



ASISTENCIA DECISIONAL EN EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS

Yasel J. Costa Salas, Ingeniero Industrial, Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería Industrial y Turismo, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Carretera a Camajuaní Km 5½, Villa Clara, Cuba.
e-mail: yaselcs@uclv.edu.cu

René Abreu Ledón, Ingeniero Industrial, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Facultad de Ingeniería Industrial y Turismo, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Carretera a Camajuaní Km 5½, Villa Clara, Cuba.
e-mail: rabreu@uclv.edu.cu

Carlos Machado Osés, Ingeniero Industrial, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Facultad de Ingeniería Industrial y Turismo, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Carretera a Camajuaní Km 5½, Villa Clara, Cuba.
e-mail: carlosmo@uclv.edu.cu

Norge Coello Machad, Ingeniero Mecánico, Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Carretera a Camajuaní Km 5½, Villa Clara, Cuba.
e-mail: norgec@uclv.edu.cu

Recibido: 17/10/2009
Aprobado: 23/03/2010

Resumen / Abstract

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 heurísticos en problemas reales de enrutamiento de grandes dimensiones. Por otra parte, en un grupo no menos importante de investigaciones, se evidencian valiosas soluciones con algoritmos exactos y aproximados (los aproximados no serán abordados en esta investigación) aplicados a problemas de dimensiones inferiores. Es por ello que la motivación fundamental de esta investigación conduce a realizar un análisis previo a la optimización concreta de problemas reales de enrutamiento, con la finalidad de conocer en qué grupo de algoritmos (exactos o heurísticos) estará la posible solución de los mismos. En el trabajo se propone el uso de Análisis Discriminante, con vista a clasificar el área de solución para problemas reales de enrutamiento de vehículos en empresas cubanas.

The Vehicle Routing Problem (VRP) has been extensively studied by different authors, often specialists in the areas of Operations Research and Logistics. Sometimes this problem is so complex that it requires algorithms to find feasible solution in time with adequate quality. Several researches have shown the effective use of heuristic algorithms on vehicle routing for large dimension problem. Moreover, in a not least important researches solutions are demonstrated with exact and approximate algorithms (the approximate not be addressed in this research) applied to problems with lower dimensions. For that reason the aim is to make an analysis before optimization process of real VRP in order to know which group of algorithms (exact or heuristic) will be the possible solution of them. The paper proposes Discriminate Analysis in order to classify the solution area for a real VRP in Cuban Enterprise.

Palabras clave / Key words

Clasificación–Análisis Discriminante, Enrutamiento de Vehículos.

Classify Problems–Discriminate Analysis, Vehicle Routing Problem.

INTRODUCCIÓN

A nivel internacional se está de acuerdo con que la gestión logística se ha convertido en uno de los factores más importantes en la competitividad de una empresa, ya que puede determinar el éxito o el fracaso de la comercialización de un producto. La nueva realidad competitiva presenta un escenario en donde la flexibilidad, la velocidad de

llegada al mercado y la productividad, serán las variables clave que determinarán la permanencia de las empresas en los mercados.

Constantemente se realizan investigaciones con vista a mejorar el desempeño logístico de las organizaciones. Específicamente en las decisiones de enrutamiento de vehículos, las cuales constituyen un factor primordial para establecer diferencias en el desempeño de las empresas y garantizar un lugar relevante en el mercado. A pesar de que en este sentido se han venido obteniendo avances incesantes, todavía es necesario profundizar y ampliar en técnicas o herramientas que implementadas para modelos dinámicos, puedan resolver situaciones disímiles aún insaciables en muchas empresas tanto cubanas como extranjeras.

El desarrollo de la mayoría de las investigaciones consultadas en la literatura especializada se enfoca hacia la optimización concreta de un problema de enrutamiento dado [1], sin tenerse 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 [2] y [3], se plantean demostraciones teóricas en función de demostrar la complejidad P o NP (non-deterministic polynomial bounded, no polinomialmente acotado) de los problemas genéricos del VRP (*Vehicle Routing Problem*, por sus siglas en inglés), no encontrándose análisis enfocados a clasificar la complejidad de variantes de tamaño pequeño y mediano. Además puede apreciarse que su desarrollo se identifica mayormente con un método de solución previamente establecido, sin tenerse en cuenta condiciones de aplicación que permitan hacer efectivo el proceso de optimización. De modo similar, estudios realizados por [4], [5] y [6], entre otros, no incluyen en sus trabajos análisis de indicadores posterior al proceso de optimización que permitan validar definitivamente la selección de herramientas utilizadas.

En la presente investigación se manejan indistintamente dos áreas de solución para problemas de optimización, métodos exactos y métodos heurísticos; ambos enfocados a la solución de problemas de enrutamiento. Estas dos categorías de métodos integran la variable de clasificación para el Análisis Discriminante propuesto, además se midieron otras variables independientes mostradas en secciones posteriores del presente trabajo. El proceso de clasificación (solución exacta o heurística) fue aplicado para un problema real de enrutamiento, Reordenamiento del Transporte (Centralización) en el municipio de Yaguajay, provincia de Santis Spíritus.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo la asistencia decisional en el proceso de optimización referido al enrutamiento de vehículos, se desarrolló un procedimiento, mostrado en la Figura 1, el cual consta de dos etapas. En la primera de ellas se realiza un análisis previo a la optimización, donde se selecciona el método de solución (exacto o heurístico) y finalmente la segunda etapa consiste en facilitarle un grupo de propuestas de métodos de optimización para el caso de estudio dado, según la clasificación previamente realizada.

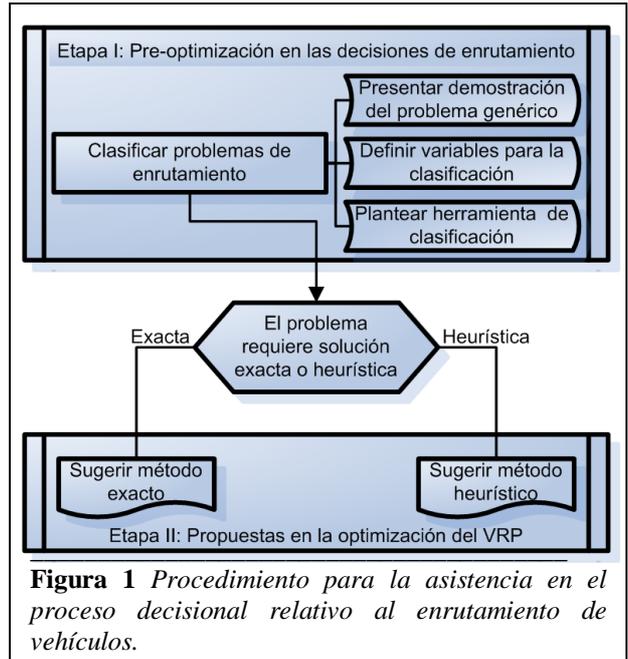


Figura 1 Procedimiento para la asistencia en el proceso decisional relativo al enrutamiento de vehículos.

Etapa I: Pre-optimización en las decisiones de enrutamiento

1 Clasificación del problema

En esta etapa se definirá el problema genérico del VRP, 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 heurística), proponiéndose Análisis Discriminante como herramienta para la clasificación de un problema de enrutamiento dado.

1.1 Demostración del problema genérico

El problema de enrutamiento de vehículos, como variante compleja del problema de transporte, puede definirse literalmente de la manera siguiente: se deben diseñar, a un mínimo costo, rutas que parten desde un depósito central hasta un conjunto de puntos geográficamente dispersos (clientes), los cuales presentan una demanda determinada y requieren de un parque de vehículos para ser atendidos, tal y como se muestra en la Figura 2.

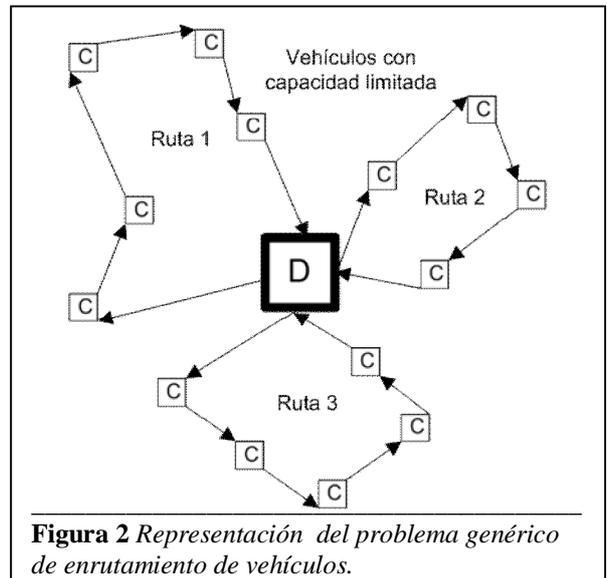


Figura 2 Representación del problema genérico de enrutamiento de vehículos.

ASISTENCIA DECISIONAL EN EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS

1.1.1 Formulación matemática

La modelación del problema sería: existe un grafo $G(V, E)$, donde $V = \{V_0, V_1, \dots, V_n\}$ representa todos los nodos del grafo y $E = \{(V_i, V_j) | V_i, V_j \in V, i < j\}$ indica los diferentes arcos del mismo. Se requiere de un grupo de “k” vehículos con capacidad homogénea “Q”, los cuales deben suplir las demandas de transportación “ q_i ” para cada “ V_i ” partiendo desde “ V_0 ”. Para los arcos “E” se establece una matriz de costo relativo $C = (c_{ij})$, donde se registra el costo de transportación desde el cliente “i” hasta el “j”, además existe un tiempo de servicio “ S_i ” en cada cliente. El objetivo es encontrar, a un costo mínimo, un conjunto de rutas $R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ en el cual estén incluidos todos los clientes “i”.

1.1.2 Complejidad computacional del problema de enrutamiento de vehículos (VRP)

En la literatura especializada, el término complejidad computacional puede ser encontrado en dos variantes: complejidad espacial y temporal [7]. 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 [8], [3], [9] y [10], han planteado que el problema de enrutamiento de vehículos es un problema NP. Se dice que un problema es NP cuando resulta altamente improbable que existan algoritmos que garanticen la obtención de soluciones óptimas en tiempos polinómicos [8]. El concepto de tiempo polinómico se puede expresar teniendo en cuenta que, en la medida que crecen numéricamente las 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: [3], [11] y [4], 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, las cuales permiten realizar múltiples comparaciones entre los tiempos de corridas.

Las comparaciones que se realizan no sólo 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 heurísticos [2] y otra comparando heurísticos con exactos [9]. 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 heurística 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 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 la componente “n” la complejidad temporal del problema crece de manera polinomial.

Elementos
3.4
1.3
6.4
.
.
.
n

Figura 3 Lista de “n” elementos.

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 $O(t \cdot 2^{n-1})$.

Como se aprecia en la Figura 4, 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.

Como fue demostrado anteriormente, el VRP 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 de acuerdo

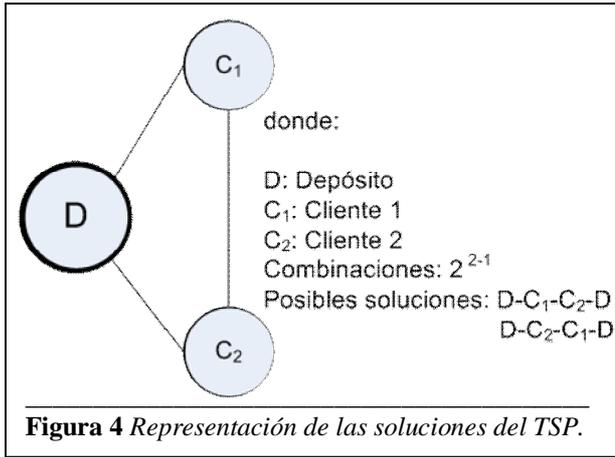


Figura 4 Representación de las soluciones del TSP.

con diversas investigaciones [12], [4], [2] y [13], se han planteado el uso de métodos heurísticos y meta-heurísticos. 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 matemáticamente complejas y, por ende, de poca aceptación por los decisores. 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 4. Para estas variantes se ha demostrado alcanzar mejor optimización de esta decisión a través de métodos exactos [12], sin embargo se desconocen valores umbrales para las 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 merita su formulación y posible solución a través de métodos exactos o heurísticos. Para ello se propone, en los pasos posteriores a esta etapa del procedimiento, realizar la clasificación de casos de enrutamiento de vehículos cualesquiera, de acuerdo con un grupo de variables, las cuales permitirían ubicar la solución del mismo con herramientas de optimización exacta o heurística.

1.2 Definición de las variables para la clasificación

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 en el campo heurístico.

Precisamente, la selección de las variables involucradas, las cuales se muestran en la Tabla 1, fue producto de un minucioso análisis de la literatura consultada, específicamente en [14], y de la valoración de los autores de la presente investigación.

La inclusión o no de una variable de clasificación va a depender de su influencia en la complejidad del problema. En ocasiones se aprecian 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 la complejidad de los problemas evidencian una perspectiva limitada, ya que existen otras variables que pueden tenerse en cuenta. Además no deben ser olvidadas las posibles interacciones entre las variables que definen la complejidad.

TABLA 1 Variables de clasificación		
Variables	Tipos	Instancias
Área de Solución	Dependiente	<ul style="list-style-type: none"> • Exacto • Heurístico
Ámbito Temporal (X ₁)	Independiente	<ul style="list-style-type: none"> • Sin restricciones temporales • Con ventanas de tiempo
Demanda de Clientes (X ₂)	Independiente	<ul style="list-style-type: none"> • Determinístico • Estocástico
Objetivo (X ₃)	Independiente	<ul style="list-style-type: none"> • Mono-Objetivo • Multi-Objetivo
Cantidad de Nodos (X ₄)	Independiente	Unidades
Cantidad de Vehículos (X ₅)	Independiente	Unidades
Características de los Vehículos (X ₆)	Independiente	<ul style="list-style-type: none"> • Homogéneo • Heterogéneo

Finalmente se decidió realizar el proceso de clasificación con las variables que aparecen en la Tabla 1, identificándose además las instancias de las mismas.

1.3 Planteamiento de la herramienta de solución

Para realizar la clasificación de los problemas de acuerdo a su solución exacta o heurística, se propone la utilización del método de Discriminante, el cual, a partir de un grupo de variables independientes y 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 área de solución heurística. Existen otros métodos de clasificación como los planteados por [15] y [1], 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.

Para la solución de este problema de clasificación, se propone la ecuación (1), la cual incluye todas las variables anteriormente aprobadas por los expertos.

$$D = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_6x_6 \tag{1}$$

donde:

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

b₁...b₆: Ponderaciones de las variables independientes.

ASISTENCIA DECISIONAL EN EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS

El proceso de clasificación depende de múltiples expresiones matemáticas, 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 los resultados del presente trabajo, se propone el desarrollo del proceso de clasificación mediante el uso del paquete estadístico SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*, por sus siglas en inglés), el cual permitirá la obtención eficaz y eficiente de los resultados.

Etapa II: Propuestas en la optimización del VRP

2.1 Sugerencias de métodos de optimización exacta o heurística

Luego de seleccionar el área de solución a la cual corresponde un problema de enrutamiento determinado acorde con su complejidad, es necesario seleccionar un método de optimización específico. De manera general, en las Tablas 2 y 3, se puede apreciar una breve descripción de algunos de los métodos existentes en ambas áreas de solución, de igual modo aparecen las principales condiciones para la aplicación de dichos métodos. Existen otros métodos para cada una de las categorías, pero en la investigación se relacionan los más utilizados.

TABLA 2 Resumen de algunos métodos exactos	
<i>Descripción del método</i>	<i>Consideraciones para su aplicación</i>
Programación Entera Mixta (PEM)	
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 (ver paso 1 de la primera etapa)	Linealidad en las funciones objetivos 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: habría que remodelar el problema para la inclusión de una nueva orden (no es funcional para variantes dinámicas del VRP)
Programación Dinámica	
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.	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.

Es recomendable analizar las características de dicho problema con las consideraciones de aplicación de cada método, con el objetivo de hacer una selección que cumpla

con los intereses del decisor y las características del problema a estudiar. Además, no se debe olvidar que pudiera seleccionarse más de un método para la posible solución del problema de optimización a tratar.

TABLA 3 Resumen de algunos métodos heurísticos	
<i>Descripción del método</i>	<i>Consideraciones para su aplicación</i>
Algoritmo Genético	
Generar una población de soluciones iniciales: Cada solución sería una configuración de rutas acorde con el problema general. Establecer operadores evolutivos: cruzamiento, mutación y selección. 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 objetivos ponderadas. Realizar generaciones hasta que se cumpla un determinado criterio de parada y escoger la mejor solución.	Funciona de manera factible para problemas 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
Sistema de Colonia de Hormigas	
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.	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

Es recomendable analizar las características de dicho problema con las consideraciones de aplicación de cada método, con el objetivo de hacer una selección que cumpla con los intereses del decisor y las características del problema a estudiar.

PARTE EXPERIMENTAL

Implementación de la base de conocimientos para distintas variantes del VRP

La construcción de la base de conocimiento (distintas variantes del VRP ya resueltas), ha sido resultado de la consulta en la literatura especializada y detallada en la Tabla 4, donde aparece un fragmento de dichos casos con sus características, métodos de solución, variables y referencias, en una estructura que puede ser utilizada por gestores de base de datos.

TABLA 4
Fragmento de la base de conocimiento

	Métodos		Variables	
	Heurístico	Exacto	Cantidad de nodos	Cantidad de vehículos
Aynos & Hernández [2008]	X		140	10
Wolfler Calvo & Colorni [2002]	X		180	15
Cordeau & Laporte [2002]	X		295	15
Desrosiers et al [1986]		X	40	8
Shiguihara & Valverde [2008]	X		500	10

En cada uno de 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. Finalmente la base de conocimiento la integran 18 soluciones pertenecientes a la categoría de exactos y 29 a la de heurísticos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caso de Estudio: Reordenamiento (Centralización) del transporte en municipio de Yaguajay. Sancti Spíritus.

En Cuba, se han dado pasos referidos al Reordenamiento del Transporte del cual no está excluida la empresa Base de Carga de Yaguajay. Precisamente para esta empresa se ha convertido en un verdadero reto la implementación de esta tarea, 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 cuán complejo pueda llegar a resultar la ejecución del mismo por las condiciones propias del problema. Para acometer la misma, se cuenta con una unidad de base central para los vehículos disponibles, que por consiguiente son de prototipos y capacidades diferentes y se pretende construir una red de nodos que incluyan los clientes establecidos a partir de una demanda variable que no siempre se comporta de la misma forma, debido a que el número de clientes diarios no es un

valor fijo. Todo ello con el objetivo de: evitar inversiones en nuevos medios de transporte, involucrar todo el transporte del municipio, planificar las entregas de productos reduciendo la cantidad de viajes e incrementar la explotación del medio con respecto a la carga a transportar, así como utilizar los medios idóneos para cada tipo de transportación por su índice de consumo, además de hacer combinar los viajes de ida con los de regreso. Las características resumidas y de acuerdo con las variables de clasificación previamente definidas se muestran en la Tabla 5.

TABLA 5
Valores de las variables para CASO I

CASO DE ESTUDIO: Reordenamiento (Centralización)

- Cantidad de Nodos: **1152**
- Ámbito Temporal: **Sin restricciones temp.**
- Cantidad de Vehículos: **57**
- Capacidad de los Vehículos: **Heterogénea**
- Cantidad de objetivos: **Multi-Objetivo**
- Demanda: **Estocástica**

La aplicación del Análisis Discriminante se desarrolla a partir de la implementación existente en el SPSS 13.0. Como bien se evidencia en la Tabla 6, se determinó precisamente que el área de solución para la información correspondiente al problema del Reordenamiento, era la heurística. Por tales motivos debe procederse en correspondencia con la segunda etapa del procedimiento, la selección y propuesta de una herramienta del área de solución heurística.

TABLA 6
Clasificación para el Caso de Estudio

Casewise Statistics		
Case Number	Actual Group	Predicted Group
38	1	1
39	1	1
40	1	1
41	1	1
42	1	1
43	1	1
44	1	1
45	1	1
46	1	1
47	1	1
48	ungrouped	1

** Misclassified case

Fuente: Uso del SPSS 13.0.

De acuerdo con las características del problema de Reordenamiento del Transporte resumidas en la Tabla 5, se decide elegir el Algoritmo de Sistema de Colonia de Hormigas, teniendo en cuenta que las características del caso se ajustan a las condiciones de aplicación del método, específicamente se hace necesario la construcción de las

ASISTENCIA DECISIONAL EN EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS

rutas a transitar por los vehículos de la empresa antes mencionada y la inclusión de las complejidades del problema tales como: tiempo de servicio en las entidades de los clientes, inserción de órdenes dinámicas, enrutamiento con flotas no homogéneas, múltiples destinos a partir de un depósito central y el enfoque multi-objetivo del mismo. En dicho enfoque se consideraron simultáneamente el máximo aprovechamiento de la capacidad de los vehículos y la mínima distancia recorrida por éstos.

Sin lugar a dudas, pudieran ser elegidos otros algoritmos heurísticos existentes en la literatura especializada, los cuales se ajustan a las características del caso de estudio. Además pudieran realizarse comparaciones entre dichos algoritmos, estableciéndose criterios tales como calidad de la solución (de acuerdo a los valores de las funciones objetivo) y tiempo en que se obtiene la soluciones, éstas comparaciones pueden desarrollarse a través del Análisis de Variancia, una de las de pruebas estadísticas más aplicada para éstos fines.

CONCLUSIONES

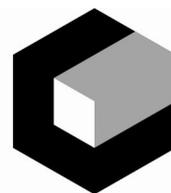
El desarrollo de la presente investigación permitió demostrar que el análisis de clasificación relativo a identificar el área de solución, exacta o heurística, para un problema de enrutamiento de vehículos dado, representa un aporte esencial para elevar la efectividad en el proceso de toma de decisiones, referido esencialmente al tratamiento de los problemas de optimización de acuerdo a sus complejidades. En este sentido la empresa contará con la información necesaria para la toma de decisiones de manera pertinente para dicha finalidad. Además resultará necesario dedicar investigaciones futuras a la modelación matemática del Caso de Estudio abordado en este trabajo, así como a la implementación del algoritmo Sistema de Colonia de Hormigas, con la finalidad de obtener resultados concretos para la empresa objeto de estudio. 📄

REFERENCIAS

1. VALVERDE, R. y GACHET, D. "Identificación de Sistemas Dinámicos Utilizando Redes Neuronales". [en línea]. 2007, Disponible en: <http://selafi.cdinet.uclv.edu.cu/abstract.php?id=12083&return=cmd>
2. AHUJA, R.K. et al. *Estudio de técnicas de búsqueda por vecindad a muy gran escala*. Florida: Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Universidad de Florida, 1999.
3. AYNOS AMBITE, A. y HERNÁNDEZ, L-P. *El problema del Comercio: análisis teórico y estrategias de resolución*. Madrid: Universidad Carlos III, 2008.
4. JAQUE PIRABÁN, R.A. *Métodos Aproximados para la Solución del Problema de Enrutamiento de Vehículos*. Colombia: [s.n.], 2008.
5. MAGUERA, N.G., ABENSUR, D. y PANACHO, A. *Búsqueda Dispersa aplicada al Problema de Rutas de Vehículos con Colecta y Entrega Simultaneo*. Zaragoza, España: [s.n.], 2007.
6. COLMENARES PERDOMO, D. *Implementación de una heurística para el problema de planeación de*

rutas con ventanas de tiempo en sistemas de distribución. Bogotá: Febrero 6, 2002.

7. HSU, W.J. y HUANG, S.Y. "Route planning of automated guided vehicles". En: *Proceedings of the Intelligent Vehicles Conference* ([s.l.]: 1994) 479-485. [fecha de consulta: Disponible en:
8. GAREY, M. R. y JOHNSON, D.S. . *Computers and intractability, A Guide to the theory of NP-Completeness*. New York. USA: W.H.Freeman and Company, 2003.
9. DÍAZ PARRA, O. y CRUZ CHÁVEZ, M.A. *El Problema del Transporte*. Cuernavaca, Morelos: Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, 2006.
10. COY CALIXTO, C.A. "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. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, 2005.
11. LAPORTE, G. et al. *Classical and Modern Heuristics for the Vehicle Routing Problem*. Montréal Canada: Les Cahiers du GERAD, 1999.
12. CORONA, J.A. *Hiperheurísticas a través de programación genética para la resolución de problemas de ruteo de vehículos*. México: Tecnológico de Monterrey. Ed. Monterrey, 2005.
13. DORIGO, M. y STUTZLE, T. *Ant Colony Optimization*. Cambridge, MA: MITPress/Bradford Books, 2004.
14. FERNÁNDEZ, E. *Itinerarios de Vehículos. ALFA-Loglly: Logística Inversa y gestión respetuosa con el Medio Ambiente*. [s.l.]: Programa ALFA II de la Comunidad Europea, 2006.
15. SEGOVIA VARGAS, M.J. et al. *La metodología Rough Set frente al Análisis Discriminante en los problemas de clasificación multiatributo*. Madrid, España: [s.n.], 2003.



Instituto Superior Politécnico
José Antonio Echeverría
cujae