

# Capítulo 7

## Conclusiones y Trabajos Futuros

---

En este capítulo se presentan las aportaciones de esta investigación y se sugieren direcciones para trabajos futuros.

### 7.1 Conclusiones

En este trabajo de investigación se muestra que es factible resolver el problema de transporte de productos que se presenta en empresas del mundo real, mediante una metodología de solución basada en algoritmos heurísticos. En particular se abordó la gestión de transporte de una compañía de productos embotellados, que por razones de confidencialidad se denomina EMPRO.

Como resultado de la implementación de la metodología se construyó un sistema de transporte (TSHA, Transportation System Based on Heuristic Approaches) que utiliza los algoritmos de sistema de colonias de hormigas (ACS, Ant Colony System) y distribución de productos (DiPro) para resolver las tareas que integran al problema general de transportación (RoSLoP, Routing-Scheduling-Loading). ACS resuelve simultáneamente las tareas de definición de rutas, asignación de rutas a vehículos y asignación de horarios de recorrido a vehículos, como un problema de enrutamiento de vehículos (VRP, Vehicle

Routing Problem). DiPro realiza la asignación de cargas a vehículos con un enfoque similar a la planificación de uso del procesador de una computadora.

Las principales contribuciones de esta tesis en el ámbito científico son:

- El diseño un marco de solución, para situaciones reales del problema de transporte, que integra el análisis de problemas clásicos que se encuentran en la comunidad científica tales como VRP y la planificación del uso del procesador. La metodología que incorpora este marco de solución se describe en el capítulo 5.
- La identificación de dos nuevas variantes VRP que no han sido consideradas en ningún otro trabajo de investigación: CCVRP y DDVRP. La primera especifica que los clientes tienen una capacidad limitada para recibir vehículos y la segunda que los almacenes pueden hacer pedidos Una descripción detallada de estas nuevas variantes se puede ver en la sección 2.4.1.
- La definición de una variante VRP para productos embotellados (BPVRP, Bottled Product Vehicle Routing Problem). En la comunidad científica a este tipo de problemas se les conoce como variante Rich VRP, debido a que involucra un conjunto de variantes básicas VRP. El conjunto de restricciones de transportación que involucra BPVRP no se ha abordado en su totalidad en ningún otro trabajo de investigación. La Tabla 2.1 resume las propiedades de las variantes VRP asociadas a BPVRP: CVRP, OVRP, MDVRP, VRPM, HVRP, PVRP, VRPTW, VRPMTW, sdVRP, SDVRP, CCVRP y DDVRP.
- La formulación de un modelo matemático de programación lineal entera que describe las tareas de enrutado y programación de horarios del problema RoSLoP. En el capítulo 4 se presenta la función objetivo y restricciones que componen al modelo.
- El diseño de un algoritmo heurístico (ACS), basado en un enfoque de optimización de colonias de hormigas, que resuelve las tareas de enrutado y asignación de

horarios. De manera incremental, este algoritmo construye las rutas y horarios usando información heurística de vehículos y clientes, y la calidad de la construcción realizada. Las reglas de construcción propuestas y el algoritmo ACS se describen en la sección 5.2.

- El diseño un algoritmo de solución que permite resolver la tarea de asignación de carga, empleando la estrategia Round Robin comúnmente usada en planificación del procesador. La sección 5.3 presenta la descripción de este algoritmo proximado determinista.

Por otro lado, a través de los resultados experimentales obtenidos se logró concluir lo siguiente:

- Fue posible automatizar la solución de casos reales del problema RoSLoP a través de técnicas heurísticas, conservando el estándar de eficiencia requerido por la compañía EMPRO. Una revisión de los estándares de eficiencia se presenta en la sección 6.2.
- En contraste con la solución manual de casos reales RoSLoP, TSHA redujo en el 100% de los casos de prueba, el tiempo requerido para dar una solución. La disminución fue de 16 horas a 10 minutos. Además, TSHA logró reducir el número de vehículos usados en la solución manual, en un 20% de los casos de prueba. La Tabla 6.20 presenta estos resultados.
- El algoritmo ACS superó al algoritmo clásico NN al satisfacer en el 100% de los casos de prueba todas las demandas de los clientes, y al emplear en un 92.3% de las instancias una cantidad de vehículos menor a la disponible, dentro del tiempo límite establecido por EMPRO. Las Tablas 6.18 y 6.19 detallan los resultados que permitieron obtener los indicadores de calidad.

- El algoritmo NN no satisfizo los estándares de eficiencia requeridos por EMPRO. Las demandas fueron cubiertas en sólo 46.1% de los casos. En la sección 6.2.5 se analizan resultados y se llega a esta conclusión.
- La calidad de la solución dada por el algoritmo ACS depende del tiempo de ejecución permitido para la tarea de búsqueda de soluciones, mientras mayor sea existe la posibilidad de mejorar la solución final. La Tabla 6.19 y Figura 6.5 muestran este comportamiento.

## 7.2 Trabajos Futuros

Para dar continuidad a este trabajo de investigación se sugieren los siguientes proyectos:

- Ampliar la descripción de situaciones reales a través del uso de otras variantes no consideradas en el presente trabajo.
- Desarrollar métodos que validen los casos de prueba presentados en la comunidad científica, para comparar el desempeño de la metodología desarrollada con lo reportado en otros trabajos de investigación.
- Desarrollar un mecanismo heurístico que permita la consecución simultánea de diversos objetivos planteados para definir una solución óptima, entre ellos: minimizar el número de vehículos y minimizar el costo total de los recorridos realizados por los vehículos.
- Incorporar un análisis del problema clásico de empaquetado (BPP, BinPacking Problem) para la solución de la tarea de configuración de carga de RoSLoP, con el propósito de mejorar el mecanismo de solución empleado actualmente, el cual se basa en el conocimiento que el usuario experto tiene del problema.
- Desarrollar un mecanismo para usar los espacios de los contenedores que quedarán disponibles después de la asignación de cargas. En estos espacios se pueden acomodar los productos que no fueron acomodados por violar restricciones de colocación.