

Optimización de rutas en una empresa de distribución de mercancías

Fausto Pedro García Márquez

Área de Organización de Empresas, ETSII. Universidad de Castilla-La Mancha.
Campus Universitario s/n, 13071 Ciudad Real. FaustoPedro.Garcia@uclm.es

Resumen

Es sector logístico del transporte de mercancías por carretera está sufriendo un continuo cambio que obliga a las empresas a optimizar los recursos de los que disponen para mantenerse competitivas en un mercado en auge. Ello hace que hayan de minimizar costes en los elementos claves de su cadena de valor, en este caso en optimizar las rutas de distribución de mercancías. En este artículo se presenta un caso práctico de una importante empresa española, donde se proponen una serie de rutas alternativas a las que tiene la empresa establecida en base a su experiencia. Las rutas propuestas han sido calculadas empleando los algoritmos heurísticos de inserción y ahorros, así como el algoritmo meta-heurístico de redes neuronales

Palabras clave: logística, método de inserción, métodos de ahorros, redes neuronales

1. Introducción

La actividad logística experimenta un continuo crecimiento en España, cuyo sector tiene una gran importancia en la economía del país. En 2005 el volumen de negocio de la actividad logística fue de 16.300 millones de euros, lo que supone un crecimiento del 9.4% con respecto al año anterior. A su vez, el volumen de negocio generado por los servicios de mensajería y paquetería experimentó un incremento del 7 % respecto del año anterior, hasta alcanzar una cifra de negocio de 6.121 millones de euros. Esta evolución viene generada por el auge del sector en los últimos tres años y al crecimiento del comercio electrónico. A pesar de la evolución alcista de los últimos años, el estudio de la consultora especialista en análisis sectorial y estratégico DBK reafirma la problemática de la disminución de resultados de las empresas del sector como consecuencia de la subida del precio del gasóleo. El mismo estudio asegura que el sector se encuentra en un proceso de concentración, así como la desaparición de operadores de pequeño tamaño (DBK (2007)). Esto hace necesario que las empresas hayan de optimizar su eficiencia, por lo que se han de recalcular las rutas que tienen las empresas con el fin de minimizar costes. La reducción de los costes logísticos relacionados con las rutas de transporte es un objetivo buscado por todas las compañías que necesitan distribuir productos desde hace tiempo. Los costes de transporte forman parte de uno de los componentes más fácilmente controlable en la cadena de valor añadido (Ballou 2004).

Existe una gran diferencia entre el transporte a nivel nacional o internacional (carretera) y la distribución dentro de las ciudades y su entorno (distribución capilar). Este último tipo de distribución ha adquirido gran importancia en los últimos años, ya que son muchas las empresas que realizan sus envíos dentro de su mismo entorno a distancias cercanas. Sin embargo, ocurre que es en el transporte a nivel nacional e internacional donde se obtienen mayores beneficios como consecuencia de una buena estrategia de planificación de rutas.

El transporte nacional e internacional por carretera, es decir, el transporte entre núcleos urbanos o industriales, requiere vehículos de grandes dimensiones, y a ser posible, cargados al máximo. Una buena planificación de rutas puede reducir los costes significativamente, más aun con el

aumento del precio del petróleo que hace que cualquier kilómetro recorrido innecesariamente implique una carga económica para la empresa.

En este artículo se presenta un caso práctico de una empresa española de gran importancia en el sector, cuya actividad se centra en la distribución de mercancías a nivel nacional por carretera, así como la distribución dentro de las ciudades y su entorno. Ambas rutas están interconectadas mediante naves de transbordo, es decir, un centro logístico de gran capacidad que se encuentra situado estratégicamente en el territorio nacional. La empresa tiene diseñadas sus rutas nacionales en base a la experiencia. En este trabajo se plantea un cálculo de las rutas de forma que se pase por el mayor número de ciudades para aumentar la flexibilidad, ya que el vehículo podrá entregar y recoger carga en estas ciudades, tratando de minimizar la distancia recorrida y los costes.

El problema puede aproximarse a una serie de problemas semejantes al del viajante (Traveling Salesman Problem, TSP). TSP trata de obtener una buena ruta para, partiendo de una ciudad origen, recorrer varias ciudades destino y volver al mismo origen pasando por n ciudades. TSP es un problema de tipo NP-completo (Lawler et al. (1985)). En este tipo de problemas es posible que aparezca una solución formada por subrutas no conectadas entre sí y que cumplan las restricciones del TSP. Los autores han empleado la restricción de Miller et al. (1960) para evitar esto.

Se proponen para la resolución del problema el empleo de métodos de heurísticos para calcular las rutas óptimas o cercanas a las óptimas. Con este tipo de algoritmos se pueden conseguir unos ahorros en costes computacionales del orden del 5% al 20%. En concreto se propone el empleo de los algoritmos heurísticos de inserción y ahorro, así como el algoritmo meta-heurístico de Redes Neuronales (RN).

El *método de inserción* parte de una ciudad origen, se determinan las distintas subrutas hasta completar todas las ciudades a visitar, seleccionando en cada etapa una ciudad aún no visitada e insertándola en la subruta previa. Así pues, el algoritmo constará de n etapas, de forma que en la etapa k del proceso se obtiene la subruta S_k que pasa por k ciudades y regresa al origen; luego se elige una ciudad i_{k+1} que no está en la subruta anterior, y se inserta entre un par de ciudades consecutivas de la ruta S_k para dar lugar a S_{k+1} , así sucesivamente (Johnson y McGeoch (1995)).

El *método de los ahorros* se basa en ir comparando el beneficio que se obtiene, en este caso la menor distancia recorrida, cuando en lugar de ir desde la ciudad origen a cualquier otra ciudad, por ejemplo la ciudad A , y volver, se introduce una nueva ciudad B en la ruta, de forma que la nueva ruta pasaría a ser de la ciudad origen a A , de A a B , y de esta nuevamente a la ciudad origen, en lugar de la otra ruta que sería ir de la ciudad origen a A y volver a la ciudad origen (Clark y Wright (1964)).

RN intenta representar el mecanismo de funcionamiento del cerebro humano, basándose en una intensa interconexión de unos sencillos nodos computacionales llamados neuronas. Así pues, el conocimiento se adquiriría mediante un proceso de aprendizaje, y la conexión interneuronal (pesos sinápticos) se utilizaría para el almacenamiento del conocimiento. Los tipos de enlaces en la red neuronal estará constituido por enlaces sinápticos y de activación. El modo en el que las neuronas se estructuran en la red determina su arquitectura. Una de las principales ventajas de las RN es su robustez con respecto a los algoritmos exactos o heurísticos convencionales (García y Laguna (2001)).

2. Descripción del problema

El problema al que se enfrentan muchas de las empresas de distribución es la rentabilidad de rutas. Por ejemplo, habilitar una ruta en la que el volumen de envíos históricos entre dos puntos concretos no es lo suficientemente significativo puede no hacer rentable que se habilite la ruta directa, la cual minimiza costes y distancias en el transporte. Por el contrario, resulta ser económicamente más rentable que el paquete recorra más kilómetros a que recorra justo los que separan las dos capitales de provincia. Todo lo anterior genera una evidente inflexibilidad de rutas.

Por otro lado, otro error que se suelen plantear las rutas diseñadas basándose simplemente por la experiencia es que las ciudades a visitar como próximo destino se determinan por su proximidad, sin tener una visión completa del problema, es decir, contemplar todas las ciudades a las que hay que visitar y minimizar la distancia a recorrer.

En este trabajo se proponen una serie de métodos para poder resolver ambos problemas, con el fin de incrementar la flexibilidad en las rutas minimizando costes.

2.1. Metodología de estudio

En este estudio se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las rutas nacionales serán realizadas por un camión de gran capacidad. A efectos prácticos será considerado como vehículo industrial pesado.
- Las rutas capilares serán realizadas por camiones de mediana/pequeña capacidad, considerado como vehículo industrial ligero.
- Se considerará siempre el último vehículo en salir de la nave de transbordo.
- El consumo de gasoil se toma como media un valor de 30 litros cada 100 km para un vehículo industrial pesado y de 15 litros cada 100 km para un vehículo industrial ligero.
- El precio de gasoil será de 1 €/litro
- Las velocidades que se consideran son las legalmente permitidas para un vehículo de esas características según la legislación española.

2.2. Ejemplo de optimización de una ruta nacional

Se ha considerado como ejemplo la ruta que debería llevar un paquete que quisiera ser enviado desde Barcelona capital hasta una población de la provincia de Toledo. La ruta que sigue actualmente la empresa sería la siguiente:

Ruta Principal 1: Barcelona-Madrid; Ruta Principal 2: Madrid-Toledo; Ruta capilar: Toledo-Poblaciones

El trayecto Madrid-Barcelona, se realizará por el mismo itinerario que el de Barcelona-Madrid. De este modo se recorren 1.223 km y se estima una duración total en ruta de 14 horas y 41 minutos, siendo el coste de combustible de 366,93 €.

Una primera propuesta de mejora a esta solución es realizar una ruta en la cual se pasen por el

numero máximo de capitales de provincias minimizando los costes, de este modo se consigue una mayor flexibilidad a la ruta, ya que el camión podría recoger o entregar mercancías en dichas ciudades.

El vehículo de gran capacidad que recorre dicho trayecto, al que se denotará como ‘camión A’ en adelante, saldrá de la ciudad de origen independientemente de la cantidad de mercancía que tenga. El exceso de mercancía será transportada por vehículos convencionales.

La solución que planteada por la empresa para el traslado de mercancías desde Madrid a Barcelona es el siguiente:

Los camiones que cubre el trayecto llegan a Madrid siguiendo la ruta asignada. Los camiones son descargados y quedan disponibles para volver a ser cargados. En ese momento no habrá mercancías disponibles debido a que las que había están siendo transportadas hacia Barcelona. Por tanto, los camiones, incluido el A, deben esperar a que comiencen a llegar nuevas mercancías, que por lo general son de carácter urgente, las cuales son cargadas en los distintos camiones y estos parten para Barcelona en el mismo orden en el que son llenados. Este sistema conlleva mucho tiempo de espera, y por tanto un coste para la empresa.

El camión A se cargará de mercancías con destino a de Cuenca cuando los camiones que realizan el trayecto Cuenca-Madrid-Cuenca son descargados y cargados en Madrid. Así pues, el camión A servirá como apoyo logístico, lo que implica que normalmente no se llenará. Lo hará en Teruel, su segunda ciudad de destino y última antes de llegar a Barcelona.

A su llegada a Cuenca la mercancía con destino a esta ciudad será descargada, y el camión se cargará con la mercancía con destino Teruel o Barcelona, sus próximos destinos. El mismo proceso seguido para la ciudad de Cuenca es aplicable a la ciudad de Teruel.

Se aprecia a partir de lo descrito anteriormente que a medida que el camión A pasa por una mayor cantidad de ciudades que contengan algún centro logístico se incrementará la eficiencia de dicho camión y por tanto de la empresa. Del mismo modo, si el camión pasara por muchas ciudades, este o no llegaría a tiempo a la ciudad de destino o el coste sería muy grande.

En este artículo se pretende incrementar el número de ciudades con centros logísticos por lo que pasa el camión A minimizando la distancia recorrida con el fin de mantener el tiempo y distancia de la ruta inicial.

Una vez el camión ya ha llegado a Toledo, es necesario repartir la mercancía a cada uno de los destinos. En el problema que se va a plantear se considera que el camión debe visitar las diez poblaciones principales (poblaciones de ruta) y volver a su punto de partida. Saldrá de la nave situada en la capital y deberá pasar por todas las localidades para entregar o recoger pedidos tramitados durante el día anterior (en el caso de entregas) o en el día concreto (en el caso de recogidas)

La ruta asignada es la siguiente: Toledo → Torrijos → Bargas → Mocejón → Añover de Tajo → Recas → Yuncos → Illescas → Esquivias → Fuensalida → Toledo. En esta ruta se recorren 209,9 km, empleando para ello un tiempo de 2 h y 41 min.

Con el fin de mejorar las rutas que sigue la empresa los autores han planteado una serie de problemas semejantes al TSP, los cuales tienen en común en la matriz de nodos las ciudades que poseen una nave de transbordo y sirve de conexión a ambas rutas. El TSP es explicado en

la siguiente seccion.

3. Formulación del problema

El problema así definido consiste en minimizar la distancia en recorrer todas las ciudades pasando solo una vez por cada una de ellas (ecuación 1). Este problema es conocido como ciclo Hamiltoniano. Es decir, sea el problema definido por el grafo $G = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$, donde $\mathbf{V} \in \mathcal{R}^2$ es un conjunto de n ciudades y \mathbf{E} un conjunto de arcos que unen dichas ciudades. Sea además la variable binaria x_{ij} , que toma los valores 1 si y solo si el arco que une las ciudades i y j es empleado en la solución, y 0 en si no es empleado. Estas variables son definidas solo en el caso de que $i < j$. Según estas condiciones, el problema puede ser formulado como:

Minimizar:

$$\sum_{i < k} c_j x_j, \quad (1)$$

sujeto a:

$$\sum_{i < k} x_k + \sum_{j < k} x_k = 2, \quad (i)$$

$$k = 1, 2, \dots, n, \quad (ii)$$

$$\sum_{i, j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, \quad (iii)$$

$$S \subset V, \quad 3 \leq |S| \leq n - 3, \quad x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (iv)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n, \quad i < j,$$

siendo la ecuación 1 la función objetivo. $\mathbf{C}=(c_{ij})$ es la matriz de coste asociada a la matriz \mathbf{E} , donde c_{ij} es la distancia (por distancia suele considerarse también como el coste o el tiempo que correspondería entre las ciudades que se estén considerando) entre las ciudades entre las ciudades i y j , y al tratarse de un problema euclidio se cumplirá que $c_{ij} + c_{jk} \geq c_{ik}$ para todo $i, j \in V$. La restricciones nos indican que: (i) garantiza de que todas las ciudades estén conectadas entre si; (ii) eliminación de las subrutas S puesto que las subrutas no han de ser definidas para $|S|=2$ y $|n-2|$ puesto que las restricciones (iii) y (iv) garantizan la no generación de subrutas que consideran dos ciudades.

El modelo (1) contiene $n(n-1)$ variables binarias, con $2n$ restricciones y $2^n - 2n - 2$ restricciones de subrutas que han de ser eliminadas, lo que hace muy complejo y costoso, desde un punto de vista computacional, su resolución. En este trabajo se han considerado las restricciones propuestas por Miller et al. (1960), las cuales permiten reducir el número de restricciones de eliminación de subrutas. En estas nuevas restricciones es necesario considerar las nuevas variables u_i ($i=2, \dots, n$). Las nuevas restricciones vienen dadas por:

$$u_i - u_j + (n-1)x_j \leq n-2, \quad i, j = 2, \dots, n, \quad i \neq j, \quad (v)$$

$$1 \leq u_i \leq n-1, \quad i = 2, \dots, n. \quad (\text{vi})$$

La restricción (v) indica que la solución no contiene una subruta en el conjunto de ciudades $S \subseteq V$ y que ninguna subruta contiene menos de n ciudades. La restricción (vi) asegura que las u_i variables son definidas únicamente para cada subruta posible.

4. Métodos propuestos para su resolución

Para la resolución del problema planteado en la sección anterior se han empleado los algoritmos heurísticos de inserción y ahorro, así como el algoritmo meta-heurístico de Redes Neuronales (RD), los cuales son explicados a continuación.

4.1. Método de inserción

La metodología a seguir en la programación del algoritmo de inserción consiste en construir ciclos que visiten unas cuantas ciudades para posteriormente insertar las ciudades restantes que no se han visitado en la ruta previa. De esta forma se obtiene la ruta que pasa por todas las ciudades y regresa al origen (Johnson y McGeoch (1995)).

El algoritmo de inserción consta de las siguientes etapas:

- a) Definición de las entradas y las salidas, donde las salidas será el tiempo de ejecución, la ruta óptima y la distancia en kilómetros, siendo la salida la matriz de distancias.
- b) Creación de una matriz auxiliar donde las filas correspondientes a las ciudades ya elegidas son ceros para que no volver a ser consideradas. Otra opción sería asignando una cifra muy superior a la distancia entre ciudades, con lo que el algoritmo al tratar de encontrar distancias mínimas no tendría en cuenta dichas distancias por su elevado valor.
- c) Creación de una matriz que en la primera fila contiene las distancias mínimas entre las ciudades que se han elegido y los que quedan por elegir, y en la segunda la ciudad respecto al que se toma la distancia.
- d) Cálculo de la ciudad que entra y las que le preceden. Creación y ordenación de la ruta.
- e) Cálculo de la longitud de la ruta mínima encontrada por el algoritmo.
- f) Impresión de resultados

4.1. Método de los Ahorros

El algoritmo combina sucesivamente subrutas hasta obtener la ruta final. Los subrutas considerados tienen una ciudad común denominada base. El procedimiento de unión de distintas subrutas se basa en eliminar las aristas que conectan dos ciudades de diferentes subrutas con la ciudad base, uniéndose posteriormente las ciudades entre sí. Se conoce por ahorro a la diferencia del coste entre las aristas eliminadas y la añadida. Lo que pretende es minimizar la suma de las distancias de los tramos de la ruta completa que permite recorrer todas las ciudades partiendo de una ciudad origen (Clark y Wright (1964)).

Éste algoritmo es bastante intuitivo, pues se basa en ir comparando la menor distancia que se recorre, partiendo de una ciudad origen, pasando por una serie de ciudades y volviendo a la ciudad origen. Es decir, sería ir del origen a i , de i a j , y de j al origen. Comparando la distancia de las dos rutas se puede obtener para cada par de ciudades i y j , se obtiene un valor que se denomina “ahorro”, y que sirve para obtener una matriz \mathbf{D} , a partir de la cual se va a obtener la ruta mínima. Para ello se toma el valor máximo de la matriz $\mathbf{D}(i_{max}, j_{max})$, que corresponde al mayor ahorro obtenido, siendo i_{max} el punto al que se irá desde el origen. El siguiente punto será el j_{max} . El siguiente par de ciudades (i_{max}, j_{max}) se obtiene de la matriz \mathbf{D} en la fila del j_{max} anterior, y buscando la columna con el mayor ahorro que corresponda con alguna ciudad aún no visitada. La ruta final se obtiene cuando todos los puntos han sido ya incluidos, finalizando con la ciudad origen.

4.2. Redes neuronales

Las redes neuronales artificiales (RN) son redes compuestas de grandes cantidades de elementos computacionales simples altamente interconectados. Usan datos de un pasado más o menos reciente, pero con la ventaja de permitir incorporar la información de múltiples indicadores junto con información fundamental, explotando la ventaja de ser un modelo no paramétrico (Alexander y Morton, 1990).

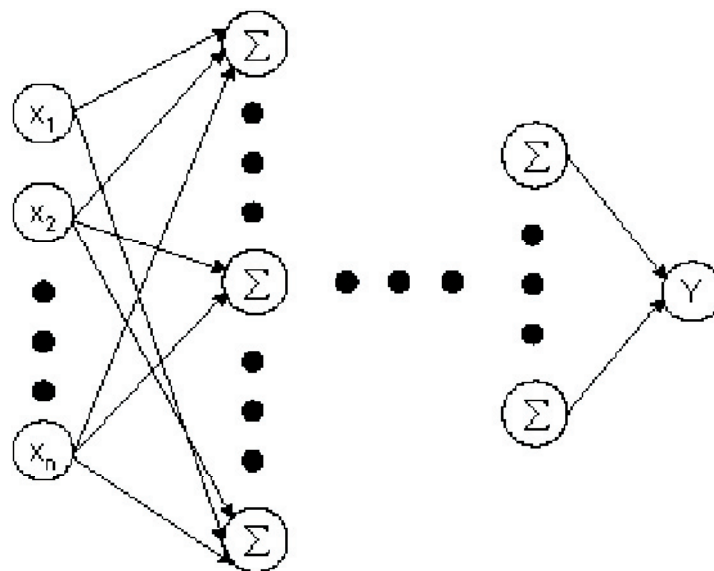


Figura 1. Ejemplo de red neuronal. x_i representan las entradas e Y representa la salida

Las RN están basadas en conceptos relacionados con la propia naturaleza humana. Necesitan un tiempo de aprendizaje y otro de entrenamiento para que la solución que dan se aproxime a la óptima. Una vez que realizado esto son capaces de determinar soluciones factibles a problemas similares.

Todas las neuronas de la red, salvo las de entrada, producen un resultado cuando aplican la función que las define, a las entradas que recibe, según la influencia de ésta. Cada neurona recibe la información procedente de las neuronas que se encuentran en una capa más cerca de la capa de entrada, y envía la salida hacia una capa que está más cerca de la capa de salida. La figura 1 muestra un esquema típico de funcionamiento de las redes neuronales.

5. Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos por los algoritmos descritos en este artículo para las distintas rutas planteadas en la sección 2.

El método de los ahorros proporciona la siguiente ruta: Barcelona → Madrid → Cuenca → Teruel → Zaragoza → Lleida → Barcelona. Siguiendo esta ruta se recorren 1.396,6 km. Esta ruta es 173,6 km mayor que la ruta que sigue la empresa, pero a cambio se tiene una ruta más flexible, es decir, se pasan por las ciudades de Zaragoza y Lleida, las cuales la empresa no pasa en la actualidad. El tiempo en recorrer esta ruta es de 2 h y 20 min más que la ruta que sigue la empresa, y el coste de excede en 44,04 € y 10,5 € de peaje.

La ruta capilar quedaría: Toledo → Illescas → Esquivias → Yuncos → Añover de Tajo → Recas → Mocejón → Fuensalida → Bargas → Torrijos → Toledo. Siguiendo esta ruta se recorren 221.1 kilómetros, es decir, 11,2 km más que con la ruta de la empresa y se tardan 7 minutos más, con un coste superior de 33,21 € en combustible

La ruta obtenida con el método de inserción es: Barcelona → Zaragoza → Lleida → Madrid → Cuenca → Teruel → Barcelona. Con esta ruta se recorren 1.554,3 kilómetros, es decir, 331,3 km más que con la ruta de la empresa, pero al igual que en caso anterior, se dispone de una ruta que pasa por dos centros logísticos más. El tiempo en cubrir la ruta es superior en 4 h y 39 min, y el coste en 99,43 € de gasoil y 10,5 € de peaje.

La ruta capilar quedaría: Toledo → Bargas → Mocejón → Recas → Illescas → Esquivias → Yuncos → Añover de Tajo → Torrijos → Fuensalida → Toledo. Siguiendo esta ruta se recorren 183.2 kilómetros, 26,7 km menos que con la ruta de la empresa y se tardan 17 minutos menos, con un coste en combustible de 27,54 €.

Finalmente, mediante RN se obtiene la ruta: Barcelona → Zaragoza → Madrid → Cuenca → Teruel → Lleida → Barcelona. Siguiendo esta ruta se recorren 1307,4 kilómetros. En este caso se recorren tan solo 84,4 km más que con respecto a la ruta de la empresa, pero en cambio presenta la flexibilidad de las rutas proporcionadas por los métodos anteriores. Se tardan solamente 7 min más en recorrer esta ruta, y el coste en combustible es tan solo 20,19 € mayor. En este caso se aprecia como la solución aportada por RN sería la mejor de las planteadas hasta ahora.

La ruta capilar quedaría: Toledo → Torrijos → Bargas → Fuensalida → Recas → Añover de Tajo → Illescas → Yuncos → Esquivias → Mocejón → Toledo. Siguiendo esta ruta se recorren 216.3 kilómetros, 6,4 km más que con la ruta de la empresa, pero a cambio se tardan 3 min menos, con un coste en combustible superior de 32,51 €.

A todas estas rutas habría que considerar el trayecto Madrid-Toledo de 57 km, la cual se realiza en 44 min con un coste de combustible de 17,11 €, lo cual coincide con la solución propuesta por al empresa y por los autores. Las Tablas 1 y 2 muestran los resultados de las rutas descritas anteriormente.

PROPUESTA DE LA EMPRESA	Ruta 1	Ruta 2	Ruta Cap	Total
Ruta global de la empresa (km)	1223	114	209.9	1558.1
Nº de puntos logísticos visitados	2	2	1	5
Duración	14h41	1h28	2h41	18h50
Coste combustible (€)	366.93	34.22	31.49	432.64

Tabla 1. Solución adoptada por la Empresa

	MÉTODO DE LOS AHORROS				MÉTODO DE INSERCIÓN				REDES NEURONALES			
	Ruta 1	Ruta 2	Ruta Cap	Total	Ruta 1	Ruta 2	Ruta Cap	Total	Ruta 1	Ruta 2	Ruta Cap	Total
Ruta global propuesta, km	1396.6	114	221.1	1731.7	1554.3	114	183.2	1851.5	1307.4	114	216.3	1637.7
Nº de puntos logísticos visitados	5	2	1	8	5	2	1	8	5	2	1	8
Duración	17h01	1h28	1h35	20h04	19h20	1h28	2h24	23h12	14h48	1h28	2h38	18h54
Coste combustible (€)	410.97	34.22	33.21	478.4	410.97	34.22	27.54	472.73	346,74	34.22	32.51	413.47

Tabla 2. Solución proporcionada por los métodos de inserción, ahorros y redes neuronales.

6. Conclusiones

Las empresas de transporte de mercancías se enfrentan hoy en día a un ambiente que obliga a optimizar sus recursos para poder ser competitivas en el mercado. Eso hace necesario que hayan de hacer más eficientes sus rutas, que en muchas ocasiones son diseñadas en base a la experiencia y sin ninguna base científica. Esta mejora permite disminuir los costes en su cadena de valor.

En este artículo se presenta un caso práctico de una empresa importante en el sector. Los autores proponen los algoritmos heurísticos de inserción y ahorro, así como el meta-heurístico de Redes Neuronales obtener una serie de rutas alternativas a las que tiene la empresa.

En general el método de inserción es más eficiente que el método de ahorros, porque es capaz de llegar a una buena solución con menor número de operaciones y menor tiempo computacional. Por el contrario, la calidad de las soluciones que aporta el método de inserción es en general menor que las proporcionadas por el método de los ahorros. Una de las causas es porque cuando el algoritmo encuentra dos posibles caminos iguales elige generalmente el primero que encuentra, siendo posible que este no sea el mejor.

Algunas de las ventajas que presentan el método de las redes neuronales son:

- Aprendizaje adaptativo: capacidad de aprender a realizar tareas basadas en un entrenamiento o en una experiencia inicial.
- Auto-organización: una red neuronal puede crear su propia organización o representación de la información que recibe mediante una etapa de aprendizaje.
- Tolerancia a fallos: la destrucción parcial de una red conduce a una degradación de su estructura; sin embargo, algunas capacidades de la red se pueden retener, incluso sufriendo un gran daño.
- Operación en tiempo real: los cómputos neuronales pueden ser realizados en paralelo.
- Presentan gran robustez.

Entre los inconvenientes que tienen el método de las redes neuronales están:

- Hasta ahora no han mostrado unos resultados que se puedan calificar de óptimos.
- En determinadas estructuras de problemas el tiempo computacional resulta elevado.
- Cuanta más información suministrada a la red, más elementos de criterio tendrá para extraer la información relevante, pero más compleja será la red y más costoso y lento el proceso.

Los resultados obtenidos por el método de redes neuronales son los mejores de los propuestos, aunque el tiempo de computación es mayor. Las distancias, tiempos y costes son semejantes a los que las rutas que tiene la empresa, aunque las rutas obtenidas con redes neuronales permiten pasar por un mayor número de nodos logísticos, por lo que hace que se aumente la flexibilidad de la ruta y la eficiencia.

Referencias

Clark, G.; Wright, J.W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12, 568-581.

DBK (2007) Transporte de Mercancías por Carretera, editado por DBK.

García Márquez, F.P.; Laguna, M. (2001). Optimización: Conceptos Básicos y Tendencias Actuales. *Aconteser*, nº 9, pp. 24-25.

Johnson, D.; McGeoch, L.A. (1995). The Traveling Salesman Problem: A Case Study in Local Optimization, capítulo del libro 'Local Search in Combinatorial Optimization'.

Laporte, G. (1992), The Travelling Salesman Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms, *European Journal of Operational Research*, 59(2), pp. 231-247.

Aleksander, I.; Morton, H. (1990). *An Introduction to Neural Computing*, Chapman & Hall, London.