

## **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PLANIFICACION DE RUTAS. APLICACION A POLIGONOS INDUSTRIALES DE BURGOS.**

Justo del OLMO ARIAS

Dpto. ECONOMIA Y ADMINISTRACION DE EMPRESAS

Joaquin A. PACHECO BONROSTRO

Dpto. ECONOMIA APLICADA (MATEMATICAS EMPRESARIALES)

E.U.E.EMPRESARIALES DE BURGOS.

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

### **1.- Los Algoritmos de Rutas de Vehículos**

El corazón de los sistemas de diseño de rutas y planificación de transporte es, fundamentalmente el desarrollo de un algoritmo adecuado a las características de los problemas que trata de abordar el sistema.

En este sentido, el campo de Rutas de Vehículos se ha distinguido por una relación altamente exitosa entre las técnicas algorítmicas y el desarrollo de sistemas de rutas y transportes efectivos para la industria. Como consecuencia en la última década se ha desarrollado una gran cantidad de experiencias con rutas de vehículos.

Por una parte, los investigadores operativos, incluso los que realizaban un trabajo meramente académico, han ido más allá del simple diseño y desarrollo de algoritmos pasando a jugar un papel importante en la programación de sistemas de rutas. Por otro lado, el desarrollo de Hardware y Software para ordenador y, su incorporación a las actividades y operaciones comerciales han

posibilitado un gran conocimiento de los potenciales beneficios de las técnicas de rutas de vehículos.

Pero si las rutas de vehículos constituyen un éxito histórico de la Investigación Operativa buena parte de este éxito debe ser atribuido a la efectiva modelización e implementación: la llave de este éxito ha sido traído por la potencia de los algoritmos y las capacidades de los ordenadores capaces de 'soportar' la programación de algoritmos para modelos que mantienen un alto grado de realismo; o dicho con otras palabras: la clave del éxito de las técnicas algorítmicas para rutas de vehículos, ha sido la captación e incorporación de características del mundo real y del entorno del problema real que se está tratando, sin que ello dificulte o impida su tratamiento mediante ordenador.

Desde este punto de vista los métodos de Programación Matemática y de Optimización Combinatorial existentes para el diseño de algoritmos de rutas de vehículos, son, en su mayor parte, una simple mejora, o mejor dicho, sofisticación de las técnicas de solución para el Problema del Vendedor Ambulante (T.S.P.).

En este sentido, y relacionado con lo anteriormente dicho, el camino que se está siguiendo actualmente, es el desarrollo de algoritmos heurísticos para la solución de estos problemas, es decir algoritmos que no garantizan la obtención del óptimo, sino una solución cercana a este, frente a los algoritmos exactos, que si la garantizan. Las razones son claras: en primer lugar el tiempo de resolución es sustancialmente mucho menor, y en segundo lugar son mucho más fáciles de adaptar al mundo real, y de incorporar todos cambios que se produzcan en la estructura del problema, y esta segunda razón, recordemos, es la principal del éxito de las rutas de vehículos.

Muchos autores se han dedicado a desarrollar algoritmos de este tipo a lo largo de los últimos años. Podemos destacar lo siguientes: GILLET & MILLER, GOLDEN, BOLDIN & BERMAN, CLARK & WRIGTH, CRHISTOFIDES & EILON, KROLACK & FELTS,...

Quizás, entre los más recientes, cabe destacar el desarrollado por FISHER & JAİKUMAR, con evidente éxito, y el desarrollado por PSARAFTIS, SALOMON, MAGNANTI y KIM. (ver referencias)

En esta comunicación vamos a plantear un problema de rutas concreto: una empresa de transporte, contratada por una fábrica de coches, debe recoger con una serie de vehículos preparados al efecto, en una serie de puntos material de diversa índole que se fabrica semanalmente para la construcción de los automóviles, y llevarlos a la fábrica central para la composición de estos.

Para la elección de un algoritmo que se adapte a las características de este modelo se ha elegido, como se comentará más adelante, las variantes del desarrollado por Little y Eastman.(Ver referencias).

## **2.- ESTABLECIMIENTO DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS PROBLEMAS**

Las características principales de la mayor parte de los problemas de rutas en las que podría fijarse para un tratamiento adecuada son muchas y variadas. De cualquier forma, se pueden resumir, como en nuestro caso, en los siguientes puntos:

- Localizaciones de los puntos de recogida y su entorno geográfico: puntos distribuidos en diferentes ciudades o dentro de un mismo casco urbano, calles o carreteras en una o en dos direcciones, densidad del tráfico existente....
- Tipo de ruta requerida: abierta, los puntos origen y final de la ruta no tienen por que coincidir; o cerrada, la mercancía recogida en los diferentes puntos debe ser llevada al almacén de donde sale el vehículo.

- Existencias de 'Ventanas de Tiempo' en cada una de las fábricas de recogida; es decir, intervalos de tiempo en los que debe ser visitada por el vehículo: No se debe llegar más tarde que el tiempo de cierre de esa fábrica; por otra parte si se llega antes se debe esperar hasta su apertura. Pudiera haber más de una ventana de tiempo por punto de recogida (horarios de mañana o tarde), ventanas semiabiertas (sin horas fija de apertura o cierre).
- Cantidades a recoger, y tipo de mercancía: Estas características van a delimitar el número de los vehículos a usar y las características de estos.
- Función que interesa optimizar: La distancia total requerida, el tiempo total empleado, el número de vehículos empleados, el tiempo de conducción, el tiempo de espera ...

Además, en relación con este último punto, se debe tener muy presente y muy definidos todos los aspectos económicos que intervienen en el problema. Por ejemplo, en algunos casos puede ser *conveniente* llegar con retraso a algún punto de recogida si la ruta resultante resulta ser mucho más económica que la que se obtendría si respetamos estrictamente todas las ventanas de tiempo: el coste de penalización o la valoración de la pérdida de imagen son menores que el ahorro que se obtiene.

De forma más resumida, hay tres grandes grupos de aspectos en los que debemos fijarnos a la hora de tratar un problema de este tipo: Aspectos Espaciales, Aspectos Temporales y Aspectos Económicos.

En nuestro caso las localizaciones de los puntos de recogida y almacén central, están situadas dos polígonos industriales en las afueras de la ciudad de Burgos. Las carreteras que comunican dichos puntos son de doble dirección, aunque hay que contemplar la posibilidad de cambios temporales como corte de calles o dirección única en alguna de estas carreteras, disminución de la velocidad de conducción en periodos de mucho tráfico urbano e interurbano...

Por contrapartida, los problemas que se abordan se simplifican al ser los horarios de apertura y cierre igual para todos los puntos de recogida. Además, la mercancía que se recoge en los diferentes centros es homogénea, compatible y normalmente inferior a la capacidad del vehículo en conjunto.

Por otra parte las distancias habitualmente recorridas y la velocidad de conducción indican que los recorridos que se realizan no tienen problemas en llegar a tiempo a cada uno de los diferentes destinos. En cualquier caso es importante tener presente los márgenes con que se cuenta.

Por consiguiente el algoritmo que se va a incorporar al diseño de estos sistemas será uno que determine una sola ruta para la visita de varios puntos sin tener en cuenta la carga total a recoger, ya que siempre será menor que la capacidad total del vehículo, y teniendo presente los márgenes de tiempo de visita en cada una de las fábricas.

Por último en la elección del algoritmo se debe tener en cuenta la urgencia o no del usuario en obtener la solución. En cuanto a este aspecto se pueden dar dos casos: en uno se desea una solución buena pero de forma urgente; para este caso se recomienda el uso de un algoritmo heurístico. En un segundo caso, se cuenta con tiempo suficiente para esperar que el sistema determine la mejor de las soluciones, para lo cual se recomienda el uso de un algoritmo exacto.

### **Diseño del Sistema**

Los grandes pasos que hay que realizar para el diseño de un sistema informático para el tratamiento de problemas de este tipo son los siguientes:

- 1.- Establecimiento de la red subyacente. Esta red se determina a partir de un plano o mapa del entorno geográfico donde se sitúan los puntos del problema. Se van a definir como nodos de esta red los cruces de calles y carreteras por una parte y las fábricas a ser visitados por otra. Estos nodos van a ser enumerados. Como arcos se van a tomar las calles o tramos que unen dichos nodos.

2.- Construcción de Ficheros de Datos. En nuestro caso son los siguientes:

A) Fichero con la descripción de la red subyacente. Tiene que incluir los siguientes datos

Número de nodos totales

Número de arcos totales

Definición de cada arco: Nodo inicial y final, longitud. Se pueden añadir otros parámetros como velocidad máxima de conducción,...

B) Fichero con las coordenadas de los nodos de la red subyacente. Estas coordenadas se establecen por la posición de dichos nodos en la imagen digitalizada del mapa en un monitor gráfico adecuado.

C) Fichero con la Imagen digitalizada del mapa. Estos dos últimos fichero sirven para el apoyo a los gráficos de las soluciones que de el sistema.

3.- Diseño, si no existiera, y Programación de algoritmos de rutas adecuados a estos problemas.

Más concretamente en nuestro caso, se usaran los siguientes:

- Algoritmo para la solución del problema del camino mínimo entre los nodos de una red. Normalmente se utilizan los algoritmos de Dijkstra o el de Floyd.

- Algoritmo Exacto de problemas de Rutas: Normalmente estos son de tipo Branch & Bound. En este caso se ha elegido una variante del algoritmo de Little para el problema del viajante.

- Algoritmo Heurístico: En este caso se trata de un algoritmo de *búsqueda incompleta* desarrollado a partir del algoritmo Branch & Bound anterior. (Ver referencias).

4.- Integración de los elementos anteriores en un procedimiento general que, de forma secuencial realice los pasos que se muestran en el apartado siguiente.

### **3.1.- Descripción del Procedimiento General del Sistema**

Paso 1.: Lectura de los ficheros de datos.

Paso 2.: Preguntar si hay cambios temporales en la red. Estos cambios se refieren a los siguientes puntos:

- 2.1. Número de nodos
- 2.2. Arcos que se quitan (Calles cortadas)
- 2.3. Arcos que se añaden (Tramos nuevos)

Si hay cambios temporales estos deben ser leídos para las operaciones posteriores.

Paso 3.: Leer Datos del problema. Van a ser los siguientes:

- Número de puntos de recogida incluyendo el almacén central.
- Tipo de ruta que se desea realizar: abierta o cerrada.
- Números o índices de los nodos correspondientes a esas fábricas. Se ha de especificar cual es el índice correspondiente al punto inicial (rutas abiertas y cerradas), y al punto final (rutas abiertas).
- Ventanas de tiempo: Horas de apertura y cierre en cada fábrica.
- Hora máxima de llegada al destino.
- Tiempo de carga en cada punto de recogida.
- Velocidad media de los vehículos en dicho marco geográfico.
- Arcos con velocidad limitada en el periodo de tiempo de la ruta.

Paso 4.: Hallar la matriz de distancia entre los puntos de visita del problema. Para ello se usa el algoritmo para el *problema del camino mínimo* en una red previamente seleccionado. Con este algoritmo se halla la distancia mínima entre cada par de puntos que intervienen en el problema.

Como se verá más adelante, es conveniente *guardar* o *registrar* cada uno de los caminos que da esta distancia mínima entre cada par de puntos.

Paso 5.: Elección del algoritmo de rutas adecuado, según lo comentado anteriormente: Exacto si disponemos de mucho tiempo para obtener una solución precisa, o Heurístico si se precisa una solución urgente.

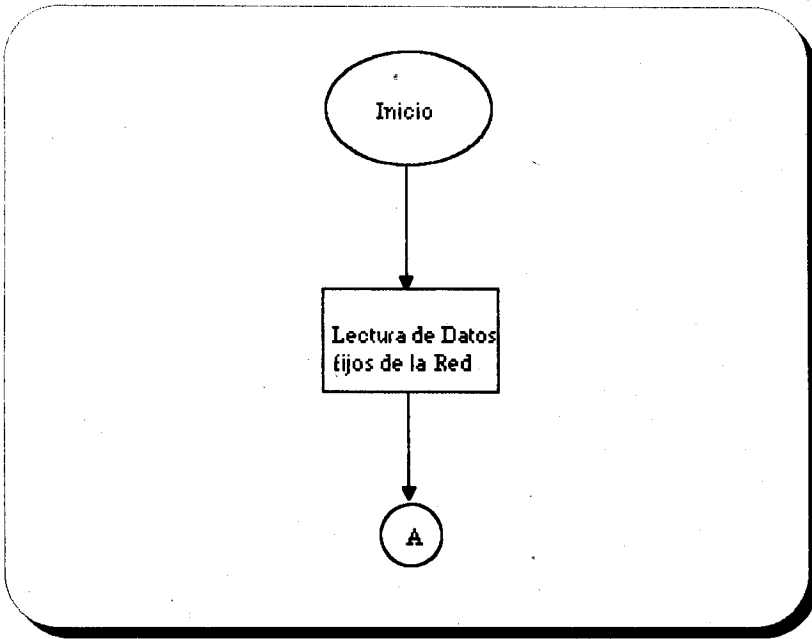
Paso 6.: Uso del algoritmo elegido para hallar la ruta adecuada. En realidad el algoritmo establece un orden de visita de los puntos de recogida. Para formar la ruta entera, este orden de visita se completa con los nodos o puntos de paso que hay entre cada par de fábricas, previamente hallados en el paso 4.

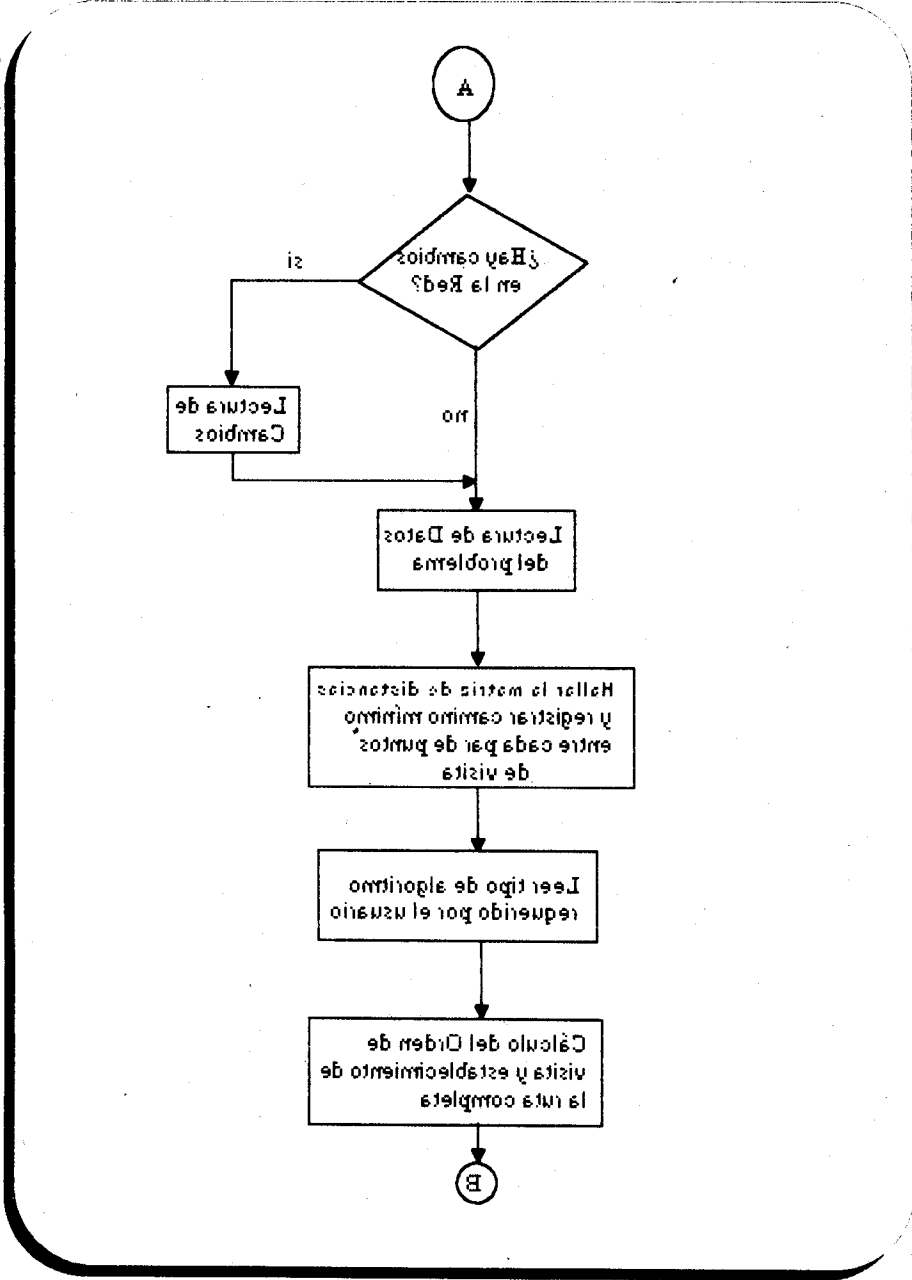
Paso 7.: Una vez determinada la ruta: Establecer los horarios mínimos de salida, tiempo previsto y el margen de tiempo con que se cuenta.

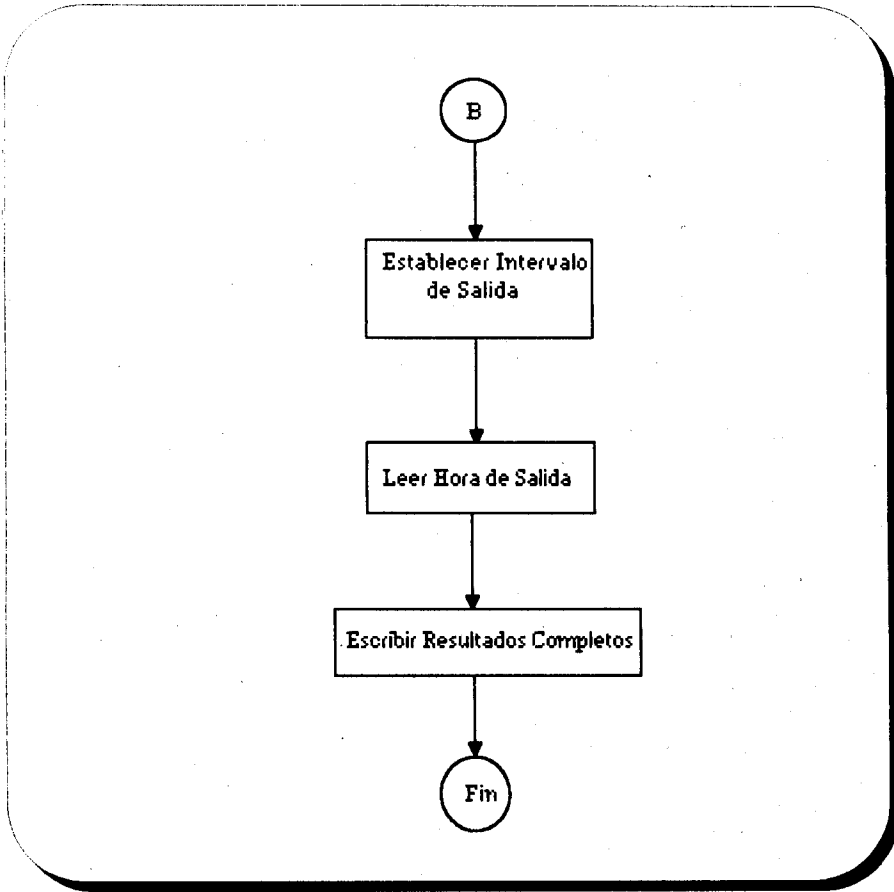
Paso 8.: Elegir el tiempo de salida elegido por el usuario: este no debe ser anterior al horario de salida mínima establecido en el paso 6, ni superar el margen mínimo.

Paso 9.: Escribir los resultados: Ruta completa con horarios y tiempos estimados de visita. La salida de resultados puede ser por pantalla, o por impresora. En el primer caso los resultados deben ir acompañados de la incorporación de un gráfico de la ruta obtenida sobre el mapa digitalizado.









## Referencias y Bibliografía

- ALVAREZ LASTRA, G.  
"Racionalización y Optimización del Transporte".  
Fundación CONFEMENTAL. Curso: *La Función del Transporte*.
- ARAGON, A. y PACHECO, J.  
"Desarrollo de Algoritmos Heurísticos Mejorados para el TSP".  
VI Congreso de ASEPELT-ESPAÑA, GRANADA 1992.
- ASSAD, A.A., and GOLDEN, B.L. (eds.)  
"Vehicle Routing Problem. Methods & Studies".  
Nort-Holland (1.988).
- CHRISTOFIDES, N., MINGOZZI, A., TOTH, P. and SANDI, C. (eds.) (1.979)  
"Combinatorial Optimization".  
Wiley.
- FISHER, M.L. and JAIKUMAR, R. (1.981)  
"A Generalized Assignment for Vehicle Routing".  
*Networks*. Vol. 11, nº 2. John Wiley & Sons.
- GOLDEN, B.L. and BODIN, L.D. (1.981)  
"Clasificación in Vehicle Routing & Scheduling".  
*Networks*. Vol. 11, nº 2. John Wiley & Sons.
- HU, T.C. (1.982)  
"Combinatorial Algorithms"  
Addison-Wesley.
- INFANTE, R. (1.977)  
"Métodos de Programación Matemática".  
UNED.
- LAWLER, E.L., LENSTRA, J.K., RINNOY KAN, A.H.G. and SHMOYS, D.B. (Editores) (1.985)  
"The Traveling Salesman Problem".  
Wiley.
- LITTLE, J.D.C., MURTY, K.G., SWEENEY, D.W. and KAREL, C. (1.963)  
"An Algorithm for Traveling Salesman Problem".  
*Oper. Res.* 11, 972-989.
- MILLER, C.E., TUCKER, A.W. and ZEMLIN, R.A. (1.960)  
"Integer Programming Formulation of Travelling Salesman Problems".  
*JACM* 7, 326-329.

PARDO, L., FELIPE, A. Y PARDO, J. A. (1990)  
"Programación Lineal Entera".  
Díaz de Santos.

PHILLIPS, D. T. and GARCIA-DIAZ, A. (1981)  
"Fundamentals of Network Analysis".  
Prentice Hall.

SANCHIS, F. J. y MORALES, A. (1984)  
"Programación en lenguaje PASCAL".  
Paraninfo.

SYSLO, M. M., DEO, N. and KOWALIK, J. S. (1983)  
"Discrete Optimization Algorithms with Pascal Programs".  
Prentice Hall.