formulación del mismo.

Etapas I: Pre-optimización en las decisiones de enrutamiento de vehículos.

3.3.1 Clasificación del problema

Implementación de la base de casos para problemas de enrutamiento de vehículos

Para la empresa se ha convertido en un verdadero reto la implementación de un procedimiento que les permita dar solución al problema de enrutamiento de vehículo presente en el proceso de planificación de recorridos para la reparación de averías eléctricas en la provincia de Villa Clara, debido fundamentalmente a la carencia de métodos o técnicas con un basamento científico, que respondan de manera rápida y eficaz ante cualquier cliente que requiera de su servicio, y a cuan complejo pueda llegar a resultar la ejecución del mismo por las condiciones propias del problema.

El objeto de estudio lo conforma un día de comportamiento promedio en la planificación de recorridos para la reparación de averías eléctricas en el municipio de Santa Clara. En el momento de tomar la decisión del recorrido que deberían seguir los tres vehículos disponibles este día, existía un cúmulo de 56 averías eléctricas. En el Anexo 10 aparece una síntesis de la matriz de distancia relativa entre las averías, para esto se consideró que dichas distancia fueran simétricas, es decir, se hace despreciable incrementos de distancias por cuestiones de reglas del tránsito en cuanto al sentido de las calles, desvíos, entre otros. En el anexo anteriormente mencionado aparecen identificados los tipos de averías, las cuales pueden ser: primarias, secundarias y de servicio (detallas de acuerdo a su complejidad en el Capítulo I de la presente investigación).

Para resumir las características del problema antes mencionado se utiliza la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Resumen de variables que intervienen en el caso de estudio

VARIABLES DEL CASO DE ESTUDIO: Reparaciones de Averías Eléctricas
<ul style="list-style-type: none">• Cantidad de Nodos: 56• Ámbito Temporal: Sin Restricciones Temporales• Cantidad de Vehículos: 3• Capacidad de los Vehículos: Homogénea• Cantidad de objetivos: Mono-Objetivo• Demanda: Determinística• Ordenes: Dinámicas

Fuente: Elaboración propia.

Formulación matemática resumida del problema objeto de estudio

Tal y como fue mostrado en la Tabla 3.1 el problema objeto de estudio presenta un grupo de características, las cuales serán expresadas en la formulación matemática que aparece a continuación. Para una mejor comprensión de las funciones que aparecen en esta formulación resulta necesario precisar los aspectos siguientes:

- 1) El problema presenta un grafo de 56 nodos, los cuales generan 112 variables de decisión.
- 2) Para la planificación de ese día se contaba con tres (3) vehículos. Restricción (1)
- 3) Para todos los nodos (i) que no sean el nodo despacho debe cumplirse que, debe partir del mismo uno y solo un arco. Restricción (2)
- 4) Para todos los nodos (j) que no sean el nodo despacho debe cumplirse que, debe incidir sobre el mismo uno y solo un arco. Restricción (3)
- 5) Existen tres tipos de avería eléctricas: Primarias, secundarias y de servicio, estas averías tienen un nivel de prioridad en el momento de la reparación, dicho nivel se establece en el orden en que fueron mencionadas. Por tales motivos resulta obligatorio forzar el modelo a través de las variables de decisión a que sean visitados aquellos nodos identificados como averías primarias y secundarias. Como se puede apreciar en la restricción (4) se obliga al modelo a que, partiendo del despacho, se visiten primeramente los nodos que fueron identificados como averías primarias y secundarias.
- 6) La restricción número (5) posibilita la ruptura de subcircuitos, para ello hay que establecer una restricción para cada subcircuito de "W" nodos. En caso de que $W = 3$ la suma de las variables de decisión que forman sus arcos tiene que ser menor o igual a dos. De esta forma el subcircuito compuesto por tres arcos solamente aportará dos al camino.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=D}^{56} \sum_{j=D}^{56} \text{Dist}_{ij} \cdot X_{ij} \quad X_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{el arco (i, j) no está en el camino} \\ 1 & \text{el arco (i, j) está en el camino} \end{cases}$$

sujeto a:

$$(1) \sum_{i=D}^{56} \sum_{j=D}^{56} X_{ij} = m \quad m : \text{Representa la cantidad de vehículos existentes (} m = 3 \text{)}$$

$$(2) \sum_{i=D}^{56} \sum_{j=D}^{56} X_{ij} = 1 \quad \forall i \notin D$$

$$(3) \sum_{i=D}^{56} \sum_{j=D}^{56} X_{ij} = 1 \quad \forall j \notin D$$

$$(4) X_{Dj} = 1 \quad \forall j \text{ identificado como avería primaria o secundaria}$$

$$(5) \sum_{i \in W} \sum_{j \in W} X_{ij} \leq |W| - 1 \quad \text{Ruptura de subcircuitos en el grafo}$$

Planteamiento de la herramienta de solución

En este paso, como fue planteado en el capítulo anterior y con vista a obtener de manera factible las soluciones de clasificación, resulta necesario implementar en el paquete estadístico SPSS, la base de casos que aparece en el Anexo 9, y la Tabla 3.1 que incluye las características del caso a resolver, obteniéndose los resultados que se muestran a continuación en las Tablas 3.2 y 3.3.

Tabla 3.2: Resumen del procesamiento y análisis de casos

Analysis Case Processing Summary			N	Percent
Unweighted Cases				
Valid			121	99.2
Excluded	Missing or out-of-range group codes		1	.8
	At least one missing discriminating variable		0	.0
	Both missing or out-of-range group codes and at least one missing discriminating variable		0	.0
	Total		1	.8
Total			122	100.0

Fuente: Uso del SPSS.

Tabla 3.3: Variables significativas para la ecuación discriminante

Step	Entered	Variables Entered/Removed ^{a,b,c,d}							
		Wilks' Lambda						Exact F	
		Statistic	df1	df2	df3	Statistic	df1	df2	Sig.
1	Ambito	.918	1	1	119.000	10.574	1	119.000	.001
2	Capacidad	.893	2	1	119.000	7.035	2	118.000	.001
3	Nodos	.877	3	1	119.000	5.482	3	117.000	.001

Fuente: Uso del SPSS.

La tabla anterior ofrece los resultados necesarios para comprobar que solo tres de las variables definidas por el criterio de los expertos quedan validadas estadísticamente, ya que las otras tres variables después de ser procesada por el software utilizado, resultaron poco significativas para el logro de la clasificación.

Como se ha comprobado el empleo de esta herramienta es de vital importancia, entre otras cosas, para aquellos casos en los que no se cuente con altos niveles de información (valores perdidos), y de igual manera se necesite establecer definitivamente las variables involucradas.

A continuación se muestra en la Tabla 3.4 obtenida del SPSS, la función discriminante para la corrida de casos.

Tabla 3.4: Coeficientes estandarizados de la ecuación discriminante

Standardized Canonical Discriminant Function Coefficients	
	Function
	1
Nodos	.402
Ambito	.658
Capacidad	.420

Fuente: Uso del SPSS.

Después del análisis de la salida del software implementado como bien se evidencia en el Anexo 11, se determinó precisamente, que el área de solución para la información correspondiente al problema de enrutamiento de vehículos, era la exacta. Por tales motivos se propone en la etapa siguiente, la selección y propuesta de una herramienta de esta área de solución.

Etapa II: Optimización en el enrutamiento de vehículos

De acuerdo con las características del problema de enrutamiento de vehículos resumidas en la Tabla 3.1, se decide elegir una técnica de solución exacta, teniendo en cuenta que existen relaciones funcionales lineales y que resulta viable la implementación, se selecciona la técnica *Branch and Bound*. Estas condiciones no excluyen a las otras técnicas que fueron presentadas en el capítulo anterior, pudiéndose aplicar otra de las planteadas. La técnica *Branch and Bound* ha sido utilizada en reiteradas ocasiones para la solución del agente viajero, Kolen et al. [1987], en la literatura especializada existen varios ejemplo de implementación de esta técnica. Por tales motivos en el presente capítulo se reportan los resultados alcanzados para el problema objeto de estudio (ver Tabla 3.5).

La aplicación de esta estrategia exacta parte de una configuración de cada vehículo para un grupo de nodos. Esta asignación fue realizada mediante una heurística del barrido (*sweep*). La heurística del barrido posibilitará asociar de manera lógica un conjunto de nodos a cada uno de los tres vehículos disponibles.

Con el propósito de comprobar los resultados obtenidos en la aplicación de la primera etapa se proponen métodos de solución de naturaleza aproximada, en este caso la metaheurística Sistema de Colonia de Hormigas (ACS) y la heurística del vecino más cercano (HVMC), este último resume la estrategia actual seguida por la empresa. Para las tres técnicas se parte de la solución alcanzada por una heurística inicial del barrido. De esta forma será posible realizar comparaciones en condiciones homogéneas, de manera que se pueda

comprobar que método tendrá mejor desempeño en la búsqueda de la mejor secuencia de nodos para cada vehículo.

Al igual que la técnica *Branch and Bound*, la HVMC ha sido reportada en un sinnúmero de investigaciones, Arbelaitz Gallego [2002], es por ello que de igual forma se presentan simplemente sus indicadores de desempeño. No siendo el caso de ACS, metaheurística de complejidad inminente. Por tal motivo en el epígrafe siguiente se presenta de manera detallada los pasos a seguir en forma de pseudocódigo, así como expresiones de cálculo necesarias en la construcción de las soluciones.

3.3.2 Optimización basada en métodos aproximados. Barrido y ACS

La heurística del Barrido (*sweep*) posibilita realizar una asignación de un grupo de nodos a cada uno de los vehículos disponibles. Por lo general se establece una regla la cual debe ser lógica y funcionalmente evaluada, esto se traduce en que debe existir una función que pueda ser numéricamente evaluada y que logre finalmente una asignación factible. En el caso del objeto de estudio se establece realizar la asignación de acuerdo a los tiempos de reparación empleado en cada una de las averías. Esto posibilita realizar un reparto similar en cuanto al tiempo de trabajo durante la jornada laboral de los vehículos. A partir de este criterio se realiza una segmentación más acertada, ya que esta solución se pudiera afectar segmentando simplemente de acuerdo al total de nodos, e incluso los tiempos de trabajo para cada vehículo llegarían a ser extremadamente desiguales. En el Pseudocódigo 1 aparecen descritos los pasos a examinar con vista a realizar la asignación de cada vehículo para grupos de nodos de acuerdo a los tiempos que impliquen su reparación (ver la implementación en el Anexo 12).

Pseudocódigo 1: Procedimiento para la heurística inicial del barrido (*Sweep*)

Paso 1: Iniciación

- Ordenar las averías de manera creciente de acuerdo a un ángulo θ
- Si dos averías tienen igual θ decidir por menor coordenada polar ρ

Paso 2: Selección

- Si todos los clientes pertenecen al mismo cluster C_k ir al Paso 3, si no:
Si cada avería A_i cumple con la disponibilidad de tiempo: $C_k := C_k \cup \{A_k\}$; si no:
Hacer $k := k + 1$ y crear un nuevo cluster con $C_k := \{A_k\}$

Paso 3: Optimización

- Para cada C_k resolver el TSP formado

Fuente: *Elaboración propia.*

El algoritmo de Sistema de Colonia de Hormigas para dar solución al problema de enrutamiento de vehículos, está inspirado según Gambardella & Dorigo [1997], en el comportamiento real de las hormigas, las cuales siempre encuentran el camino más corto entre el lugar donde habitan y las fuentes de comida, debido al intercambio indirecto de información a través de la deposición de feromona.

Este algoritmo lleva a cabo una búsqueda constructiva en paralelo y de manera probabilista, que es realizada por agentes artificiales (Colonia de hormigas), que se mueven partiendo de un depósito central, a través de los estados del problema de manera iterativa hasta que todos los nodos del problema hayan sido visitados, aplicando repetidamente mecanismos de explotación y exploración, con dos niveles de deseabilidad que indican que tan deseable es ir de un lugar a otro y considerando además el nivel de feromona que indica que tan proficiente ha sido en el pasado un movimiento.

El método propuesto se define partiendo primeramente del establecimiento del parámetro q_0 , que determina la importancia relativa de la explotación vs exploración. Seguidamente se genera un número aleatorio q de manera que si es menor o igual a q_0 como bien se muestra en la ecuación 3.1, se escoge el mejor arco de acuerdo con la expresión de explotación, de lo contrario se escoge la exploración tal y como se representa en la ecuación 3.2.

$$EXPT = \left\{ \begin{array}{ll} \arg \max \{ \tau(i, j) \cdot [\eta(i, j)]^\beta \} & \text{si } q \leq q_0 \\ EXPT & \text{dlc} \end{array} \right\} \quad [3.1]$$

$$EXPR = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{\tau(i, j) \cdot [\eta(i, j)]^\beta}{\sum_{j \in J_k(i)} \tau(i, j) \cdot [\eta(i, j)]^\beta} & \text{si } EXPR \in J_k(i) \\ 0 & \text{dlc} \end{array} \right\} \quad [3.2]$$

donde:

EXPT : Elección de un arco (i, j) mediante la explotación (ver expresión 3.1).

EXPR : Elección de un arco (i, j) mediante la exploración (ver expresión 3.2).

τ : Valor de la feromona en el arco (i, j) .

η : Valor de heurística hasta nodo " j " en el arco (i, j) , (ver Pseudocódigo 2), referido al objetivo de mínimo recorrido.

β : Parámetro que determina la importancia relativa de la feromona vs. el tiempo.

q : Número aleatorio entre $[0,1]$.

q_0 : Parámetro entre $[0,1]$ que determina la importancia relativa de la explotación vs. exploración.

i : Orígenes.

j : Destinos.

$J_k(i)$: Conjunto de nodos que le falta visitar a la hormiga k posicionada en el nodo " i ".

Como fue descrito en la Tabla 2.5, en ocasiones la feromona inicial (valor probabilístico) puede ser generada de forma aleatoria entre [0; 1] o mediante la heurística del vecino más cercano. En esta investigación se plantea dicha feromona inicial de acuerdo con la última variante expresada anteriormente (ver expresión 3.3).

$$\tau_0 = \frac{1}{L_0} \quad [3.3]$$

donde:

τ_0 : Valor de feromona inicial.

L_0 : Valor total de recorrido a través de la heurística del vecino más cercano (ver Pseudocódigo 2).

A continuación se representan los Pseudocódigo 2 y 3, los cuales especifican el procedimiento general empleado por las hormigas, y el procedimiento empleado para la construcción de nuevas soluciones respectivamente.

Pseudocódigo 2: Procedimiento General del Sistema Colonia de Hormigas

1. Fase de inicialización

- Inicializar parámetros del Sistema de Colonia de Hormigas y del problema.
- Obtener una solución inicial ψ^{nn} con la heurística del Vecino más Cercano.
 - $\psi^{gb} \leftarrow \psi^{nn}$, donde ψ^{gb} , es la mejor solución global
 - $L_{gb} \leftarrow$ Longitud total de la ruta perteneciente a la mejor solución. Inicialmente es L_{nn}
- Inicializar el nivel de feromona
 - Para cada par de nodos (i, j) :
 - $\tau(i, j) = \tau_0$, donde, $\tau_0 = (n \cdot L_{nn})^{-1}$

2. Ciclo realizado por cada hormiga k

Do Until Criterio de parada = *True*

For each Hormiga k

- Construir una solución empleando ψ^k (nueva-hormiga-activa). $\forall j \notin \psi^k$

If $L_k \leq L_{gb}$ *Then*

$$L_{gb} = L_k : \psi^{gb} = \psi^k$$

End if

End for

Loop

3. Actualización

- Realizar actualización global de la feromona

$$\tau(i, j) = (1 - \alpha) \cdot \tau(i, j) + \alpha / L_{gb} \quad \forall i, j \in \psi^{gb}$$

α : Nivel de evaporación global de la feromona.

ψ^{gb} : Mejor recorrido.

Fuente: Elaboración propia basada Dorigo & Stützle [2004] y Zabala [2005].

Pseudocódigo 3: Procedimiento de Nueva Hormiga Activa

1. Inicialización

- Ubique la hormiga k en el despacho:
- Inicialice Tiempo - actual $_k \leftarrow 0$

2. Ciclo para que cada hormiga construya su recorrido.

Para la hormiga k ubicada en el nodo i (inicia en el despacho), se determina el conjunto N_i^k de nodos. Si el nodo i no es el despacho, incluirlo en el conjunto.

For each $i \notin N_i^k$

- Calcule el nivel de deseabilidad para ambos objetivos de la siguiente manera:

$$Dist_{ij} = \text{Máx}(1, \text{Re corrido}_{ij})$$

$$\eta_{ij} = \frac{1}{Dist_{ij}} \cdot \frac{TR_j}{TTD} \cdot IIA_j$$

TR_j : Tiempo de reparación en el nodo j en dependencia del tipo de avería.

$$TR_j = \begin{cases} U(45,60) & \text{si "j" es una avería primaria} \\ U(25,35) & \text{si "j" es una avería secundaria} \\ U(10,20) & \text{si "j" es una avería de servicio} \end{cases}$$

- Seleccione probabilísticamente el siguiente nodo a visitar j empleando η_{ij} de acuerdo con los mecanismos de explotación y exploración. Ecuación 3.1 y 3.2
- Actualice la ruta: $\psi^k \leftarrow \psi^k + \langle j \rangle$
- Acumule recorrido: $L_k \leftarrow L_k + \text{Re corrido}_{ij}$
- Actualice localmente la feromona empleando la siguiente ecuación.
 $\tau(i, j) \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau(i, j) + \rho \cdot \tau_0$

End for

ρ : Nivel de evaporación local de la feromona.

Fuente: Elaboración propia basada Dorigo & Stützle [2004] y Zabala [2005].

El Sistema de Colonia de Hormigas finaliza cuando se ha cumplido un tiempo especificado de ejecución del algoritmo, o cuando no se ha encontrado una disminución a la mejor solución luego de un número especificado de iteraciones.

Los pseudocódigos propuestos fueron implementados en el *java 1.5*, este lenguaje multiplataforma puede trabajar sobre cualquier sistema operativo. En el mismo pueden ser diseñadas interfaces que resulten amigables para cualquier usuario (ver Anexo 13). Por cuestiones de tiempo en esta investigación no fue posible realizar interfaces para los usuarios, simplemente la implementación imprime los resultados en texto plano. Resulta válido aclarar que lo antes mencionado no invalida para nada los resultados, pero sería conveniente la realización de un producto informático más acabado con vista a mejorar la aceptación y presentación de dicha implementación. En el Anexo 14 aparecen las sintaxis

de las principales clases de la implementación, por otra parte en el Anexo 15 aparece la impresión de los resultados de la implementación.

Los resultados indican la asignación que tiene cada vehículo, mostrando el tiempo total de trabajo que presenta cada uno de ellos, además se muestra la secuencia o recorrido que realiza cada vehículo obteniéndose finalmente el valor total de recorrido, el cual consiste en la suma del recorrido de los vehículos.

Finalmente en el Anexo 16 aparecen las secuencias de recorrido para cada vehículo dada por la solución exacta *Branch and Bound*. Esta técnica exacta parte de la asignación de cada vehículo dada por la heurística del barrido. Es decir, la técnica solo optimiza la secuencia del recorrido para los nodos que le fueron asignados a cada vehículo.

Etapa III: Post-optimización en las decisiones de enrutamiento de vehículos

3.3.3 Validación y control en el proceso de optimización de enrutamiento de vehículos

Tal y como fue planteado en el Capítulo 2 de la presente investigación, esta etapa permite validar si lo planteado en la primera etapa de procedimiento (clasificación) resulta consistente con los indicadores de desempeño que presentará cada algoritmo de solución. La aplicación de la primera etapa del procedimiento evidenció que lo más conveniente era solucionar el problema objeto de estudio a través un método exacto. Por tales motivos la aplicación de la segunda etapa planteó la técnica *Branch and Bound* como técnica de solución, pero sin embargo se planteó además la metaheurística ACS y HVMC. Estos dos últimos métodos fueron formulados e implementados computacionalmente con la finalidad de realizar una comparación entre todos respectivamente. Dicha comparación revelará en amplio sentido cuantitativo si verdaderamente el proceso de clasificación es efectivo.

En la Tabla 3.5 se muestra la calidad de las soluciones (valores de la función objetivo para 10 corridas) para los tres algoritmos planteados. Los tres algoritmos parten de la asignación que realiza la heurística del barrido, esto posibilita condiciones de homogeneidad en las comparaciones estadísticas que serán realizadas posteriormente.

Con respecto a los tiempos de cómputo (tiempo que demora el ordenador en obtener la solución para cada corrida) cabe resaltar que no será necesario reportar sus resultados, ya que existirán diferencias significativas evidentes, esto se debe a que en el caso de ACS y HVMC los tiempo de cómputo promedian en el orden de los milisegundos y para el caso de la técnica *Branch and Bound* los tiempos promedios reportados estuvieron por encima de los 20 minutos. A partir de lo anterior se demuestra una vez más que las soluciones exactas son significativamente más costosas que las aproximadas. Sin embargo los despachadores de la empresa deberán decidir si realmente el tiempo promedio de cómputo reportado por la

técnica exacta será no factible en la toma de decisiones. Es decir, quizás la mejor opción para la empresa será sacrificar calidad en las soluciones encontrándolas en tiempos ínfimos. En la tabla 3.5 se aprecia que la calidad de las soluciones en *Branch and Bound* y en HVMC son iguales para cualquier corrida, para el caso de *Branch and Bound* la solución será la misma ya que es una técnica exacta. La HVMC siempre partirá del mismo nodo origen (Despacho), por ello siempre dará el mismo resultado.

Tabla 3.5: Calidad para ACS, HVMC y *Branch and Bound* en 10 corridas

Corridas	ACS	<i>Branch and Bound</i>	HVMC
1	154	143	271
2	175	143	271
3	171	143	271
4	171	143	271
5	154	143	271
6	175	143	271
7	154	143	271
8	186	143	271
9	171	143	271
10	186	143	271
Promedio	169.7	143	271

Fuente: Elaboración Propia.

Con el objetivo de validar el proceso de clasificación y comprobar finalmente cual de los algoritmos muestra mejor desempeño de acuerdo con la calidad de las soluciones se plantea el análisis estadístico mostrado en el Cuadro 1. A partir de este análisis se puede inferir que existen diferencias significativas en cuanto a calidad de la solución reportada por los algoritmos (ver *Asymp. Sig* en la prueba de *Friedman*). De igual forma se puede inferir que el algoritmo de mayor calidad en las soluciones en el *Branch and Bound*, siguiéndole ACS y HVMC en el orden en que fueron mencionados.

Finalmente se puede constatar que existe consistencia entre el resultado planteado por el proceso de clasificación y la presente etapa de validación. Las mejor solución para el recorrido de los vehículos fue reportada por la técnica *Branch and Bound*, aunque el tiempo de cómputo de la misma fue significativamente mayor que el de los otros algoritmos. El Despacho actualmente realiza una asignación imprecisa de los vehículos disponibles, además se puede apreciar que la forma actual en que sustenta la planificación de recorridos (HVMC) resultó ser la de peor resultado en cuanto a calidad.

Test Statistics ^a	
N	10
Chi-Square	20.000
df	2
Asymp. Sig.	.000
a. Friedman Test	

Ranks	
	Mean Rank
Calidad de las soluciones mediante el uso combinado de la heurística del barrido y sistema de colonias de hormigas	2.00
Calidad de la solución de la técnica exacta Branch and bound	1.00
Calidad de las soluciones con la heurística del vecino más cercano partiendo de la solución del barrido	3.00

Cuadro 1: Análisis estadístico comparativo para los tres algoritmos planteados
Fuente: Elaboración Propia con el uso del SPSS 13.

3.4. Conclusiones Parciales

1. La creación de la base de casos para la clasificación de la herramienta de solución condujo a la revisión de 121 investigaciones realizadas en el campo de la optimización relativa al enrutamiento de vehículos.
2. La aplicación experimental del procedimiento permitió ubicar la solución del problema presente en el proceso de planificación de recorridos para la reparación de averías eléctricas, en el área de los métodos exactos, evidenciándose las características de complejidad de dicho problema.
3. Con la aplicación del procedimiento se pudo seleccionar algoritmos pertinentes para la optimización del problema objeto de estudio, resultando como el más apropiado de acuerdo a la calidad de las soluciones el algoritmo *Branch and Bound*.
4. El algoritmo ACS reporta mejor solución de recorrido que la HVMC, quedando demostrado que el proceder actual del despacho en lo que respecta a la planificación de recorridos es impreciso e ineficiente.

CONCLUSIONES GENERALES

1. El estudio bibliográfico realizado para la construcción del marco teórico-referencial de la investigación, reveló la no existencia de un procedimiento que abordara las tres etapas propuestas (pre-optimización, optimización y post-optimización) en el proceso de optimización referido al enrutamiento de vehículos. La mayoría de los procedimientos de optimización de enrutamiento se enfocan al fenómeno de la optimización concreta sin tenerse en cuenta características y variables relevantes que posibiliten asociar la complejidad de problema con los métodos de solución.
2. Como resultado de esta investigación, se encontró en la literatura especializada que para dar solución a problemas de optimización referente al enrutamiento de vehículos pueden emplearse métodos de solución, aproximados y/o exactos.
3. El análisis de clasificación relativo a identificar el área de solución, exacta o aproximada, para un problema de enrutamiento dado, representa un aporte esencial para elevar la efectividad en el proceso de toma de decisiones referido a la optimización del enrutamiento de vehículos.
4. El algoritmo de solución implementado para dar solución al problema referido al enrutamiento de vehículos cumple con los intereses del decisor y las características del objeto de estudio. La empresa deberá establecer relaciones de compromiso que le permitan la elección de una estrategia de solución teniendo en cuenta los indicadores de desempeño reportados por los algoritmos.
5. Las OBEs del territorio nacional, se beneficiarán con un procedimiento sólido dirigido a la solución del proceder empírico, impreciso e ineficiente en el proceso de toma de decisiones relativo al enrutamiento de vehículos en el momento de la reparación de averías eléctricas.

RECOMENDACIONES

1. Realizar la implementación computacional de la técnica de solución propuesta teniendo en cuenta la inserción de la característica órdenes dinámicas (surgimiento de una avería imprevista).
2. Realizar la implementación computacional del método Búsqueda Local para obtener partiendo de la solución inicial del problema la mejora progresiva del mismo.
3. Hacer extensiva la aplicación del procedimiento en la Organización Básica Eléctrica de las diferentes provincias.
4. Desarrollar cursos de capacitación en la UEB Despacho de Santa Clara, con el fin de comprender el procedimiento propuesto debido a su inminente complejidad y así asistir a la toma de decisiones relativo al proceso de reparación de averías eléctricas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abreu León, R. (2004). Modelo y procedimiento para la toma de decisiones de inversión sobre el equipamiento productivo en empresas manufactureras cubanas. (Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara).
2. Acevedo Suárez, J.A., Urquiaga Rodríguez, A.J. & Gómez Acosta, M. (2001). Gestión de la cadena de suministro. Centro de Estudio Tecnología de Avanzada (CETA) y Laboratorio de Logística y Gestión de la Producción (LOGESPRO). Ciudad de la Habana.
3. Ahuja, R.K., Ergu, Ö., Orlin, J.B. & Punnen, A.P. (1999). Estudio de técnicas de búsqueda por vecindad a muy gran escala. Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Universidad de Florida.
4. Alba, E. & Dorronsoro, B. (2006). Computing nine new best-so-far solutions for Capacitated VRP with a cellular Genetic Algorithm. Information Processing Letters. Vol. 98. Pages 225-230.
5. Alfonso, E. et al. (2008). Enrutamiento de Vehículos Mediante Técnicas Heurísticas y Programación Matemática. XIV Latín Ibero-American Congress on Operations Research. CLAIO. Submission 427.
6. Alvarenga, G. & Mateus, G. (2005). A hybrid approach for the dynamic vehicle routing problem with time windows. Fifth International Conference on Hybrid Intelligent Systems, 2005. HIS Vol. 2005.
7. Anaya Tejero, J (2000). Logística integral: la gestión operativa de la empresa.
8. Anthony, R. N. (1965): Planning and Control Systems: A Framework for Analysis, Harvard Business School.
9. Arbelaitz Gallego, O. (2002). Soluciones basadas en Simulated Annealing para el VRPTW. Arquitectura y Tecnología de Computadoras, País Vasco.
10. Arbelaitz Gallego, O. & Rodríguez, C. et al. (2000). Análisis de la eficiencia de una solución paralela al problema VRPTW.
11. Arbonés M.E. (1999). La logística empresarial. Editorial Marcombo. Barcelona.
12. Ausiello, G., E. Feuerstein, et al. (2001). Algorithms for the on-line travelling salesman. Algorithmica, 29(4): 560–581.

13. Aynos Ambite, A. & Hernández, L-P. (2008). El problema del Comercio: análisis teórico y estrategias de resolución. Universidad Carlos III de Madrid.
14. Ballou, H.R. (1991). La logística empresarial, Control y Planificación. Madrid: Ediciones Díaz Santos.
15. Ballou, H.R. (2004). Logística. Administración de la cadena de suministros. Prentice Hall. México.
16. Bansal, N., A. Blum, et al. (2004). Approximation algorithms for deadline-tsp and vehicle routing with time windows.
17. Bard, J.F., Kontoravdis, G. & Yu, G.A. (2002). A branch-and-cut procedure for the vehicle routing problem with time windows. *Transportation Science*. No 36. Pages 250–269.
18. Barbarosoglu, G. and D. Ozgur (1999). A tabu search algorithm for the vehicle routing problem. *Computers and operations research* 26: 255-270.
19. Beamon, B. (1998). M. Supply Chain Design and Analysis: Models and Methods. *International Journal of Production Economics*. Vol. 55. No. 3. Pages 281-294.
20. Beham, A. (2007). Parallel Tabu Search and the Multiobjective Vehicle Routing Problem with Time Windows. *IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium. IPDPS 2007*. Pages 1-8.
21. Benavente, M. and J. Bustos (2001). Estado del Arte en el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP). En http://www.lia.dis.ufro.cl/~jbustos/formatos_docs/ejemplo%20Paper.doc
22. Blanchard C., Blanchard G. (1998). La encuesta de viajes domésticos método estándar. CERTU.
23. Blanco, A., Pelta, D. A. & Verdegay, J.L. (2003). FANS: una Heurística basada en Conjuntos Difusos para problemas de Optimización. *Inteligencia Artificial*. No. 19. Vol. 2. Págs. 103-122.
24. Bodin, L., B. Golden, et al. (1983). Routing and scheduling of vehicles and crews. *The State of the Art, Computers and Operations Research*. 10: 63 - 211.
25. Boudia, M. et al. (2007). A reactive GRASP and path relinking for a combined production-distribution problem. *Computers & Operations Research*. Vol. 34. No 11. Pages 3402-3419.

26. Bowersox, D. & Close, D. (1996). *Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process*. Mc Graw Hill.
27. Caballero Fernández R. & Fernández de Córdoba P. et al. (2002). Problemas de rutas en caminos forestales considerando múltiples criterios.
28. Campbell, A. & Savelsberg, M. (2003). Efficient Insertion Heuristics for Vehicle Routing and Scheduling Problems. *Transportation Science* No 38. Vol. 3. Pages 369-378.
29. Campos, C., Martínez, F.J., Melián, B., Moreno, J.A., Moreno, J.M. & Brito, J. (2007). Scatter Search para la planificación logística en fases. Primer Congreso de Logística y Gestión de la Cadena de Suministro Zaragoza.
30. Cespón Castro, R. & Amador Orellana (2003). *Administración de la cadena de suministros. Manual para estudiantes de la especialidad de Ingeniería Industrial*. Universidad Tecnológica Centroamericana de Honduras. UNITEC. Tegucigalpa.
31. Cespón Castro, R. & Auxiliadora, M. (2003). *Administración de la cadena de suministros. Manual para estudiantes de la especialidad de Ingeniería Industrial*. Universidad Tecnológica Centroamericana de Honduras. UNITEC. Tegucigalpa.
32. Charikar, M., S. Khuller, et al. (1998). Algorithms for capacitated vehicle routing. En <http://www.informatik.uni-trier.de/.../Charikar:Moses.html>
33. Chen, B. et al. (2007). A Multi-Ant Colony System for Vehicle Routing Problem with Time-Dependent Travel Times. *IEEE International Conference on Automation and Logistics*. Pages 446-449.
34. Chen, P. et al. (2007). An Ant Colony System Based Heuristic Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup. *2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. ICIEA 2007*. Pages 136-141.
35. Chiang, W. and R. Russell (1993). *Simulated Annealing Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows*, Working Paper, Department of Quantitative Methods, University of Tulsa, Tulsa, OK 74104.
36. Christiansen, C. H., R. W. Eglese, et al. (2008). A Branch-and-Cut-and-Price algorithm for the Multi-Depot Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands.
37. Christopher, M. (1972). Logistics in its Marketing Context. *European Journal of Marketing*, Vol. 6. No. 2.
38. Clarkston (2000). *Supply Chain Management Primer*. En <http://www.clarkstongroup.com>.

39. Collazo Pérez, A. (1995). Documentos sobre la Sociedad Cubana de Logística. Ciudad de La Habana.
40. Colmenares Perdomo, D. (2002). Implementación de una heurística para el problema de planeación de rutas con ventanas de tiempo en sistemas de distribución. Bogotá.
41. Comas Pullés, R. (1998). Cuba Globalización y Logística. Revista Logística Aplicada No. 4.
42. Conejero González, H.C. & Hernández Ávila, N. (2003). Gestión de la distribución. Conferencias para curso de postgrado del Diplomado Logística Comercial, para los directivos de ITH de la Casa Matriz. Ciudad de La Habana (sin publicar).
43. Cook, W. and J. L. Rich (1999). A parallel cutting-plane algorithm for the vehicle routing problem with time windows. Computational and Applied Mathematics, Rice.
44. Corominas, A. (1991). Localización y Distribución en Planta. Universidad de Cataluña. España. Págs. 3 -10.
45. Corona, J.A. (2005). Hiperheurísticas a través de programación genética para la resolución de problemas de ruteo de vehículos. Tecnológico de Monterrey. ed. Monterrey, México.
46. Coy Calixto, C.A. (2005). Implementación en hidroinformática de un método de optimización matemática basado en Colonia de Hormigas. (Trabajo de Grado Presentado como requisito parcial para la obtención del título de Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C.).
47. Cruz Chávez, M. A. and O. Díaz Parra (2009). Un Mecanismo de Vecindad con Búsqueda Local y Algoritmo Genético para el Problema de Transporte con Ventanas de Tiempo Programación Matemática y Software 1(1): 20.
48. CSCMP (2005). Supply Chain and Logistics Terms and Glossary. Council of Supply Chain Management Professional. En <http://www.cscmp.org/Downloads/Resources/glossary03.pdf>
49. Csiszár, S. (2007). Two-Phase Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. Acta Polytechnica Hungarita. Vol. 4. No 2. En http://www.socio.org.co/CLAIO2008/submissions/CLAIO_2008_submission_427.pdf
50. Curso 2004-05. Tema 1: Introducción al diseño de sistemas productivos y logísticos. Departamento de Organización de Empresas, E.F. y C.

51. Curso 2005-06. Ingeniería del Transporte. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Coruña. En <http://www.elprisma.com/apuntes/curso.asp?id=12458>
52. De-Alba, K. R. (2004). Un procedimiento heurístico para un problema de diseño de redes multiproducto con capacidad finita y cargos fijos, Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica.
53. Desrochers, M., J. Desrosiers and M. Solomon (1992). A New Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows, *Operations Research* 40(2), 342-354.
54. Díaz Parra, O. & Cruz Chávez, M.A. (2006). El Problema del Transporte. Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Cuernavaca, Morelos.
55. Díez de Castro, E. & Fernández, J. C. (1993). Distribución comercial. Editora McGraw-Hill Interamericana de España S.A.
56. Donovan, R.M. (2000). Mejora del desempeño de Gestión de Cadena de Suministro. Los Prerrequisitos hacia el éxito. Vol. 1. En <http://www.supplychain.ittoolbox.com/browse.asp> [SCMPeer Publishing.htm](http://www.scmpeerpublishing.com)
57. Dorigo, M. & Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. Cambridge, MA: MITPress/Bradford Books.
58. DSLC (2006). Consultoría y Sistemas de Logística Integral, S.L.L. En <http://DSLCL.com> www.navactiva.com
59. Eglese, R. (1990). Simulated Annealing: A tool for Operational Research. *European Journal of Operational Research*. No 46. Pages. 271-281.
60. Ellabib, I. et al. (2007). Exchange strategies for multiple Ant Colony System. *Information Sciences*. Vol. 177. Pages 1248-1264.
61. Esparcia Alcázar, A. I. and L. Lluch Revert (2006). "Proyecto analog - Informe de Progreso." 51.
62. Fajardo, G. A. S. (2005). Problemas de Planeación de Rutas Vehiculares y sus Aplicaciones. En <http://www.citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid>
63. Felipe Valdés, P. (2002). Decisiones para la distribución física de los productos: un enfoque cuantitativo. *Economía y Desarrollo*. No. 1. Vol. 130.
64. Feo, T. A. and M. C. Resende (1995). Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. *Journal of Global Optimization* 2: 1-27.

65. Fernández, E. (2006). Itinerarios de Vehículos. ALFA-Loglmy: Logística Inversa y gestión respetuosa con el Medio Ambiente. Programa ALFA II de la Comunidad Europea.
66. Fisher, M., Hammond, J.; Obermeyer, J. and Raman, A (1961). Configuring a Supply Chain to Reduce the Cost of Demand Uncertainty. *Production and Operations Management*, v. 6, n. 3, p. 211-225.
67. Fontena Faúndez, H.F. (2004). Situación actual de la logística. Chile.
68. Galgano Group [2000]. Servicios-Producción y Cadena de Suministro. En <http://www.galganogroup.it/sp\consul-serviziq.html>
69. Gallego, R. and A. Escobar (2000). Statical Planning of Colombia's Transmission Systems Using Genetics Algorithm. 16th Internacional Conference on CAD/CAM Robotic & Factories of the Future.
70. Gallego, R. A., C. A. R. Porras, et al. (2004). Técnicas heurísticas aplicadas al problema del cartero viajante. *Scientia et Technica* 24.
71. Gambardella, L. & Dorigo, M. (1997). Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. Vol. 1. Pages 53-66.
72. García de Castro, A. (2003). Nuevos límites de la cadena de suministro. *Gestión de la Cadena de Suministro*. No. 43. Septiembre 2003.
73. Garey, M.R. & Johnson, D.S. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W.H. Freeman and Company. New York.
74. Garey, M. R., Johnson, D.S. (2003). *Computers and intractability, A Guide to the theory of NP-Completeness*. W.H.Freeman and Company, New York. USA. ed. 2003.
75. Garrido, P. (2006). *Hiperheurísticas: Un Nuevo Enfoque para la Resolución de Problemas Complejos*.
76. Garza Ríos, R. (1997). *Un enfoque multicriterio al diseño de rutas de distribución (Tesis para optar por el grado de master, Ciudad de La Habana, Cuba)*.
77. Gendreau, M., Laporte, G. & Potvin, J.Y. (1997). Vehicle routing: modern heuristics, in: Aarts, E.H.L., Lenstra, J.K., (Eds.), *Local search in combinatorial optimization*, Wiley, Chichester. Pages 311-336.
78. Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research*. Vol. 13. Págs. 533-549.

79. Glover, F. (1989). Tabu Search–Part 1. ORSA Journal on Computing. No. 3. Vol. 1.
80. Glover, F. & Laguna, M. (1997). Tabu Search. Kluwer Academic Publishers
81. Golberg, D.E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Reading, USA.
82. Gómez Acosta, M.I. & Acevedo Suárez, J.A. (2001). Logística moderna y la competitividad empresarial. Centro de Estudio Tecnología de Avanzada (CETA) y Laboratorio de Logística y Gestión de la Producción (LOGESPRO).Ciudad de la Habana.
83. Goncalves, L. et al. (2005). A GRASP with Adaptive Memory for a Period Vehicle Routing Problem. Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, 2005 and International Conference on Intelligent Agents. Web Technologies and Internet Commerce. International. Vol 1. Pages 721-727.
84. González Vargas, G. and F. González Aristizábal (2006). Metaheurísticas aplicadas al ruteo de vehículos. Un caso de estudio. Parte 1: formulación del problema Ingeniería e Investigación 26: 16.
85. Hernández Pascual, K., Marrero Delgado, F. & Pérez Romero, O. (2003). Análisis de la situación actual de la cadena de suministro de las producciones de la langosta entera precocinada congelada en la Empresa Pesquera Industrial de Caibarién. (Informe de Investigación Terminada, Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas. Santa Clara).
86. Hernández Pérez, H. (2004). Procedimientos exactos y heurísticos para resolver problemas de rutas con recogida y entrega de mercancía. Ciencia y Tecnología. En <http://www.tesis.bbtck.ull.es/ccppytec/cp209.pdf>
87. Hernández Pérez, H. and J. J. Salazar-González (2004). Heuristics for the one-commodity pickup-and-delivery travelling salesman problem. Transportation Science 38(2): 245–255.
88. Ho, W. et al. (2008). A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem. Engineering Applications of Artificial Intelligence. Vol. 21. Issue 4, Pages 548-557.
89. Homberger, J. & Gehring, H. (2005). A two-phase hybrid metaheuristic for the vehicle routing problem with time windows. European journal of operational research. Vol 162. No 2. Pages 220-238.

90. Hu, Z. et al. (2008). Immune co-evolutionary algorithm based partition balancing optimization for tobacco distribution system. Expert Systems with Applications. In Press, Corrected Proof.
91. Hsu, W.J. & Huang, S.Y. (1994). Route planning of automated guided vehicles. In Proceedings of the Intelligent Vehicles Conference, pp. 479-485.
92. Jaque Pirabán, R.A. (2008). Métodos Aproximados para la Solución del Problema de Enrutamiento de Vehículos. Colombia.
93. Jáuregui G, A. (2002). Actividades estratégicas de logística. En <http://www.gestiopolis.com/canales/demarketing/articulos/33/actilogistica.htm>
94. Jun, L. & Jian-yong, Z. (2007). A Genetic Algorithm to Vehicle Routing Problem in Reverse Logistics. International Conference on Management Science and Engineering. ICMSE 2007. Pages 573-578.
95. Knudsen González, J.A. (2005). Diseño y gestión de la cadena de suministro de los residuos agroindustriales de la caña de azúcar. Aplicación a los residuos agrícolas cañeros, el bagazo y las mieles. (Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara).
96. Knudsen González J. A. et al. (1997). Procedimiento de mejora al sistema de gestión logística del transporte de residuos agrícolas cañeros (RAC) en le CAI Luis Arcos Bergnes. Universidad Camilo Cienfuegos de Matanzas. Matanzas. Tesis presentada en opción al grado académico de Máster en organización de la producción.
97. Kolen A, Rinnooy Kan (1987), Vehicle Routing wiht Time Windows. Operations Research, Vol 35, 2.
98. Lalonde, B.J. et al. (1994). Emerging Logistics Strategies: Blueprints for the Next Century. International Journal of Physical Distribution and Logistics Management. Vol. 24. No. 7 Pages 35- 47.
99. Laporte, G., Gendreau, M., Potvin, J-Y & Semet, F. (1999). Classical and Modern Heuristics for the Vehicle Routing Problem. Les Cahiers du GERAD. Montréal Canadá, H3T 2A7.
100. Laporte, G., M. Gendreau, et al. (2000). Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. Int. Trans. in Op. Res 7: 285-300.
101. Lario, F. & Pérez, D. (2001). Introducción a la gestión de la cadena de suministro. Cuadernos de Gestión de la Cadena de Suministro, Una aproximación a la Gestión de la Cadena de Suministro, Vol. 1. Universidad Politécnica de Valencia, España.

102. Lawler, E. L., J. K. Lenstra, et al. (1985). The Traveling Salesman Problem: A guided tour of combinatorial optimization. Wiley series in Discrete Mathematics & Optimization.: 476.
103. Lin, S., Lee, Z.J., Ying, K.C. & Lee, C.Y. (2009). Applying hybrid meta-heuristics for capacitated vehicle routing problem. Expert Systems with Applications. Volume 36. Issue 2. Part 1. Pages 1505-1512.
104. Louis, S. J., X. Yin, et al. (1999). Multiple Vehicle Routing With Time Windows Using Genetic Algorithms. Computer Science. Reno, Nevada.
105. Lu, Q. and M. Dessouky (2002). An Exact Algorithm for the Multiple Vehicle Pickup and Delivery Problem.
106. Ma, J. et al. (2006). Immune Genetic Algorithm for Vehicle Routing Problem with Time Windows. International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Pages 3465-3469.
107. Maguera, N.G., Abensur, D. & Panacho, A. (2007). Búsqueda Dispersa aplicada al Problema de Rutas de Vehículos con Colecta y Entrega Simultaneo. Zaragoza. España.
108. Mahalanobis, P.C. (1936). On the generalized distance in statistics. Proc. Natl. Inst. Sci. India 2, 49–55.
109. Malandraki, C. and M. S. Daskin (1992). Time Dependent Vehicle Routing Problems: Formulations, Properties and Heuristic Algorithms. Transportation Science 26: 16.
110. Martí Cunqueiro. R (2001). Algoritmos Heurísticos en Optimización Combinatoria.
111. Medina & Yepes (2007). Optimización de Redes con Algoritmos Genéticos. En <http://www.personales.upv.es>
112. Méndez García, J. & Oubiña Barbolla, J. (2002). Logística: la asignatura pendiente en materia de gestión. Revista Distribución y consumo, 2002. Nº 54. Mayo-Junio 2002. En <http://www.mercasa.es/es/publicaciones/Dyc/sum63/pdf/logistica.pdf>
113. Mentzer, J. T., D. J. Flint, and G. T. M. Hult. (2001). Logistics service quality as a segment-customized process. Journal of Marketing 65 (4):82-104.
114. Monterroso, Elda. (2000): El proceso logístico y la gestión de la cadena de abastecimiento. En <http://www.unlu.edu.ar/-ope20156/pdf/logística.pdf>
115. Moraga, R.J. (2002). Meta-RaPS: An Effective Solution Approach for Combinatorial Problems. Ph.D. thesis. Orlando, FL: University of Central Florida.

116. Morrison, D.F. (1976). Multivariate statistical methods. McGraw-Hill, Tokyo, 415 pp
117. Norman, P. (2000). Logística. En <http://www.weblogistica.com/logistica.htm>
118. Obson, J.D. (1992). Applied Multivariate Data Analysis, Volume II: Categorical and Multivariate Methods. Springer Verlag.
119. Olivier, R. K. & Webber, M.D. (1982). Supply- Chain Management: logistics catches up with strategy.
120. Ortiz Araya & Albornoz, et al. (2009). Proposición de una estructura jerarquizada de producción para optimizar cadenas de suministro. OPTIMA: 6.
121. Osman, I. H. and N. A. Wassan (2002). A reactive tabu search meta-heuristic for the vehicle routing problem with back-hauls. Journal of scheduling 5:263–285.
122. Otto, A. & Kotzab, H. (1999). Does supply chain management really pay. Six perspectivas to measure the performance of managing a supply chain, European Journal of operational research, Vol 144, pp.306-320.
123. Papadimitriou, C. H. and Steiglitz, K. (1982). Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. Paul I Cos, J., De Novascués & Gesca, R. (2001). Manual de logística integral. Ediciones Díaz Santos. Madrid.
124. Pilot (2004). Folleto de Inscripción. En <http://www.logispilot.com>.
125. Porter, A.M. (1985). Ventaja competitiva. Compañía Editorial Continental. Ciudad de México.
126. Porter, A. M. (1997). One Focus, One Supply Base. Purchasing, June 5. Pages 50-59
127. Potvin, J. and S. Bengio (1994). A Genetic Approach to the Vehicle Routing Problem with Time Windows, Technical Report, CRT-953, Centre de Recherche sur les Transports, University de Montreal, Canadá.
128. Potvin, J, T. Kervahut, B. García and J. Rousseau (1993). A Tabú Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. Technical Report, CRT-855, Centre de Recherche sur les Transports, University de Montreal, Canadá.
129. Puchades Cortés, V., Mula Bru, J., Rodríguez Villalobos, A. (2008). Aplicación de la Teoría de Grafos para mejorar la planificación de rutas de trabajo de una empresa del sector de la distribución automática. Métodos cuantitativos para la economía y la empresa. Vol. 6. Págs. 7-22. En <http://www.upo.es/RevMetCuant/art21.pdf>.
130. Qiu, L. and W. J. Hsu (1999). Scheduling and routing for AGVS. Technical Report, CAISTR-99-26, Center for Advanced Information Systems.

131. Rahoual, M., B. Kitoun, et al. (2001). Multicriteria Genetic Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. MIC'2001 - 4th Metaheuristics International Conference. Portugal: 527-532.
132. Reeves, C. (1993). Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems, John Wiley & Sons.
133. Reinelt, G. (1994). The Traveling Salesman: Computational Solutions for TSP Applications. Lectures Notes in Computer Science, Springer-Verlag.
134. Righini, G. & Salani, M. (2009). Decremental state space relaxation strategies and initialization heuristics for solving the Orienteering Problem with Time Windows with dynamic programming. Computers & Operations Research Vol. 36. Pages 1191–1203.
135. Rochat, Y and Taillard, E., 1995. Probabilistic Diversification and Intensification in Local Search for Vehicle Routing, Journal of Heuristics 1, 147-167.
136. Ros, L. & De la fuente, M. & Campuzano, F. & De Nieves, C. (2003). Modelo integrado de las Cadenas de Suministro Directa e Inversa. V Congreso de Ingeniería de Organización Valladolid-Burgos
137. Rosero, V. and Torres, F (2006). Ant Colony based on a heuristic insertion for a family of helicopter routing problems. Third International Conference on Production Research Americas' Region 2006 (ICPR-AM06).
138. Salazar González, J. & Iori, M. et al. (2005). An exact approach for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints.
139. Salazar H., E. and N. Ruiz F. (2009). Modelo Aco para la recolección de residuos por contenedores.
140. Santos Norton, M.L., (1995). La Logística como elemento de las fuerzas del cambio. Monografía, ISPJAE.
141. Sarabia, A. A. (1995). Teoría General de Sistemas. ISDEFE. Madrid: 171.
142. SCC (2001). Qué es la cadena de suministro. Supply Chain Council. En <http://www.supply-chain.org/eu/spanish/faq.htm>
143. Schaffer, J. & Eshelman, L. (1996). Combinatorial Optimazation by Genetic Algorithms: The Value of the Genotype/Phenotype Distinction, In Rayward-Smith, I., et al. (Eds), Modern Search Methods, John Wiley & Sons.

144. Segovia Vargas, M.J., Gil Fana, J.A., Heras Martínez, A. & Vilar Zanón, J.L. (2003). La metodología Rough Set frente al Análisis Discriminante en los problemas de clasificación multiatributo. Madrid, España.
145. Sendas (2009). La Revista Cubana del Transporte. Ciudad de La habana. Cuba. En <http://www.sendasweb.cu/Sendas40/index.htm>
146. Stock et al. (1990). 21st Century Logistics: Making supply chain integration a reality, Council of Logistics.
147. Sun, L., X. Hu, et al. (2007). A Knowledge-Based Model Representation and On-Line Solution Method for Dynamic Vehicle Routing Problem. Part IV: 218–226.
148. Taghaboni, F. and J. M. Tanchoco (1995). Comparison of dynamic routing techniques for automated guided vehicles Systems. International Journal of Production Research 33: 2653-2669.
149. Taillard, E., P. Badeau, et al. (1996). A Tabú Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows.
150. Tan K.C (2001). A framework of suplí chain Management literature, European Journal of purchasing & supply chain Management, Vol7, pp. 39-48.
151. Thangiah, S.R. (1993). Vehicle Routing with Time Windows using Genetic Algorithms. Application Handbook of Genetic Algorithms: New Frontiers, Volume II, L. Chambers (Ed.), CRC Press, Florida.
152. Thangiah, S. R. (1999). Chapter 9 A Hybrid Genetic Algorithm, Simulated Annealing and Tabu Search Heuristic for Vehicle Routing Problems with Time Windows.
153. Thompson, P.M. and H. Psaraftis (1993). Cyclic Transfer Algorithms for Multi-Vehicle Routing and Scheduling Problems. Operations Research, 41,935-946.
154. Tompkins, J.A. (2000). No boundaries. Moving Beyond SCM. Tompkins Press. North Carolina, USA.
155. Torres Gemeil, M., Mederos Cabrera, B. Daduna, R. & Comas Pullés, R. (2003). Generalidades sobre logística. Logística: temas seleccionados, Tomo I. ISBN 959-250-100-9. Editorial Universitaria.
156. Toth, P. & Vigo, D. (1997). Heuristic algorithms for the handicapped persons transportation problem. Transportation Science. No 31. Pages 60–71.

157. Valverde, R. & Gachet, D. (2007). Identificación de Sistemas Dinámicos Utilizando Redes Neuronales. Consultado en el sitio web:
<http://selafi.cdict.uclv.edu.cu/abstract.php?id=12083&return=cmd>
158. Van Breedam, A. (2001). Comparing descent heuristics and metaheuristics for the vehicle routing problem. Computer and Operation Research No 28. Pages 289-315.
159. Vitoriano, B. (2009). Modelos operativos de gestión. En http://www.mat.ucm.es/~bvitoria/Archivos/Apuntes%20MOG_UCM.pdf
160. Yepes, V. and J. Medina (2002). Optimización del problema generalizado de las rutas con restricciones temporales y de capacidad (CVRPTW).
161. Zabala A., C.A. (2005). Implementación del Sistema de Colonia de Hormigas con Búsqueda Local del Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad y Ventanas de Tiempo (CVRPTW). Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
162. Zachariadis, E.E. et al. (2009). A hybrid metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up service. Expert Systems with Applications. Vol. 36. No 2. Part 1. Pages 1070-1081.
163. Zhang, L. et al. (2005). A tabú search algorithm for the safe transportation of hazardous materials. Proceedings of the 2005 ACM symposium on applied computing. ACM, Pages 940-946.

ANEXOS

ANEXO 1: DEFINICIONES DE LOGÍSTICA

FUENTE BIBLIOGRAFICA	DEFINICIÓN
Magee [1968]	El movimiento de los materiales desde una fuente u origen hasta un destino o usuario
La Londe [1971] y Christopher [1972]	La unión de la Gestión de los Materiales con la Distribución Física
Bowersox [1979]	La aplicación del enfoque en sistema a la solución de los problemas de suministro y distribución de las empresas
Ballou [1991]	La Logística empresarial abarca todas las actividades relacionadas con el traslado - almacenamiento de productos que tiene lugar entre los puntos de adquisición y los puntos de consumo
CEL [1993]	Actividad compuesta por dos funciones básicas: 1. La gestión de los materiales: Encargada de los flujos materiales en el aprovisionamiento de las materias primas y componentes y en las operaciones de fabricación hasta el envase del producto terminado 2. La Gestión de distribución: Encargada del embalaje, el control de los inventarios de los productos terminados, pasando de los procesos de manipulación, almacenamiento y transporte hasta la entrega del producto o servicio al cliente
Sahid [1998]	Disciplina que tiene como misión diseñar, perfeccionar y gestionar un sistema capaz de integrar y cohesionar todos los procesos internos y externos de una organización, mediante la provisión y gestión de los flujos de energía, materia e información, para hacerla viable y más competitiva, y en últimas, satisfacer las necesidades del consumidor final
ASLOG [1986]	El conjunto de actividades que tienen por objetivo la colocación, al menor costo, de una cantidad de producto en el lugar y en el momento en donde existe una demanda
Torres Gemeil et al. [2003]	Conjunto de técnicas que de por sí tienen cuerpo propio, no formando parte de ninguna en específico y sirviéndose de elementos de diferentes áreas como: la matemática, la informática económica, la administración de empresas y otras

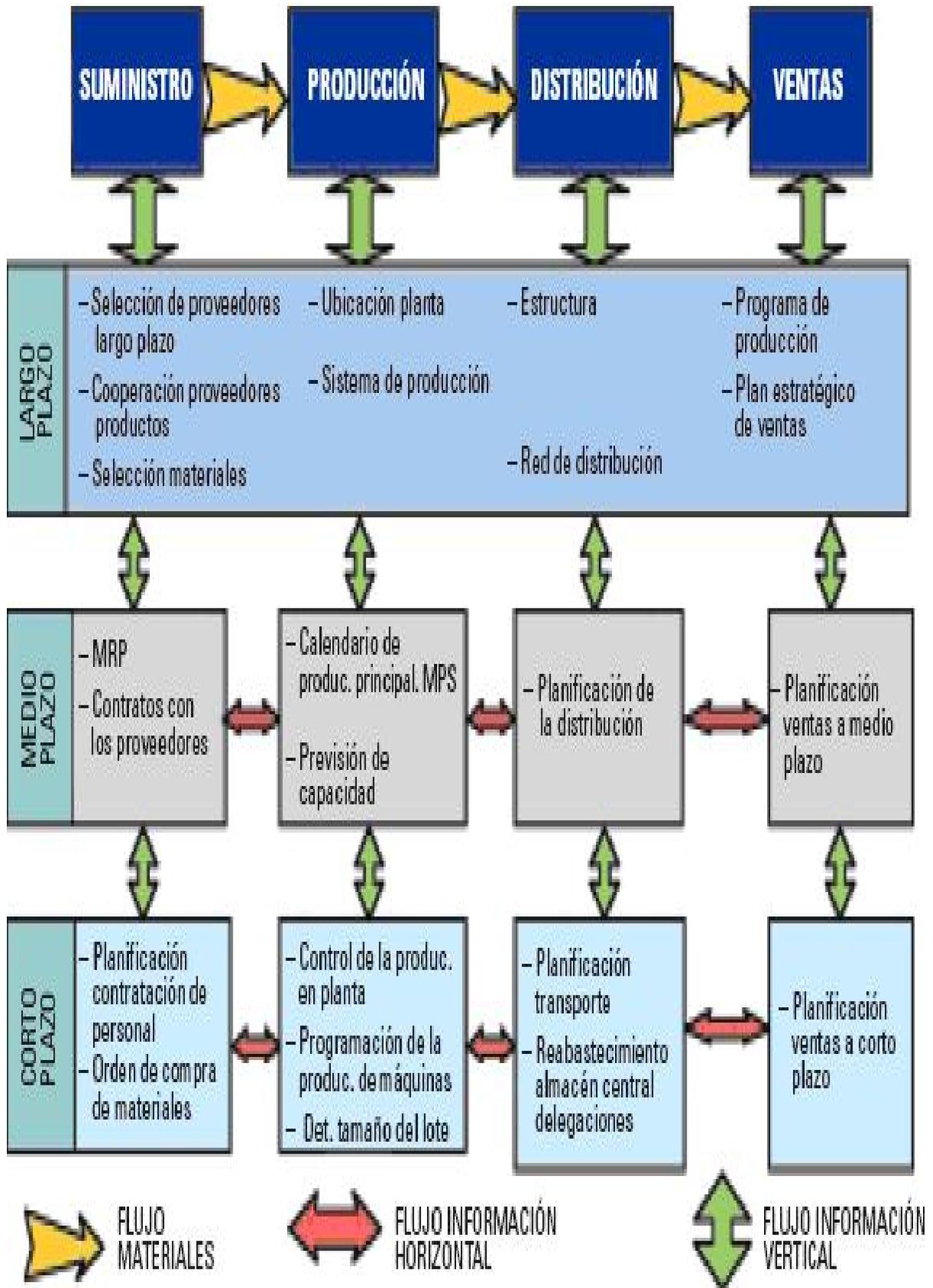
Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 2: ACTIVIDADES LOGÍSTICAS

AUTOR	ACTIVIDADES LOGISTICAS
Arbonés [1999]	<ul style="list-style-type: none"> • Gestión de almacenes • Manejo de materiales • Gestión de inventarios • Previsión de la demanda • Organización de transportes • Localización y dimensionamiento de instalaciones de producción y almacenaje • Administración de las esperas
Ballou [2004]	<p>Claves:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Servicio al cliente • Transporte • Gestión de inventarios • Procesamiento de pedidos <p>De soporte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Almacenamiento • Manejo de mercancías • Compras • Empaquetamiento • Planificación del producto • Gestión de la información
Bowersox & Close [1996]	<ul style="list-style-type: none"> • Transportes • Inventarios • Soportes de manufacturas • Distribución
CSCMP [2005]	<ul style="list-style-type: none"> • Administración de transporte interno y externo • Administración de fletes • Manejo de materiales • Almacenamiento • Completamiento de órdenes • Diseño de redes logísticas • Manejo de inventarios • Planeación oferta/demanda • Administración de proveedores de servicios logísticos
Pau I COS et al. [2001]	<ul style="list-style-type: none"> • Previsiones • Gestión de órdenes de expedición de productos de los depósitos al consumidor • Gestión de stocks de productos • Mantenimiento de los depósitos • Transporte de fábrica a los depósitos • Acondicionamiento y embalaje • Programación de fabricación • Almacenes de fábricas • Control de obra en curso • Suministro a línea y transporte interfábrica • Almacenes de materias primas

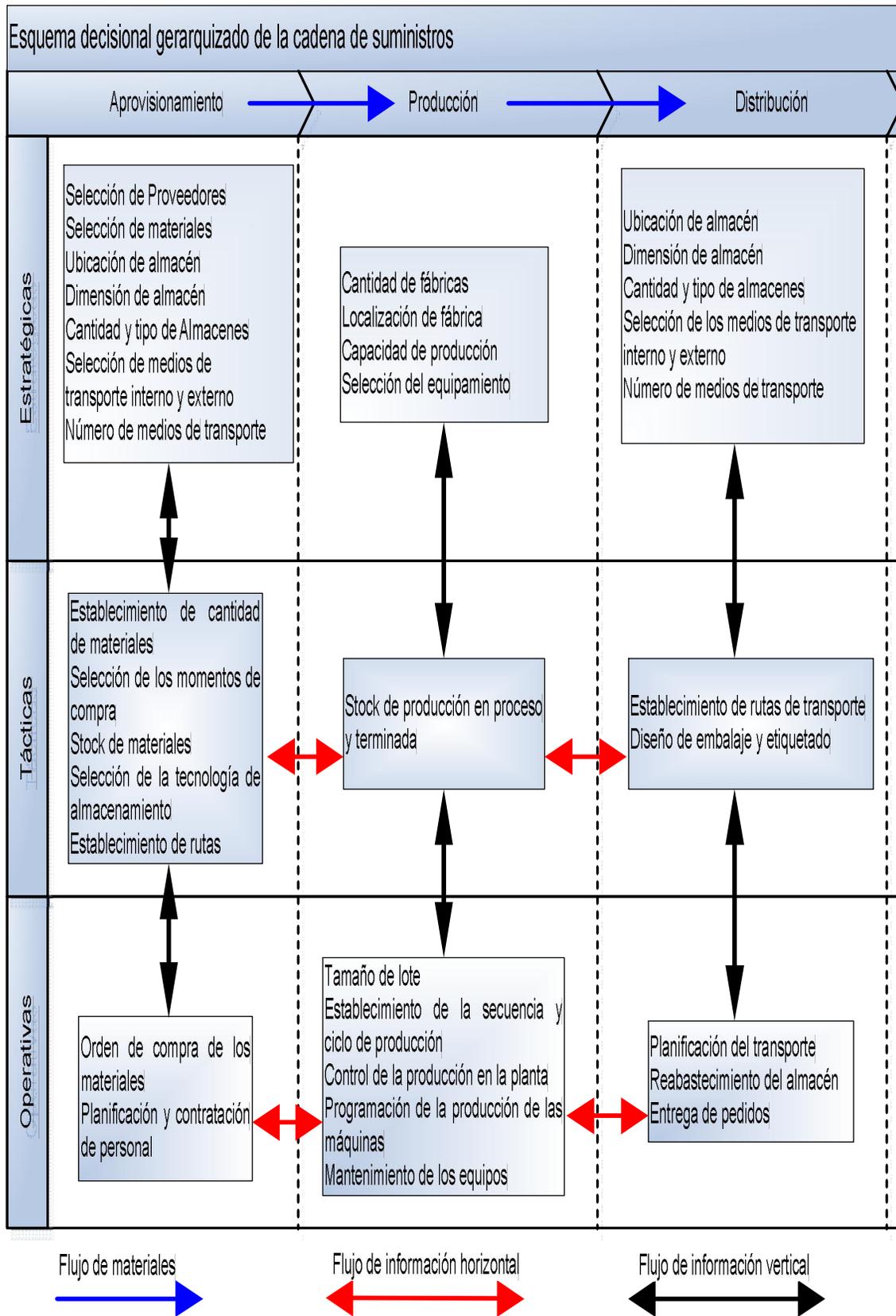
Fuente: Cárdenas Aguirre & Urquiaga Rodríguez [2006].

ANEXO 3: MATRIZ DE PLANIFICACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO



Fuente: Pilot [2004].

ANEXO 4: ESQUEMA DECISIONAL JERARQUIZADO DE LA CADENA DE SUMINISTRO



Fuente: Elaboración propia basado en Pilot [2004].

ANEXO 5: RESUMEN DE MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE RUTAS DE DISTRIBUCIÓN

TIPO DE MÉTODO	AUTORES
MÉTODOS EXACTOS	Desrochers, Desrosiers, Solomon, [1992]; Bard, Kontoravdis, Yu, Toth, Vigo [2002] ; Righini & Salani [2009]
MÉTODOS APROXIMADOS	Algoritmos de Enjambre
	Chen, B. et. al.[2007]; Chen, P. et al. [2007]; Ellabib et al. [2007]
	Algoritmos Evolutivos
	Alvarenga & Mateus [2005]; Alba & Dorronsoro [2006]; Jun & Jian-yong, [2007]
	Sistemas Inmunes Artificiales
	Ma et al. [2006]; Hu et al. [2008]
	Algoritmos Híbridos
	Zachariadis et al [2009]; Lin et al. [2009]
	Algoritmos de Búsqueda Local
	Zhang et al. [2005]; Goncalves et al. [2005]; Beham [2007]; Boudia et al. [2007]
	Algoritmos Constructivos
	Ho et al. [2008]; Alfonso et al. [2008]
	Algoritmos de Dos Fases
	Hombberger & Gehring [2005]; Csiszár [2007]

Fuente: Elaboración propia basada en Jaque Pirabán [2008].

ANEXO 6: DECISIONES DE TRANSPORTE EN LA LOGÍSTICA

SELECCIÓN DE RUTAS	TÉCNICA RECOMENDADA	PROCEDIMIENTO
Origen y destinos diferentes	Programación Entera Mixta	Exacto
	Programación Dinámica	Exacto
	Método de Ramificación y Poda	Exacto
	Algoritmo de Ford	Aproximado
	Algoritmo de Bellman-Kalaban	Aproximado
	Método de Floyd	Aproximado
	Método de la Matriz	Exacto
	Método Tabular	Aproximado
Coincidencia de puntos origen – destino	Programación Entera Mixta	Exacto
	Programación Dinámica	Exacto
	Método de Ramificación y Poda	Exacto
	Algoritmo del Barrido	Aproximado
	Método de Clark y Wright	Aproximado-Heurístico
	Método de Karg y Thompson	Aproximado-Heurístico
	Método de Lemaire	Aproximado-Heurístico
	Método de Lin y Kernighan	Aproximado-Heurístico
	Método de Ferguson	Aproximado-Heurístico
	Método de Doll	Aproximado
	Método de Bodin, Daouley y Stewart	Aproximado
	Método de Gaskell	Exacto
	Método de Held y Karp	Exacto
	Método de Christofides y Ginozza	Exacto
	Método de Crowder y Fadberg	Exacto

Fuente: Elaboración propia basada en Torres Gemeil & Mederos Cabrera [2005].

ANEXO 7: RESUMEN DE LAS VENTAJAS Y LIMITACIONES POR TIPOS DE MÉTODOS

	VENTAJAS	LIMITACIONES
P. Exactos	<ul style="list-style-type: none"> • Garantizan una solución óptima 	<ul style="list-style-type: none"> • Considerable tiempo de cálculo, sobre todo en los problemas de mayor escala • No trabaja con variables dinámicas en el tiempo • Requiere de mayor tiempo computacional • Hay que hacer un software prácticamente para cada una de las soluciones • Falta de flexibilidad
P. Aproximados	<ul style="list-style-type: none"> • Ofrecen soluciones buenas o cercanas a la óptima y comprensibles por el personal no especializado • Tiempo de cálculo bastante reducido • Optimizan múltiples criterios simultáneamente • Resuelven problemas difíciles, no lineales y que implican muchas variables • Trabajan con distintos tipos de variables: discretas, continuas, difusas, descriptivas etc. • Flexibles • Fácilmente adaptables para solucionar modelos más complejos. 	<ul style="list-style-type: none"> • No encuentran el óptimo real • Requiere de altos conocimientos desde el punto de vista computacional • Pueden quedar atascados en óptimos locales • Su flexibilidad puede conducir a errores • Las mejoras locales pueden cortar el camino a soluciones mejores por la falta de una perspectiva global • Sacrifican la garantía de alcanzar soluciones óptimas por la de encontrar buenas soluciones en un tiempo significativamente reducido • Aplicables a problemas de optimización, y no a los problemas de decisión en estado "puro"

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 8: EXPERTOS PARA LA INCLUSIÓN DE LAS VARIABLES DE CLASIFICACIÓN

EXPERT.	NOMBRE	CARGO QUE OCUPA	GRADO CIENTIF.
1	Yasel José Costa Salas	Profesor	M.Sc.
2	Fernando Marrero Delgado	Vice-Decano de Investigación e informatización	Dr.C.
3	Javier Alfonso Asencio García	Vice-Decano Docente	Dr.C.
4	René Abreu Ledón	Jefe del Colectivo de Matemática Aplicada	Dr.C.
5	Hugo Granela Martin	Decano	Dr.C.
6	Roberto Cespón Castro	Vice-Presidente de la Asociación Nacional de Logística	Dr.C.
7	Yodaira Borroto Penton	Profesor	Dr.C.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO9: BASE DE CASOS PARA PROBLEMAS DE ENRUTAMIENTO

CASOS DE ESTUDIO	METODO		VARIABLES									
	APROXIMADO	EXACTO	CANTIDAD DE NODOS	AMBITO TEMPORAL		CANTIDAD DE VEHICULOS	CAPACIDAD VEHICULOS		CANTIDAD OBJETIVOS		DEMANDA	
				SIN RESTRINC. DE TEMP	CON VENTANAS DE TIEMPO		HOMOGENEA	HETEROGENEA	MONO OBJETIVO	MULTI OBJETIVO	DETERMINIST.	ESTOCASTICA
Ashour et al. [1972]	X		30	X		1	X		X		X	
Gillett and Miller [1974]	X		25	X		5		X	X		X	
Sexton [1979]	X		20		X	10	X			X	X	
Psaraftis [1980]		X	9	X		5		X		X		X
Psaraftis [1983]		X	9		X	5		X	X		X	
Bodin & Sexton [1986]	X		85		X	10	X			X	X	
Desrosiers et al [1986]		X	40		X	8		X	X		X	
Jaw et al. [1986]	X		250		X	15	X			X	X	
Robuste et al. [1990]	X		20	X		7	X		X			X
Malandraki & Daskin [1992]	X		20		X	1	X		X		X	
Vliet et al. [1992]	X		15		X	5		X		X	X	
Desrochers et al. [1992]	X		100		X	18	X			X	X	
Desrochers, M.; Desrosiers, J. & Solomon, M. [1992] C101		X	50		X	5	X		X		X	
Desrochers, M.; Desrosiers, J. & Solomon, M. [1992] RC102		X	25		X	3	X		X		X	

ANEXO9: CONTINUACION

CASOS DE ESTUDIO	METODO		VARIABLES									
	APROXIMADO	EXACTO	CANTIDAD DE NODOS	AMBITO TEMPORAL		CANTIDAD DE VEHICULOS	CAPACIDAD VEHICULOS		CANTIDAD OBJETIVOS		DEMANDA	
				SIN RESET. TEMP	CON VENTANAS DE TIEMPO		HOMOGENEA	HETEROGENEA	MONO OBJETIVO	MULTI OBJETIVO	DETERMINIST.	ESTOCASTICA
Thompson & Psaraftis [1993] C201	X		100		X	3	X			X	X	
Thompson & Psaraftis [1993] C105	X		100		X	10	X			X	X	
Fisher [1994]		X	8	X		2		X	X		X	
Potvin & Bengio [1994] C104	X		100		X	10	X			X	X	
Potvin & Bengio [1994] R204	X		100		X	2	X			X	X	
Chiang & Russell [1994]	X		249		X	4	X			X	X	
Chiang & Russell [1994]	X		417		X	55	X			X	X	
Potvin & Bengio [1994]	X		100		X	14	X			X	X	
García [1995]	X		400		X	26		X		X	X	
Koksalan et al. [1995]		X	10	X		3		X	X		X	
Madsen et al. [1995]	X		300		X	15	X			X	X	
Savelsbergh [1995]		X	20	X		5		X	X		X	
Rochat & Taillard [1995] 56	X		417		X	54		X		X		X
Bowers et al. [1996] 57	X		30	X		8		X	X		X	

ANEXO9: CONTINUACION

CASOS DE ESTUDIO	METODO		VARIABLES									
	APROXIMADO	EXACTO	CANTIDAD DE NODOS	AMBITO TEMPORAL		CANTIDAD DE VEHICULOS	CAPACIDAD VEHICULOS		CANTIDAD OBJETIVOS		DEMANDA	
				SIN RESET. TEMP	CON VENTANAS DE TIEMPO		HOMOGENEA	HETEROGENEA	MONO OBJETIVO	MULTI OBJETIVO	DETERMINIST.	ESTOCASTICA
Taillard et al. [1996] R107	X		100		X	10		X		X	X	
Taillard et al. [1996] RC102	X		100		X	12		X		X	X	
Taillard et al. [1996] RC106	X		100		X	11		X		X	X	
Beasley & Christofides[1997]		X	12	X		3	X		X		X	
Pacheco [1997]	X		10		X	1	X		X		X	
Toth & Vigo [1997]	X		300		X	15	X		X		X	
Modesti & Sciomachen [1998]		X	5	X		1	X			X		X
Barbarosoglu & Ozgur [1999]	X		46	X		5	X		X		X	
Cook & Rich [1999]r103		X	18		X	14	X		X		X	
Cook & Rich [1999]r106		X	190		X	13	X		X		X	
Cook & Rich [1999]r112		X	193		X	6	X		X		X	
Coy et al. [1999]	X		50	X		1	X		X		X	
Larsen [1999]	X		67		X	10	X		X		X	
Louis et al. [1999]	X		100		X	10		X		X		X
Vander Poort et al. [1999]		X	11	X		1	X		X		X	
Gehring & Homberger [1999]	X		200		X	19		X		X	X	

ANEXO9: CONTINUACION

CASOS DE ESTUDIO	METODO		VARIABLES									
	APROXIMADO	EXACTO	CANTIDAD DE NODOS	AMBITO TEMPORAL		CANTIDAD DE VEHICULOS	CAPACIDAD VEHICULOS		CANTIDAD OBJETIVOS		DEMANDA	
				SIN RESET. TEMP	CON VENTANAS DE TIEMPO		HOMOGENEA	HETEROGENEA	MONO OBJETIVO	MULTI OBJETIVO	DETERMINIST.	ESTOCASTICA
Gehring & Homberger [1999]	X		400		X	38		X		X	X	
Thangiah [1999] RC105	X		100		X	14		X		X	X	
Thangiah [1999] RC202	X		100		X	4		X		X	X	
Thangiah [1999]	X		417		X	54		X		X	X	
Thangiah [1999]	X		249		X	6		X		X	X	
Faulín & Jiménez Torres [2000]		X	11	X		6	X		X		X	
Nanry & Barnes[2000]	X		34		X	5		X	X		X	
Medina & Yepes [2000]	X		30		X	15	X			X		X
Arbelaitz, Rguez & Zamakola [2000]	X		170		X	25	X		X		X	
Renaud et al. [2000]	X		24	X		1	X		X		X	
Secomandi [2000]		X	15	X		1	X		X			X
Yang et al. [2000]	X		200		X	20		X	X			X
Fagerholt [2001]	X		47		X	6		X	X		X	
Glover et al. [2001]	X		30	X		1	X		X		X	
Rahoual et al. [2001]	X		100		X	25	X		X		X	

ANEXO9: CONTINUACION

CASOS DE ESTUDIO	METODO		VARIABLES									
	APROXIMADO	EXACTO	CANTIDAD DE NODOS	AMBITO TEMPORAL		CANTIDAD DE VEHICULOS	CAPACIDAD VEHICULOS		CANTIDAD OBJETIVOS		DEMANDA	
				SIN RESET. TEMP	CON VENTANAS DE TIEMPO		HOMOGENEA	HETEROGENEA	MONO OBJETIVO	MULTI OBJETIVO	DETERMINIST.	ESTOCASTICA
Rego [2001]	X		50	X		10		X	X		X	
Villaroel & Radnick [2001]		X	27	X		50	X		X		X	
Bräysy [2001]	X		200		X	6		X		X	X	
Bräysy [2001]	X		400		X	37		X		X	X	
Albelaitz [2002]	X		150		X	25	X		X		X	
Caballero et al. [2002]		X	25		X	8	X		X		X	
Colmenares Perdomo [2002]	X		100		X	8		X		X	X	
Cordeau & Laporte [2002]	X		295		X	15	X		X		X	
Ibeas Portilla et al. [2002]	X		35		X	9	X		X		X	
Lu & Dessouky [2002]		X	17	X		5		X		X	X	
Lu & Dessouky [2002]		X	25	X		5		X		X	X	
Osman & Wassan [2002] D3	X		38	X		7	X		X		X	
Osman & Wassan [2002] D4	X		38	X		5	X		X		X	
Osman & Wassan [2002] K1	X		113	X		10	X		X		X	
Osman & Wassan [2002] eilB1018	X		100	X		11	X		X		X	

ANEXO9: CONTINUACION

CASOS DE ESTUDIO	METODO		VARIABLES									
	APROXIMADO	EXACTO	CANTIDAD DE NODOS	AMBITO TEMPORAL		CANTIDAD DE VEHICULOS	CAPACIDAD VEHICULOS		CANTIDAD OBJETIVOS		DEMANDA	
				SIN RESET. TEMP	CON VENTANAS DE TIEMPO		HOMOGENEA	HETEROGENEA	MONO OBJETIVO	MULTI OBJETIVO	DETERMINIST.	ESTOCASTICA
Sedeño & González [2002]	X		4		X	7		X	X			X
Tarantilis & Kiranoudis [2002]	X		55	X		6	X		X		X	
Toth & Vigo [2002a]		X	16	X		4	X		X		X	
Wolfler Calvo & Colorni [2002]	X		180		X	15	X			X	X	
Yepes & Medina [2002]	X		100		X	20	X		X		X	
Pintor [2003]	X		12	X		1	X		X		X	
Ioannou et al. [2003]	X		40	X		5		X	X		X	
Flusechmam et al. [2004]	X		981		X	50	X		X		X	
Garrido & Onaindia [2004]	X		15		X	10		X	X		X	
Montemanni et al. [2004]	X		199		X	50	X		X		X	
Montoya Torres [2004]	X		20	X		15		X		X	X	
Rosero & Torres [2004] Pb8p16n8	X		8	X		1	X		X		X	
Rosero & Torres [2004] Pb21p26n9	X		9	X		1	X		X		X	

ANEXO9: CONTINUACION

CASOS DE ESTUDIO	METODO		VARIABLES									
	APROXIMADO	EXACTO	CANTIDAD DE NODOS	AMBITO TEMPORAL		CANTIDAD DE VEHICULOS	CAPACIDAD VEHICULOS		CANTIDAD OBJETIVOS		DEMANDA	
				SIN RESET. TEMP	CON VENTANAS DE TIEMPO		HOMOGENEA	HETEROGENEA	MONO OBJETIVO	MULTI OBJETIVO	DETERMINIST.	ESTOCASTICA
Rosero & Torres [2004] Pb40p48n12	X		12	X		1	X		X		X	
Ho & Haugland [2004]	X		72		X	6		X	X		X	
Tarantilis et al. [2004]	X		60	X		10		X	X		X	
Potvin et al. [2004] en artic resientes	X		100		X	4	X			X		X
Chan & Cheng [2005]	X		15	X		44	X			X	X	
Guillen Solorzano et al [2005]	X		30		X	24	X		X		X	
Salazar et al. [2005]	X		35	X		11		X	X			X
Zabala [2005]	X		100		X	15	X		X		X	
Esparcia & Lluch [2006]		X	20	X		1	X		X		X	
Esparcia & Lluch [2006] A-n33-k5.vrp	X		33	X		5	X		X		X	
Esparcia & Lluch [2006] B-n43-k6.vrp		X	43	X		6	X		X		X	

ANEXO9: CONTINUACION

CASOS DE ESTUDIO	METODO		VARIABLES									
	APROXIMADO	EXACTO	CANTIDAD DE NODOS	AMBITO TEMPORAL		CANTIDAD DE VEHICULOS	CAPACIDAD VEHICULOS		CANTIDAD OBJETIVOS		DEMANDA	
				SIN RESET. TEMP	CON VENTANAS DE TIEMPO		HOMOGENEA	HETEROGENEA	MONO OBJETIVO	MULTI OBJETIVO	DETERMINIST.	ESTOCASTICA
González Vargas & González Aristizábal [2006]	X		53	X		6	X		X		X	
Ordóñez et al. [2006]	X		10		X	1	X		X		X	
Pérez Perales et al. [2006]	X		142		X	15	X		X		X	
Maquera et al. [2007]	X		199	X		13	X		X		X	
Pacheco, Caballero & Laguna [2007]	X		57	X		15	X			X	X	
Pesquera [2007]	X		50		X	47	X			X	X	
Sun et al. [2007]	X		15		X	14		X	X			X
Santiago [2007]	X		21		X	5		X	X		X	
Schmid [2007]	X		99		X	33		X		X		X
Aynos & Hernández [2008]	X		14		X	10		X	X			X
Christiansen et al. [2008] A-32-5		X	31	X		5	X		X			X
Christiansen et al. [2008] B-38-6		X	37	X		6	X		X			X
Christiansen et al. [2008] E-22-4		X	21	X		4	X		X			X
Jaque Pirabán [2008]	X		12		X	3	X		X		X	

ANEXO9: CONTINUACION

CASOS DE ESTUDIO	METODO		VARIABLES									
	APROXIMADO	EXACTO	CANTIDAD DE NODOS	AMBITO TEMPORAL		CANTIDAD DE VEHICULOS	CAPACIDAD VEHICULOS		CANTIDAD OBJETIVOS		DEMANDA	
				SIN RESET. TEMP	CON VENTANAS DE TIEMPO		HOMOGENEA	HETEROGENEA	MONO OBJETIVO	MULTI OBJETIVO	DETERMINIST.	ESTOCASTICA
Shiguihara & Valverde [2008]	X		5	X		10		X		X		X
Suarte et al. [2008]	X		18	X		400	X		X		X	
Cruz & Díaz [2009]	X		25		X	25	X		X		X	
Litvinchev & Velarde [2009]		X	304		X	45		X		X	X	
Salazar & Ruiz [2009]	X		208	X		140	X		X		X	
Pérez Cruz & Muro Cortes [2009]	X		1152	X		57		X		X		X

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 10: MATRIZ DE DISTANCIA RELATIVA

Voltaje	km	P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	P	.....	1.174	5.502	3.701	7.774	20.41	3.421	3.881	12.43	1.802	7	3.621	1.822	4.362	4.25	18.98	2.805	0.958	1.949
2	1		.....	4.46	2.8	6.85	21	2.4	2.84	12.25	1.62	6.98	2.65	0.73	3.41	3.2	17.85	1.78	1.56	0.94
2	2			....	1.773	2.302	18.89	2.107	3.851	14.01	6.412	11.845	2.218	4.617	5.687	3.807	12.34	5.476	4.523	4.163
3	3				.....	4.06	18.2	0.35	2.08	13.13	4.22	9.69	0.46	2.86	4	2.05	12.95	3.67	2.81	2.6
2	4					.....	21.192	4.409	6.153	16.31	8.714	14.147	4.52	6.919	7.989	6.109	11.02	7.778	6.825	6.465
3	5						.....	18.55	20.28	15.6	21.77	26.76	18.66	20.46	21.97	20.25	18.34	21.4	19.44	20.16
3	6							....	1.728	12.76	3.929	9.363	0.338	2.49	3.624	1.67	14.43	3.4	2.748	2.052
2	7								....	13.73	4.45	9.79	1.79	2.26	2.14	0.37	13.33	1.74	2.88	2.69
3	8									.....	13.19	17.971	13.098	13.505	15.11	13.932	26.349	14.408	12.142	13.056
3	9										....	5.68	4.13	2.32	4.88	4.83	14.69	3.27	2.35	2.47
3	10											...	9.647	7.83	9.959	10.456	23.75	9.1	7.78	8.304
3	11												...	3.22	3.76	1.56	13.41	3.39	2.7	3.06
3	12													...	2.684	2.762	16.878	1.038	1.771	0.432
3	13														....	2.1	16.95	1.61	3.43	2.47
3	14															.....	16.434	2.053	3.246	2.395
2	15																....	16.62	15.76	15.55
3	16																	...	2.997	1.313
3	17																		.....	1.42
3	18																			....
3	19																			
3	20																			
3	21																			
3	22																			
3	23																			
3	24																			
3	25																			
2	26																			
1	27																			

Voltaje

1. Nivel Primario (Afectaciones de Circuitos o partes de circuitos)
2. Nivel Secundario (afectaciones en transformadores a nivel de cuadra)
3. Nivel Secundario (afectaciones en las casas)

Dia de estudio: 9/06/09

ANEXO 11: RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN DE PROBLEMAS DE ENRUTAMIENTO

Casewise Statistics											
Case Number	Actual Group	Highest Group					Second Highest Group			Discriminant Scores	
		Predicted Group	P(D>d | G=g)		P(G=g | D=d)	Squared Mahalanobis Distance to Centroid	Group	P(G=g | D=d)	Squared Mahalanobis Distance to Centroid	Function 1	
			p	df							
Original	1	1	2(**)	.637	1	.616	.223	1	.384	1.166	-.886
	2	1	2(**)	.981	1	.763	.001	1	.237	2.335	-1.334
	3	1	1	.277	1	.947	1.179	2	.053	6.959	1.280
	4	1	1	.370	1	.931	.804	2	.069	5.996	1.091
	5	1	1	.939	1	.790	.006	2	.210	2.652	.270
	6	1	2(**)	.785	1	.836	.074	1	.164	3.330	-1.631
	7	2	1(**)	.516	1	.549	.422	2	.451	.815	-.455
	8	1	1	.922	1	.741	.010	2	.259	2.114	.096
	9	1	2(**)	.486	1	.531	.484	1	.469	.733	-.662
	10	1	2(**)	.490	1	.533	.477	1	.467	.742	-.667
	11	1	2(**)	.719	1	.854	.130	1	.146	3.657	-1.718
	12	1	2(**)	.802	1	.831	.063	1	.169	3.250	-1.609
	13	1	1	.647	1	.872	.210	2	.128	4.041	.652
	14	1	1	.922	1	.741	.010	2	.259	2.114	.096
	15	1	1	.947	1	.787	.004	2	.213	2.622	.261
	16	1	1	.846	1	.818	.037	2	.182	3.048	.388
	17	1	1	.930	1	.744	.008	2	.256	2.143	.106
	18	1	1	.174	1	.965	1.845	2	.035	8.471	1.552
	19	1	1	.263	1	.950	1.255	2	.050	7.141	1.314
	20	1	1	.000	1	1.000	31.835	2	.000	51.758	5.836
	21	2	2	.653	1	.870	.202	1	.130	4.006	-1.807
	22	2	2	.749	1	.846	.103	1	.154	3.505	-1.678
	23	1	1	.530	1	.898	.395	2	.102	4.755	.822
	24	2	2	.894	1	.804	.018	1	.196	2.840	-1.491

ANEXO11: (CONTINUACION)

Casewise Statistics										
Case Number	Actual Group	Highest Group					Second Highest Group			Discriminant Scores
		Predicted Group	df		P(G=g | D=d)	Squared Mahalanobis Distance to Centroid	Group	P(G=g | D=d)	Squared Mahalanobis Distance to Centroid	Function 1
			p	df						
112	1	1	.421	1	.750	.647	2	.250	2.844	1.009
113	1	1	.815	1	.545	.055	2	.455	.419	-.030
114	2	1(**)	.187	1	.825	1.741	2	.175	4.844	1.523
115	1	2(**)	.785	1	.652	.074	1	.348	1.332	-.950
116	2	2	.473	1	.735	.514	1	.265	2.555	-1.395
117	2	2	.483	1	.733	.493	1	.267	2.507	-1.379
118	2	2	.458	1	.739	.551	1	.261	2.636	-1.420
119	1	1	.420	1	.750	.652	2	.250	2.852	1.011
120	1	1	.420	1	.750	.652	2	.250	2.852	1.011
121	1	1	.420	1	.750	.652	2	.250	2.852	1.011
122	ungrouped	2	.513	1	.724	.428	1	.276	2.359	-1.332

** Misclassified case

Fuente: Uso del SPSS 13.

ANEXO 12: LÍNEAS DE CÓDIGOS DE LA HEURÍSTICA DEL BARRIDO

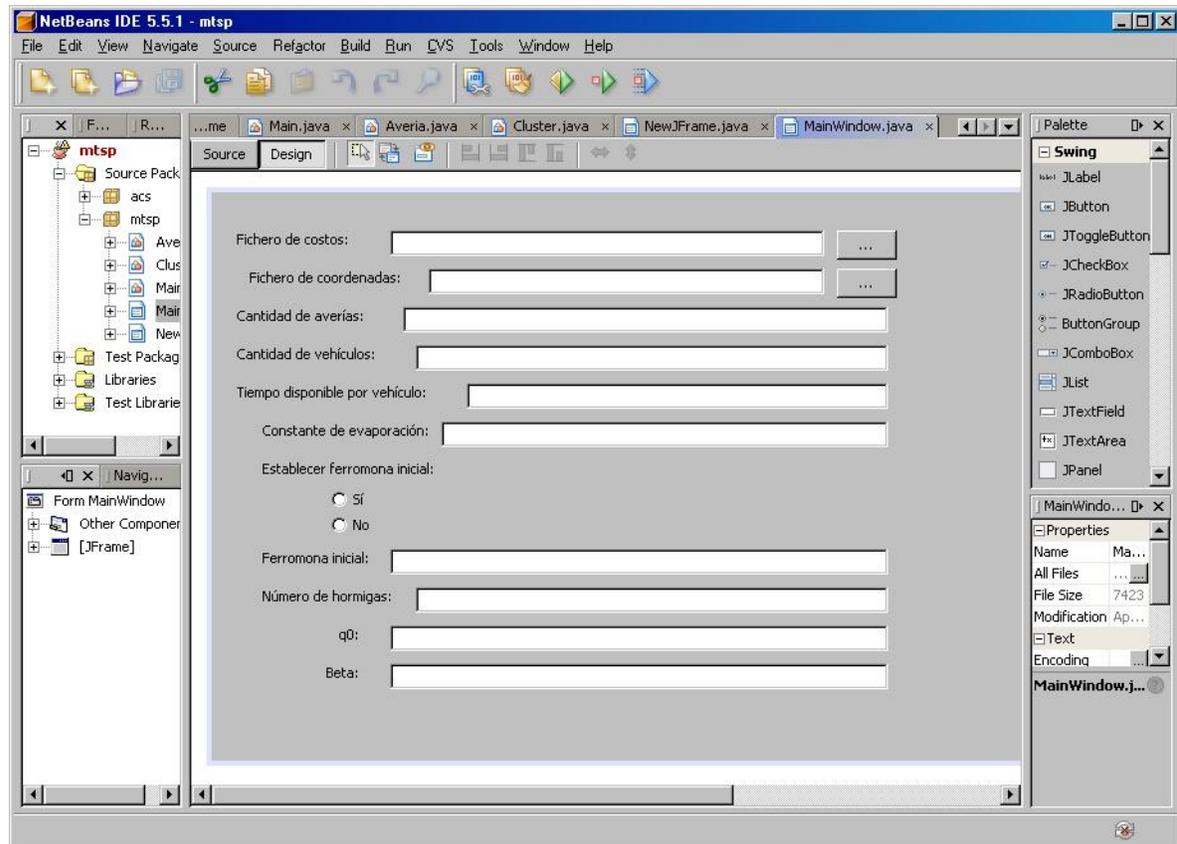
```
public Averia(int x, int y) {
    this.x = x;
    this.y = y;
    this.calculateAngle();
    this.time = this.generateTimeRaparation();
}

public Averia(int x, int y, int type) {
    this.x = x;
    this.y = y;
    this.calculateAngle();
    this.type = type;
    this.time = this.generateTimeRaparation();
}

public Averia(int x, int y, int type, int id) {
    this.x = x;
    this.y = y;
    this.calculateAngle();
    this.type = type;
    this.id = id;
    this.time = this.generateTimeRaparation();
}
```

Fuente: Elaboración propia a partir del java 1.5

ANEXO 13: PROPUESTA DE INTERFAZ PARA LA PLANIFICACION DE RECORRIDOS



Fuente: Elaboración propia a partir del uso del NetBean IDE 5.5.1

ANEXO 14: IMPLEMENTACIÓN DE LA CLASE PRINCIPAL PARA ACS

```
public Main(int numberAverias, File averiasFile,
           File weightFile) {
    this.averias = new Averia[numberAverias + 1];
    this.readAverias(averiasFile.getAbsolutePath());
    this.matrixWeight = new int[numberAverias + 1][numberAverias +
1];
    this.readDataFile(weightFile.getAbsolutePath());
}
```

```
private void readAverias(String filePath) {
    try {
        BufferedReader in = new BufferedReader(new
        FileReader(filePath));
        String[] tok = null;
        String line = null;
        int numberLine = 1;
        Averia a = new Averia(0, 0, 0, 0);
        this.averias[0] = a;
        while ((line = in.readLine()) != null) {
            tok = line.split("[ \\t]+");
            int x = Integer.parseInt(tok[0]);
            int y = Integer.parseInt(tok[1]);
            int t = Integer.parseInt(tok[2]);
            a = new Averia(x, y, t, numberLine);
            this.averias[numberLine++] = a;
        }
        in.close();
    } catch (IOException ex) {
        System.err.println(ex.getMessage());
    }
}
```

```
public int[][] subMatrixWeight(int[] subTour) {
    int[][] subMatrixWeight =
        new int[subTour.length][subTour.length];
    Arrays.sort(subTour);
    for (int i = 0; i < subTour.length; i++) {
        for (int j = i + 1; j < subTour.length; j++) {
            subMatrixWeight[j][i] = subMatrixWeight[i][j] =
                this.matrixWeight[subTour[i]][subTour[j]];
        }
    }
    return subMatrixWeight;
}
```

ANEXO 14: (CONTINUACIÓN)

```
public void addNode(int n, int t) {
    int[] temp = new int[this.array.length + 1];
    System.arraycopy(this.array, 0, temp, 0, this.array.length);
    temp[temp.length - 1] = n;
    this.array = temp.clone();

    temp = new int[this.times.length + 1];
    System.arraycopy(this.times, 0, temp, 0, this.times.length);
    temp[temp.length - 1] = t;
    this.times = temp.clone();
}
}
```

```
private int generateTimeRaparation() {
    int time = 0;
    switch (getType()) {
        case 1: {
            time = 45 + Math.abs(new Random().nextInt() % 15); // entre 45 y
60 min
            break;
        }
        case 2: {
            time = 20 + Math.abs(new Random().nextInt() % 15); // entre 20 y
35 min
            break;
        }
        case 3: {
            time = 10 + Math.abs(new Random().nextInt() % 10); // entre 10 y
20 min
            break;
        }
    }
    return time;
}
```

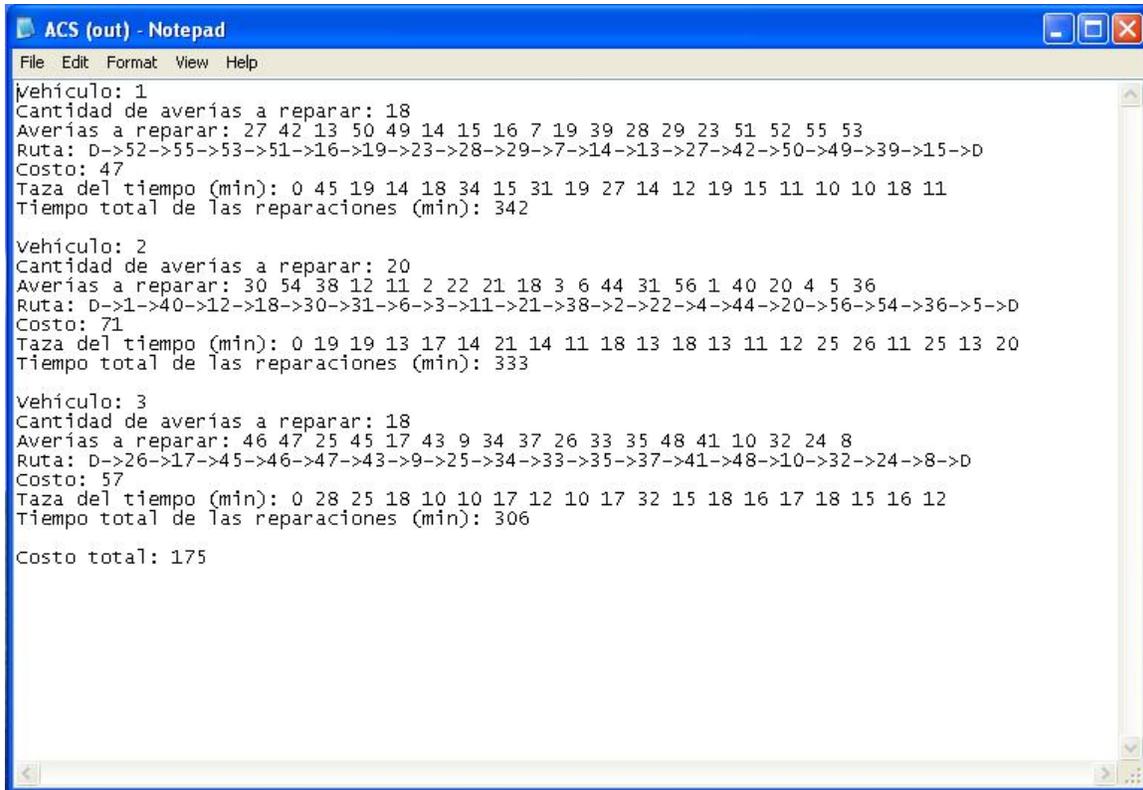
```
public int[] tipoAveria(int[] subTour) {
    Arrays.sort(subTour);
    int[] types = new int[subTour.length];
    for (int i = 0; i < types.length; i++) {
        types[i] = this.averias[subTour[i]].getType();
    }
    return types;
}
1
```

ANEXO 14: (CONTINUACIÓN)

```
public static void main(String[] args) {
    Main m = new Main(Integer.parseInt(args[0]), new File(args[1]),
        new File(args[2]));

    Cluster[] c = m.asignar(Integer.parseInt(args[3]),
Integer.parseInt(args[4]));
    Environment env;
    AcsTsp a;
    int totalCoste = 0;
    int totalTime = 0;
    for (int i = 0; i < c.length; i++) {
        totalTime = 0;
        System.out.println("Vehículo: " + (i + 1));
        System.out.println("Cantidad de averías a reparar: "
            + (c[i].array.length - 1));
        System.out.print("Averías a reparar: ");
        for (int j = 1; j < c[i].array.length; j++) {
            System.out.print(c[i].array[j] + " ");
        }
        System.out.println("");
        env = new Environment(c[i].array, m.tipoAveria(c[i].array),
            m.subMatrixWeight(c[i].array), Double.parseDouble(args[5]));
        a = new AcsTsp(env, Integer.parseInt(args[6]),
Long.parseLong(args[7]),
            Double.parseDouble(args[8]), Integer.parseInt(args[9]));
        a.printGlobalSolution();
        System.out.print("Taza del tiempo (min): ");
        for (int j = 0; j < c[i].times.length; j++) {
            totalTime += c[i].times[j];
            System.out.print(c[i].times[j] + " ");
        }
        System.out.println("");
        System.out.println("Tiempo total de las reparaciones (min): " +
totalTime);
        totalCoste += a.getBestGlobalSolution().coste;
        System.out.println("");
//        Object[] obj = a.executeAcs();
//        a.printGlobalSolution();
//        System.out.println("Number Estages: " + ((Integer) obj[1]).intValue());
//        System.out.println("Time (sec): " + ((Long) obj[0]).longValue() / 1000);
//        System.out.println("");
//        totalCoste += ((Double) obj[2]).doubleValue();
    }
    System.out.println("Costo total: " + totalCoste);
    System.out.println("");
//    System.out.println("Average coste: " + (int) totalCoste / c.length);
}
}
```

ANEXO 15: RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACION DE ACS



```
ACS (out) - Notepad
File Edit Format View Help
vehículo: 1
Cantidad de averías a reparar: 18
Averías a reparar: 27 42 13 50 49 14 15 16 7 19 39 28 29 23 51 52 55 53
Ruta: D->52->55->53->51->16->19->23->28->29->7->14->13->27->42->50->49->39->15->D
Costo: 47
Taza del tiempo (min): 0 45 19 14 18 34 15 31 19 27 14 12 19 15 11 10 10 18 11
Tiempo total de las reparaciones (min): 342

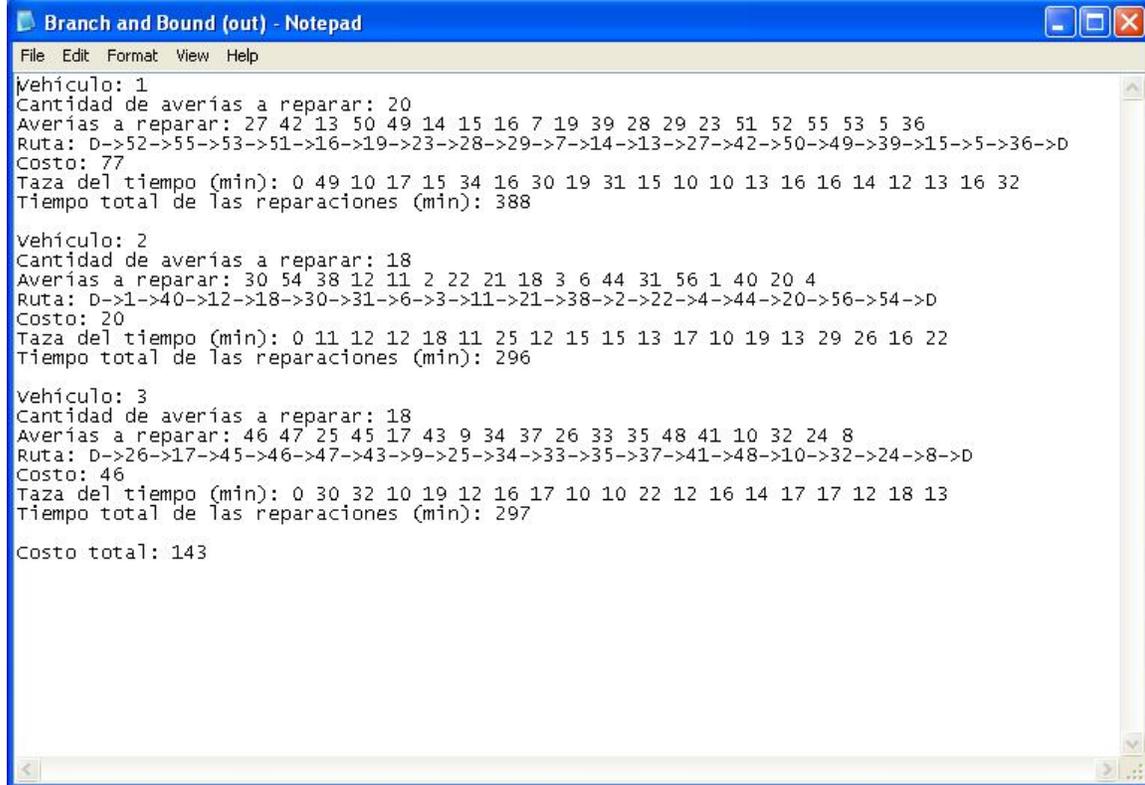
vehículo: 2
Cantidad de averías a reparar: 20
Averías a reparar: 30 54 38 12 11 2 22 21 18 3 6 44 31 56 1 40 20 4 5 36
Ruta: D->1->40->12->18->30->31->6->3->11->21->38->2->22->4->44->20->56->54->36->5->D
Costo: 71
Taza del tiempo (min): 0 19 19 13 17 14 21 14 11 18 13 18 13 11 12 25 26 11 25 13 20
Tiempo total de las reparaciones (min): 333

vehículo: 3
Cantidad de averías a reparar: 18
Averías a reparar: 46 47 25 45 17 43 9 34 37 26 33 35 48 41 10 32 24 8
Ruta: D->26->17->45->46->47->43->9->25->34->33->35->37->41->48->10->32->24->8->D
Costo: 57
Taza del tiempo (min): 0 28 25 18 10 10 17 12 10 17 32 15 18 16 17 18 15 16 12
Tiempo total de las reparaciones (min): 306

Costo total: 175
```

Fuente: Implementación java 1.5

ANEXO 16: RECORRIDOS POR VEHÍCULOS REPORTADO POR BRANCH AND BOUND



```
Branch and Bound (out) - Notepad
File Edit Format View Help
vehículo: 1
Cantidad de averías a reparar: 20
Averías a reparar: 27 42 13 50 49 14 15 16 7 19 39 28 29 23 51 52 55 53 5 36
Ruta: D->52->55->53->51->16->19->23->28->29->7->14->13->27->42->50->49->39->15->5->36->D
Costo: 77
Taza del tiempo (min): 0 49 10 17 15 34 16 30 19 31 15 10 10 13 16 16 14 12 13 16 32
Tiempo total de las reparaciones (min): 388

Vehículo: 2
Cantidad de averías a reparar: 18
Averías a reparar: 30 54 38 12 11 2 22 21 18 3 6 44 31 56 1 40 20 4
Ruta: D->1->40->12->18->30->31->6->3->11->21->38->2->22->4->44->20->56->54->D
Costo: 20
Taza del tiempo (min): 0 11 12 12 18 11 25 12 15 15 13 17 10 19 13 29 26 16 22
Tiempo total de las reparaciones (min): 296

Vehículo: 3
Cantidad de averías a reparar: 18
Averías a reparar: 46 47 25 45 17 43 9 34 37 26 33 35 48 41 10 32 24 8
Ruta: D->26->17->45->46->47->43->9->25->34->33->35->37->41->48->10->32->24->8->D
Costo: 46
Taza del tiempo (min): 0 30 32 10 19 12 16 17 10 10 22 12 16 14 17 17 12 18 13
Tiempo total de las reparaciones (min): 297

Costo total: 143
```

Fuente: Implementación java 1.5