

SISTEMAS DE GESTIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTES: NUEVAS TÉCNICAS DE SOLUCIÓN

Eduardo Guillén Solórzano, edugs@udc.es, Universidad de La Coruña

Susana Barbeito Roibal, sbar@cdf.udc.es, Universidad de La Coruña

ABSTRACT

En este trabajo se analizan los procesos de planificación de rutas de transporte para resolver los problemas logísticos a nivel operativo. En los últimos años se han producido avances notables en diferentes campos tecnológicos y científicos que han permitido el desarrollo de potentes Sistemas de Información Logística. Los Sistemas de Posicionamiento Global o GPS, los Sistemas de Información Geográfica o GIS, y los avances conseguidos en los métodos de cálculo de rutas de transporte han permitido el desarrollo de avanzadas herramientas de software que automatizan las tareas de planificación de rutas de transporte. Todos estos logros han provocado que cada vez el entorno de las empresas se torne más dinámico y competitivo agudizando la necesidad de sistemas más avanzados y que consigan mayores reducciones de costes en todo el proceso de planificación. En este sentido se presenta en este trabajo un nuevo método para las primeras fases de construcción de rutas de transporte, en el problema conocido como Vehicle Routing Problem with Time Windows, y que resumen en mayor o menor medida la problemática a la que se enfrentan las empresas que tienen esta problemática. Seguidamente se analizan las técnicas heurísticas más conocidas para resolver esta problemática, y partiendo de estos procedimientos se presenta un nuevo método para la fase inicial de construcción de rutas. En la tercera parte de este trabajo se presentan los resultados del método desarrollado, comparado con otros métodos recogidos en la literatura, y mostrando que se mejoran los resultados de algunos de los mismos.

1. INTRODUCCIÓN

Generalmente en cualquier empresa que se encuentre con este tipo de problemas, las decisiones relativas a los mismos se pueden asociar a los tres niveles jerárquicos clásicos. En primer lugar, desde el punto de vista de planificación estratégica, la empresa ha de decidir el diseño y configuración de la red de transportes, indicando la situación de sus almacenes, la capacidad de los mismos, los recursos asociados a cada uno de ellos y el sistema de información utilizado. En el siguiente nivel y desde el punto de vista táctico, la empresa ha de determinar, en base a la demanda de sus clientes, el tamaño de la flota y la composición de la misma, los tipos de vehículos a adquirir y su variedad en la empresa, así como subcontratar los posibles excesos de demanda. Finalmente, en el nivel más operativo, la empresa ha de tomar las decisiones del día a día, la planificación de las visitas a realizar por los vehículos, los momentos de esas visitas y la asignación de esas visitas a cada uno de los vehículos. Es lo que se conoce como Vehicle Routing Problem with Time Windows, o simplemente VRPTW.

Si bien las empresas, en su mayor parte las PYMES, han desarrollado modelos de planificación a medida, para sus respectivas problemáticas, generalmente estos modelos de planificación son de naturaleza intuitiva. Los gestores o planificadores han de manejar tal cantidad de información, que generalmente recurren a la intuición para planificar las rutas, aunque ello no implique siempre un planteamiento de racionalización del proceso y mucho menos de optimización.

En el caso de las empresas de distribución como contrapunto de las empresas puramente de transportes, la situación todavía es más grave. Generalmente estas empresas están habituadas a trabajar con una cartera de clientes más o menos estable, de manera que los puntos de servicio o recogida de mercancías permanecen igualmente estables. Consecuentemente, una de las características del sistema de planificación de rutas, es que éstas son fijas y se sirven con periodicidad diaria. En este sentido, cuando la empresa se plantea servir a nuevos clientes, su decisión se basa más en un criterio de cercanía del cliente potencial a la ruta preestablecida que en un criterio racional y económico. Se trata de una limitación asumida al crecimiento empresarial que podría verse solventada si se tuviese en cuenta una mayor racionalidad en la planificación de rutas. Igualmente ocurre en aquellas empresas de transporte de larga distancia, que ya cuentan con un plan de transportes en el que se contempla las diferentes rutas entre los almacenes centrales de la empresa, así como los horarios de entrada y salida de los vehículos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El problema del VRPTW consiste en un conjunto de N clientes, de manera que la denominación de cada uno de los clientes será $1, 2, 3, \dots, N$. El conjunto de posibles arcos de conexión entre todos los clientes se denota por A , de manera que no existe ningún arco que comience o termine en el depósito, sino que todos hacen referencia a posibles uniones entre los nodos del problema, excluido el nodo central o depósito. Todas las rutas comienzan y terminan en el depósito central o nodo 0 . Existe un coste asociado a cada uno de los arcos en consideración, que se representa por c_{ij} y que hace referencia al coste de viajar del nodo i al nodo j . Este coste está directamente relacionado con el tiempo de viaje entre estos dos nodos, que se representa por el valor t_{ij} y que indica el tiempo de desplazamiento correspondiente al arco $(i, j) \in A$. El tiempo de desplazamiento también incluye el tiempo de servicio del cliente i . El conjunto de vehículos idénticos que componen el problema se denota por V . Cada vehículo tiene una capacidad determinada por q y cada cliente establece una demanda d_i , $i \in N$. Para cada uno de los clientes, el servicio del mismo tiene que comenzar dentro de un intervalo de tiempo denominado ventana de tiempo (*time window*), $[a_i, b_i]$, $i \in N$. Igualmente los vehículos han de salir y llegar al depósito central o nodo 0 dentro de un intervalo de tiempo denotado por $[a_0, b_0]$. En la problemática general del VRPTW está permitido que los vehículos lleguen a los nodos antes de la apertura de la ventana de tiempo, de manera que el tiempo de espera resultante hasta la apertura de la misma no supone ningún coste adicional. Sin embargo no es posible llegar después del cierre de dichas ventanas de tiempo, ni a los clientes en consideración, ni al depósito central.

En este planteamiento general, se establecen dos variables de decisión. En primer lugar, x_{ij}^k definida $\forall (i, j) \in A, \forall k \in V$ que tomaría el valor 1 si el vehículo k realiza el desplazamiento entre los nodos i hacia el

nodo j , y tomaría el valor 0, en caso contrario. La segunda variable de decisión es la variable S_i^k (definida $\forall i \in N, \forall k \in V$) que denota el momento en el que el vehículo k comienza el servicio al cliente i , de manera que si el vehículo k no sirve al cliente i , entonces esta variable de decisión no tiene ningún sentido. Igualmente es posible asumir que $S_0^k = 0, \forall k$.

El objetivo del problema es conseguir diseñar un conjunto de rutas que incurran en costes mínimos, una para cada vehículo, de forma que todos los clientes sean atendidos exactamente una sola vez, por lo tanto no se permiten servicios parciales de los mismos. Las rutas han de ser viables con respecto a la capacidad de cada vehículo así como con las ventanas de tiempo de cada cliente.

Para resolver este problema se han desarrollado métodos de aproximación entre los que se encuentran los algoritmos de construcción de rutas. Los algoritmos de construcción de rutas trabajan a través de la selección de nodos o arcos de forma secuencial hasta que se consigue una solución factible. Los nodos son escogidos por medio de algún criterio de minimización de coste, sujeto a las restricciones propias de la capacidad del vehículo y de las ventanas de tiempo. Estos métodos pueden trabajar de una manera secuencial, si las rutas se construyen una tras otra, o bien de forma paralela, si las rutas se construyen de forma simultánea. A continuación se presentan los trabajos más destacados en la línea de los algoritmos de construcción de rutas.

Solomon (1986) establece para la resolución del VRPTW un primer método consistente en la creación de una única ruta en primer lugar, y después su división en subrutas para respetar las ventanas de tiempo. Este autor propone la creación de un primer programa de servicio con todos los clientes ordenados por sus ventanas de tiempo, para posteriormente dividir esta ruta en otras más pequeñas, aplicando los criterios de capacidad de los vehículos. Sin embargo en este caso no aporta resultados computacionales.

Sin embargo en Solomon (1987) el autor propone tres nuevos métodos para la resolución del VRPTW, y que servirán de base para la gran mayoría de los trabajos en esta línea de investigación. El primero de estos métodos consiste en una extensión del conocido método de los ahorros de Clarke y Wright (1964). Este método fue desarrollado inicialmente para la resolución del VRP, y constituye uno de los más conocidos métodos de construcción de rutas. Comienza con una solución en la que cada cliente constituye una única ruta servida por un único vehículo individual. A partir de esta solución inicial los clientes se integran en rutas más grandes a través del cálculo de los ahorros generados por estas posibles combinaciones y que equivalen a $S_{ij} = d_{i0} + d_{0j} - d_{ij}$.

De esta manera Clarke y Wright seleccionan los arcos (i,j) que provocan los máximos ahorros para unir clientes en rutas más grandes. A través de sucesivas iteraciones es posible ir construyendo las rutas finales, eliminando las rutas iniciales de clientes únicos, siempre que las soluciones aportadas sean respetuosas con las restricciones del problema. A la hora de combinar estas rutas en rutas más grandes es posible aplicar dos criterios diferentes: o bien realizar combinaciones paralelas en todas las rutas generadas al mismo tiempo, o bien tratar de completar una ruta inicialmente escogida hasta que el vehículo esté completamente lleno. Es decir, que se podrían implementar tanto algoritmos de tipo secuencial, como algoritmos de tipo paralelo. Igualmente Solomon

contempla en su algoritmo la cercanía temporal y la cercanía geográfica, algo que no contemplaban Clarke y Wright en su algoritmo, dado que inicialmente estaba destinado a la resolución del VRP sin ventanas de tiempo. Para ello, y ante la consideración de las diferentes uniones y los ahorros consiguientes, el algoritmo realiza la comprobación de las restricciones de temporalidad para eliminar aquellas uniones que no son posibles. De esta manera se cumplen todas las restricciones impuestas tanto por las ventanas de tiempo de los nodos, como de la temporalidad del horizonte de planificación.

El segundo método que propone Solomon consiste en un método de adición del cliente más cercano a la ruta, pero en este caso incluyendo el criterio temporal. Los pasos que sigue el algoritmo son muy intuitivos. Cada ruta comienza con la selección del cliente que esté más cercano al depósito central. Posteriormente en cada iteración del algoritmo se seleccionan los clientes más cercanos a los últimos clientes añadidos a las rutas, añadiendo éstos a las mismas. Una nueva ruta se genera cuando no es posible incluir a un cliente seleccionado en ninguna posición factible. Al igual que en el caso anterior, el concepto de cercanía incluye tanto el criterio espacial como el criterio temporal. Por último, el tercer y más exitoso método heurístico propuesto por Solomon es el denominado *I1*. Los procedimientos contemplados en este tercer método se detallan más adelante contrastándolos con los procedimientos propios del método propuesto en este trabajo.

Solomon (1987) propone otros dos métodos de inserción denominados *I2*, en el que las inserciones de clientes se realizan en función a la minimización de la distancia y tiempo total de las rutas, e *I3*, que tiene en cuenta la urgencia de servicio de los clientes.

Dullaert (2000a y 2000b) establece que el criterio de inserción de Solomon $c_{I2}(i,u,j)$ subestima el tiempo adicional que supone la inserción del cliente u entre el depósito y el primer cliente en las rutas en construcción. Esto puede provocar que se seleccionen subóptimos en las inserciones de estos clientes, por lo que una ruta con un número reducido de clientes puede tener un programa de servicios muy disperso en el tiempo. Este autor introduce un nuevo criterio de inserción que contempla la variable temporal de manera que proporciona unos resultados en cuanto a los ahorros generados de aproximadamente el 50%. Sin embargo estos ahorros decrecen a medida que se aumenta el número de clientes de las rutas.

Solomon (1987) también propone una variante del conocido algoritmo de barrido de Gillett y Miller (1974) a través de la descomposición del problema general del VRPTW en dos fases bien diferenciadas. En la primera fase los clientes se asignan a las rutas, tal y como se hace en el algoritmo original de barrido. En este caso el centro de gravedad es calculado de manera que los clientes se agrupan de acuerdo con su ángulo polar. En la segunda fase los clientes son asignados a un vehículo utilizando el criterio de inserción del tipo *I1*.

Potvin y Rousseau (1993) presentan una versión paralelizada del método de inserción de Solomon *I1*, donde un conjunto de m rutas se inician simultáneamente. Los autores utilizan el heurístico de inserción de Solomon para determinar el número inicial de rutas y el conjunto inicial de clientes semilla. La selección del cliente siguiente a ser considerado se basa en una medida del rechazo de inserción en todas las rutas, de manera que un gran

rechazo se produce cuando existe un gran espacio entre el mejor y el segundo mejor puesto para ser insertado un cliente.

Ioannou et al. (2001) utilizan el criterio de inserción secuencial propuesto por Solomon (1987) para resolver los problemas de tipo teórico propuestos en la literatura, así como un ejemplo práctico de una empresa de transporte de comida. El enfoque presentado por estos autores recoge la idea de que la selección de los clientes a ser insertados, debe de estar motivada por la función que minimiza el impacto sobre los clientes que ya están incluidos en la ruta en construcción, así como el impacto sobre los clientes todavía no incluidos, y el impacto sobre las ventanas de tiempo del cliente a ser insertado.

3. DESARROLLO DEL ALGORITMO DE SOLUCIÓN PARA EL VRPTW

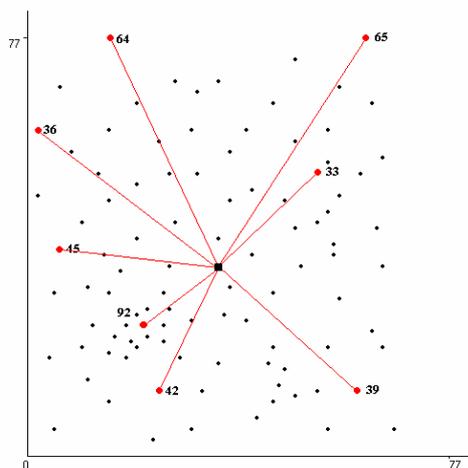
El modelo presentado en este trabajo se incluye dentro de los algoritmos heurísticos de construcción de rutas. Por ello contempla en sus diferentes fases una serie de reglas de decisión que persiguen la construcción de rutas de forma simultánea, y no secuencial como otros métodos existentes. En este caso el algoritmo comienza la construcción de un conjunto de rutas desde el primer momento de la planificación, de forma paralela. En las siguientes líneas se recoge la explicación de estas reglas de asignación utilizadas por el algoritmo, acompañadas de ejemplos relativos al problema R103 de Solomon (1987), sobre el que se aplican estas reglas en las primeras etapas de la planificación.

Desde el primer momento se generan un total de R rutas, donde R es un parámetro establecido por el usuario, indicativo del número de rutas que desea generar desde el comienzo. Estas R rutas comienzan a partir de los R nodos semilla con momentos de servicio más críticos. Estos nodos serán aquellos cuyo servicio no se pueda retrasar debido a que tienen momentos de cierre muy tempranos, de forma que los vehículos no podrían realizar visitas intermedias. Para calcular esta criticidad se utiliza la holgura resultante entre el cierre de cada cliente (tc_i), y el tiempo necesario para llegar a él (t_{0i}). Esta holgura se obtendría a través de $h_i = tc_i - t_{0i}$. De entre todos los nodos se selecciona aquellos R nodos con las menores holguras resultantes, tal y como se acaban de definir. Por ello el algoritmo genera una primera lista de R nodos semilla y los asigna a las correspondientes R rutas, a ser visitados por R vehículos independientes. En este sentido se contempla la primera de las reglas contenidas en el algoritmo que es la **regla de asignación**. Cada nodo semilla se asigna a una ruta diferente. En el siguiente caso del problema R103, se ha optado por establecer 8 rutas iniciales, a través de la selección de los $R=8$ nodos con momentos de cierre más críticos, de manera que los resultados serían los siguientes.

A continuación, y después de haber asignado estos primeros R nodos, se analiza cada uno de los mismos en detalle para comprobar si en las holguras resultantes de las visitas de estos nodos, es posible incluir alguna visita de otros nodos durante los trayectos. Para ello se estudia la posibilidad de inserción de otros nodos antes de la visita de los R nodos previamente asignados a las rutas. En este sentido se presenta la segunda de las reglas del algoritmo que consiste en la **regla de inserción** de nodos. Con respecto a la posible inserción de nodos en el camino, es importante destacar varios factores. Se distingue en el algoritmo dos tipos de inserciones: por un lado

la **inserción simple** de un nodo intermedio a modo de escala, o bien la **inserción doble** de dos nodos. Estas dos variantes de la regla de inserción persiguen la inclusión de nuevos clientes entre el nodo origen, que en este caso es el depósito, y los nodos destino. Para ello es necesario establecer el valor del tiempo de espera que habría que realizar antes del servicio de cada uno de los nodos semilla, para detectar si existe el tiempo suficiente como para realizar una o dos visitas intermedias. Estas inserciones de nuevos clientes se realizarán finalmente para aquellos nodos intermedios cuya visita implique el menor distanciamiento posible de la línea recta entre el nodo origen y el nodo destino, de manera que se minimiza el desplazamiento adicional que habría que realizar para saturar las esperas ante los nodos semilla con nuevas visitas. La selección de estos nodos intermedios ha de respetar en todo momento las restricciones que imponen las ventanas de tiempo de los mismos, así como las restricciones de carga del camión, y por último las restricciones impuestas por el horizonte temporal, correspondiente al momento de cierre del depósito. En la figura 2 se representan todas las posibilidades de inserción entre el depósito central y el nodo 33, según la holgura temporal resultante al considerar el momento de cierre del nodo 33, y que excluye aquellos nodos cuya visita implica llegar fuera de plazo al nodo 33. Estas posibilidades se encontrarán siempre en el área marcada por la elipse dibujada en color azul, indicativa de la holgura temporal existente antes del cierre del nodo 33, aunque solamente será posible la visita de aquellos nodos que se encuentren abiertos en el momento en el que el camión los visitaría, correspondiéndose con los nodos dibujados en rojo.

Figura 1 Regla de asignación. Cada uno de los R nodos semilla se asigna a una ruta diferente.



Igualmente se ha introducido una restricción adicional sobre los desplazamientos que han de realizarse para visitar los nodos intermedios, y que limita la distancia incremental resultante para realizar esas visitas intermedias. Los desplazamientos geográficos permitidos para realizar estas inserciones vienen determinados por sendos parámetros β y γ seleccionados por el usuario y que hacen referencia a la distancia incremental permitida sobre la distancia entre el nodo origen y el nodo destino, de manera que para la inserción simple solamente se contemplarán aquellos nodos intermedios que impliquen una distancia adicional menor o igual a β veces la distancia original entre el nodo origen y el nodo destino. Por ejemplo, si existe una distancia entre el nodo 0 y el nodo en consideración equivalente a 10 unidades, y el parámetro delimitador β es de 2 , entonces el desplazamiento total resultante de la inserción de un nuevo nodo entre los dos en consideración, sería de 2×10 unidades, esto es de 20 unidades. Es decir que solamente se permitiría la visita de aquellos nodos intermedios

que provocasen un desplazamiento total entre el nodo 0 y el nodo en consideración menor o igual que 20 unidades. En la figura 3 se recogen tres áreas de inserción alternativas. En primer lugar, la elipse mayor indica todas las posibles inserciones de nodos permitidas por la holgura temporal existente en el propio nodo 33. La elipse intermedia se correspondería con la zona de inserción marcada por un $\beta=2$, de manera que se restringiría el área original a una zona menor, evitando nodos que supondrían amplios desplazamientos. Por último se indica una zona de inserción menor representativa de un $\beta=1.10$, de forma que todavía se limitan más las posibles inserciones de nodos intermedios. De forma análoga podríamos establecer que si el valor de β fuese 1, entonces solamente se permitirían inserciones de nodos que estuviesen sobre la línea recta.

Figura 2 Área de inserción establecida según la holgura temporal existente

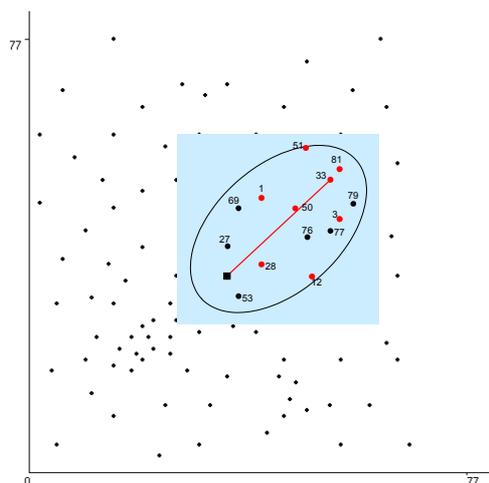
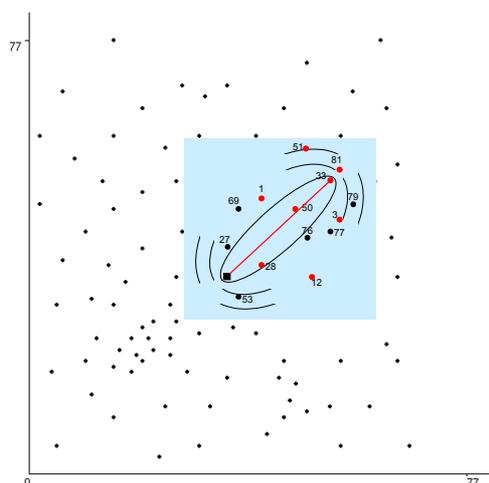


Figura 3 Delimitación de la zona de inserción simple a través del parámetro β

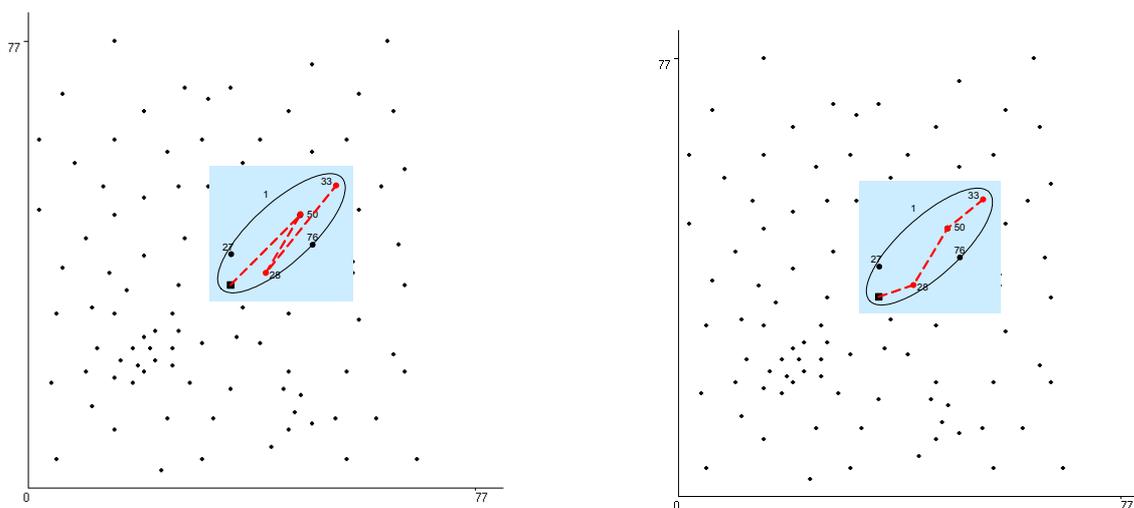


En cuanto al parámetro γ es un indicativo penalizador de desplazamientos para el caso de las inserciones dobles, de manera que el desplazamiento máximo autorizado para insertar conjuntamente dos nodos intermedios sería de $\gamma \times \beta$ veces la distancia original entre el nodo origen y el nodo destino.

Una vez que se selecciona el valor de β , entonces se contemplan las diferentes posibilidades de insertar los nodos encontrados en el camino a modo de visitas intermedias entre el nodo origen y el nodo destino. De esta manera se consigue saturar los tiempos muertos o esperas que de otra manera resultarían en las visitas de los nodos inicialmente seleccionados como nodos semilla. En el ejemplo anterior se contemplan las posibilidades de inserción de nodos intermedios entre el depósito central y el nodo 33, para el problema R103, y para el caso de un $\beta = 1,10$. Los nodos que podrían visitarse en el camino son los indicados en color rojo. Esta delimitación artificial de las distancias incrementales permitidas fomenta la generación de rutas con inserciones muy buenas, a riesgo de computar esperas elevadas y de empeorar la solución final siendo necesario un mayor número de vehículos para realizar todas las visitas.

Una vez establecidas las diferentes posibilidades de inserción simple se recogen en una lista, entonces se estudia la posibilidad de realizar una inserción doble. Ésta solamente va a ocurrir cuando existan dos ó más nodos en la lista de candidatos a ser inserciones simples. De esta manera se analizan todas las posibles combinaciones de los nodos incluidos en la lista de inserciones simples tomados dos a dos, de manera que se seleccionará el par de nodos que menor desplazamiento provoque con respecto a la distancia entre el nodo origen y el nodo destino. Para el ejemplo anterior se contemplan únicamente dos posibilidades, representadas en la figura 4.

Figura 4 Posibilidades de inserción doble.



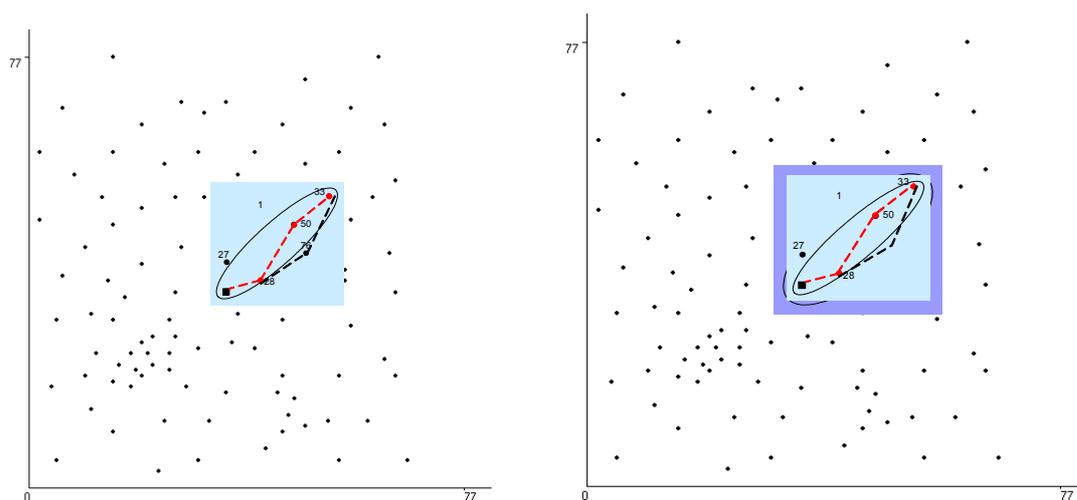
Una vez seleccionado la secuencia de nodos a ser insertados entre el nodo origen y el nodo destino, que en el ejemplo anterior se corresponde con la segunda alternativa, dado que es la que minimiza el desplazamiento adicional sobre la distancia original, entonces se procede a la comprobación de que este desplazamiento adicional no supera la delimitación artificial impuesta por la combinación de los parámetros β y γ . La necesidad del parámetro γ es bastante intuitiva si contemplamos dobles inserciones. Es necesario ampliar el área de influencia de forma artificial, ya que generalmente una inserción doble supone un desplazamiento mayor que las inserciones simples, y resultando aún así en una buena estrategia. Por ello es necesario incrementar artificialmente el área de influencia para el caso de las inserciones dobles ya que sino se rechazarían la mayor parte de las inserciones dobles, tal y como ocurriría en para el ejemplo anterior, y como se representa en la figura

5. En el caso de la combinación de los nodos 28 y 50 como posibles secuencia de visitas intermedias, el vehículo recorrería una distancia total que sobrepasaría la delimitación de distancia incremental permitida denotada por β y que se corresponde con el área azul, de manera que la suma de las distancias se correspondería con la línea de puntos en color negro, y caería fuera de la zona de influencia, por lo que se rechazaría esa combinación, aún siendo una buena opción.

Por ello para que el modelo no rechace estas buenas combinaciones se establece la necesidad de incrementar esta área de influencia a través del parámetro multiplicador γ , tal y como se recoge en la figura 3.8, para un valor de $\gamma=2$.

De esta manera la selección de la secuencia de nodos cumpliría todas las restricciones impuestas por el modelo, así como las restricciones propias de la temporalidad existente para las ventanas de tiempo de todos los nodos, las restricciones de carga de los vehículos y las restricciones sobre un eventual regreso al nodo central.

Figura 5 Evaluación de la restricción sobre la distancia incremental recorrida por el vehículo, y ampliación de la zona de inserción para las inserciones dobles a través del parámetro γ

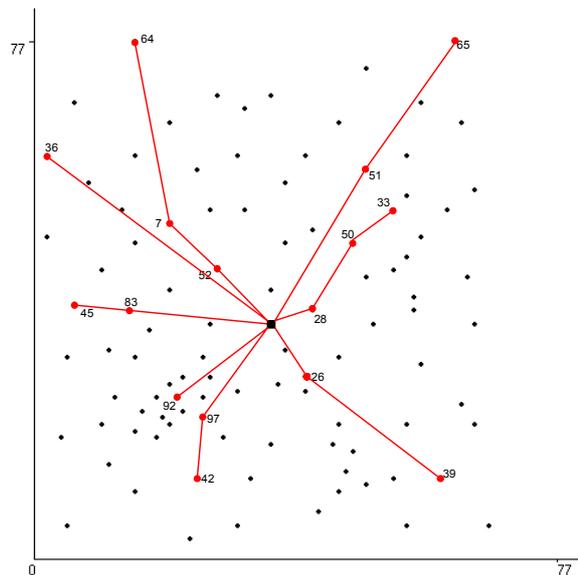


Así se procedería con todos los nodos semilla. En este sentido el hecho de comenzar por los nodos con menores holguras, implica que la selección de nodos a ser insertados es mucho mejor, ya que se encontrarán en puntos muy cercanos a la línea recta entre el nodo central y el nodo semilla en cuestión. El gráfico resultante de estas inserciones simples y dobles para esta primera etapa de planificación se recoge en la figura 6

Una vez realizado el estudio para estas primeras asignaciones, tiene lugar la segunda y posteriores fases del algoritmo, consistentes en la asignación de los siguientes R nodos y sucesivos. Para ello se seleccionan los siguientes R nodos en función de los menores tiempos de cierre, equivalentes a los nodos que requieren una atención más inmediata. Una vez seleccionados, se estudian cada uno de ellos detalladamente para su asignación a cada una de las rutas existentes en ese momento. La asignación se hace en todo momento respetando las

restricciones temporales impuestas por los tiempos acumulados de cada vehículo, así como los correspondientes tiempos estimados de llegada a los nodos en consideración.

Figura 6 Resultado de los primeros nodos de las R rutas iniciales, después de aplicar las reglas de asignación, inserción simple, e inserción doble.

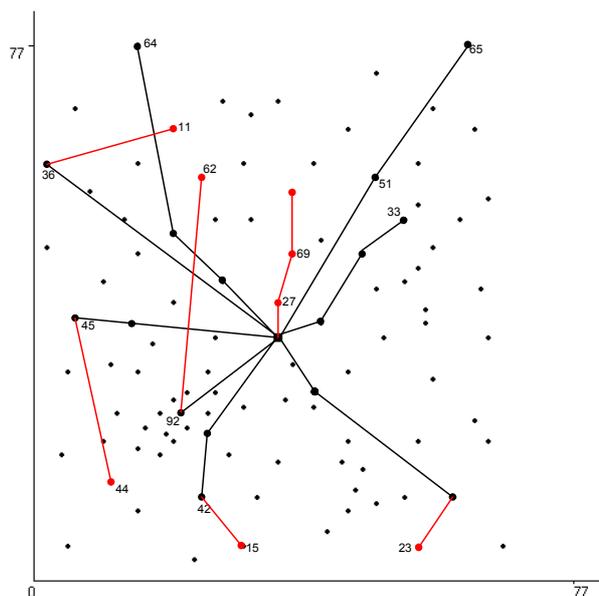


Para realizar esta asignación se seleccionan jerárquicamente los nodos cuyo momento de cierre es más temprano, de forma que se procede a añadirlo a la ruta a la que esté más cercano, siempre que se respeten todas las restricciones. En la figura 7 se muestran los siguientes nodos a ser atendidos, así como su asignación a las diferentes rutas existentes.

En el caso de que no fuera posible la asignación de un nodo a una ruta, entonces se procede a la generación de una nueva ruta, como ocurre con el nodo 27 del ejemplo.

Una vez asignado un nodo a una ruta, se procede con el estudio de las posibilidades de inserción de nuevos nodos en el camino, tanto individualmente como inserciones dobles. Después de añadir los nodos al vehículo correspondiente, se vuelve a recalcular la lista R de nodos críticos. Es importante destacar que la lista se recalcula cada vez que se amplía una ruta con nuevas adiciones, dado que si bien los tiempos de cierre de los nodos de la lista no cambian, lo que sí cambian son las distancias entre estos nodos y las posiciones de los vehículos que se hayan desplazado.

De esta manera se van completando las rutas, hasta que finalmente no quedan nodos. Cuando esto ocurre se finalizan todas las rutas haciendo regresar los vehículos al depósito. El algoritmo procede respetando en todo momento las restricciones temporales de llegadas y salidas a los nodos, al igual que al depósito central, así como las restricciones derivadas de las cargas máximas admitidas por cada camión. Si bien intuitivamente es bastante simple, la complejidad se aborda con la modelización e implementación de todas las reglas de decisión, así como de las propias restricciones del problema.

Figura 7 Selección y asignación de los siguiente R nodos críticos, según sus momentos de cierre.

3. COMPARATIVA CON OTROS MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN

Dentro del conjunto de métodos para la construcción de rutas, el algoritmo recogido en este trabajo recoge algunos de los procedimientos utilizados por Solomon (1987) inicialmente, y que sirven al resto de la comunidad científica para desarrollar sus modelos propios. En este trabajo se recogen también estos principios, pero difiere de los métodos de Solomon en la forma de implementarlos. De entre los métodos que propone Solomon, el más exitoso es el denominado *II*. Los pasos del mismo comienzan con la selección de un cliente semilla a partir del cual se añaden el resto de los clientes de la ruta hasta que ésta agota su horizonte temporal, o bien se cubre la capacidad del vehículo. Si quedan clientes sin asignar, entonces se repiten los pasos descritos, hasta que se agotan los clientes. Los clientes semilla seleccionados son aquellos que, o bien son los más distantes del depósito central, o bien los que proporcionan un momento de apertura más temprano para realizar el servicio.

Este algoritmo de Solomon se asemeja al presentado en este trabajo en que ambos contemplan la selección de clientes semilla para realizar la construcción de las rutas. Si bien en el caso de Solomon el proceso de construcción de las rutas es secuencial, mientras que en el caso del presente trabajo las rutas se construyen de forma paralela. Igualmente Solomon selecciona a los clientes semilla bien en función de la lejanía desde el depósito o bien los de apertura más temprana. En el caso del presente trabajo la selección se hace enteramente atendiendo a los criterios de temporalidad, y más en concreto en función de la holgura resultante entre el momento de cierre de cada nodo, y el tiempo necesario hasta llegar a él. El criterio del momento de apertura no parece adecuado teniendo en cuenta las diferentes amplitudes de los nodos, y que puede provocar la visita de nodos cuya apertura es muy temprana, pero que después permanecen abiertos durante mucho tiempo, siendo en ese sentido nodos muy flexibles. En este caso es preferible comenzar por aquellos nodos menos flexibles, y delimitan la planificación, dejando los nodos más flexibles como nodos "*comodín*" para posteriores movimientos de las rutas.

Solomon también contempla la posible inserción de clientes entre cada par de nodos i y j . Una vez que se construyen las rutas para los nodos semilla, entonces el algoritmo de Solomon empieza a considerar posibles inserciones de los nodos no asignados entre las rutas ya existentes.

En este trabajo se mejoran los planteamientos de Solomon en que no solamente es posible insertar nodos individualmente entre cada par de nodos (i,j) , sino que también son posibles las consideraciones de pares de nodos simultáneamente. Igualmente el algoritmo presentado en este trabajo contempla una posible limitación del conjunto de posibles nodos a ser insertados, no solamente por sus ventanas de tiempo, sino que en el presente trabajo también se integra un criterio de desplazamiento geográfico máximo autorizado, de manera que todavía se restringe más el área de posibles nodos a ser insertados, tal y como la define Dullaert en sus trabajos, y que se analiza con más detalle en las próximas líneas.

En el criterio c_{12} Solomon indica el retraso en la llegada al nodo destino provocado por la visita del nodo intermedio. Dicho de otra manera, es la reducción de la holgura resultante por el tiempo de cierre del nodo en cuestión y el tiempo necesario en llegar hasta él. En ese sentido se corresponde en este trabajo con el valor obtenido por la nueva holgura temporal resultante tras haber realizado la inserción de los nodos intermedios, indicativa del tiempo consumido en realizar esa visita intermedia, y que lógicamente tiene mucho que ver con la cercanía o lejanía del nodo finalmente insertado. En ese sentido parece redundante el establecer estos dos criterios, dado que ambos hacen referencia a la misma información.

En resumen, Solomon establece una medida del desplazamiento geográfico provocado por el nodo insertado, y en segundo lugar una medida del tiempo consumido por realizar ese desplazamiento. En este sentido estas dos medidas se refunden en una sola medida en el algoritmo presentado en este trabajo.

Si bien, la dicotomía presentada por Solomon en cuanto a las dos medidas, sí se contempla en la segunda fase del algoritmo expuesto aquí, dado que a partir de la segunda vuelta si es necesario combinar ambas medidas, dado que existen múltiples rutas.

Solomon sin embargo solamente establece este criterio para una elección secuencial de las rutas. Es decir, que las rutas se construyen una tras otra, mientras que en este algoritmo la construcción es paralela, de forma que se aprovechan mejor las oportunidades de inserción que en el caso de una construcción secuencial. Si bien la construcción secuencial tiene la ventaja de que las rutas se van saturando en cuanto a todas las posibles visitas que se pueden realizar, de manera que se reduce el número de vehículos necesarios a costa de incrementarse las distancias recorridas por inserciones en rutas anteriores de nodos que serían buenas opciones para rutas posteriores.

4. RESULTADOS DE LOS ALGORITMOS MÁS CONOCIDOS EN LOS PROBLEMAS DE SOLOMON (1987)

Dentro de los métodos de construcción de rutas, nos encontramos con los trabajos de Solomon sobre los diferentes mecanismos de inserción propuestos para la resolución de los problemas del VRPTW. Igualmente se ha incluido en este grupo las soluciones obtenidas por Potvin et al. (1993) con su versión paralelizada del algoritmo de Solomon, y el algoritmo de Ioannis (2001). Estos serían los tres ejemplos que formarían el grupo de los algoritmos considerados puramente como de construcción de rutas, lo que resalta el escaso trabajo realizado en esta línea, no por la calidad de los mismos, sino por la escasa investigación realizada. Generalmente se asume la hipótesis de que este tipo de métodos son poco eficaces por naturaleza, ya que constan de múltiples inconvenientes, tal y como se ha reseñado en el apartado anterior, sin embargo pocos reconocen sus grandes ventajas, derivadas de resultar métodos deterministas, y por ello capaces de replicar cualquier solución, lo que no es posible en métodos estocásticos. Igualmente resultan ser los métodos más rápidos en el cómputo de las soluciones, y por último y quizás más importante, es que sirven de base para los segundos, de manera que a mayores velocidades de cálculo, y mejores resultados obtenidos, también se mejoran los resultados de los métodos metaheurísticos.

Tabla 1 Comparación de los métodos de construcción de rutas

Construcción	R1		R2		RC1		RC2		C1		C2	
	Dist	NV	Dist	NV	Dist	NV	Dist	NV	Dist	NV	Dist	NV
Solomon (1987)	1437	13,60	1402	3,30	1597	13,50	1682	3,9	951	10	692	3,13
Potvin y Rousseau (1993)	1509	13,30	1387	3,10	1724	13,40	1651	3,6	1343	10,67	797	3,38
Ioannu et al. (2001)	1370	12,67	1310	3,09	1512	12,50	1483	3,5	865	10	662	3,13
Guillén et al. (2004)	1955	26,00	1239	8,00	2247	21,00	1573	11	1955	25	1485	14

En la tabla 1 se muestran los resultados resumen para los diferentes grupos de problemas desarrollados por Solomon (1987). Se resaltan en negrita los casos en los que el algoritmo propuesto supera alguno de los resultados de otros autores. En este sentido cabe destacar la mejoría que presenta el método desarrollado en este trabajo en el caso de los grupos de problemas R2 y RC2, que tal y como se comentaba en el apartado anterior, son los ejemplos en los que el algoritmo presentaba una mayor eficacia y eficiencia, sobre todo en los casos particulares donde existían nodos con ventanas unilaterales, de manera que se presentaba una mayor flexibilidad en el mecanismo de inserción. Si bien, estos mejores resultados se obtienen con un mayor número de vehículos, aunque recordemos que el objetivo en el presente modelo es la minimización de la distancia total recorrida.

La diferencia con respecto al caso de los modelos de Solomon y Potvin es que el algoritmo presentado en este trabajo realiza una saturación incremental de las rutas, ya que a medida que se va avanzando en el contador temporal del horizonte de planificación se va atendiendo a las diferentes necesidades impuestas por los clientes, de manera que las rutas se van saturando a medida que avanzan los vehículos, y además esto se realiza con varios vehículos simultáneamente, de forma que se lleva a cabo una construcción paralela de las rutas. Sin embargo Solomon, establece la programación de las visitas a posteriori, en el sentido de que el algoritmo escoge a ciegas el nodo más distante del depósito, y a partir de ahí satura hacia delante y hacia atrás los nodos que

maximizan los ahorros generados por sus respectivas inserciones en la ruta creada, hasta que ya no es posible realizar más inserciones. Una vez creada esta primera ruta, se inicia la segunda, y así sucesivamente hasta haber insertado todos los nodos del problema. En este sentido el método de Solomon parte de una selección de nodos semilla que pueden no estar abiertos al comienzo de la planificación, de manera que no existe una correlación entre la urgencia que ese nodo exige para ser atendido o asignado, y el momento de su selección para formar parte de una ruta en la solución. Por ello este tipo de métodos son poco adecuados para situaciones donde se requiera una planificación dinámica, o bien exista algo de incertidumbre sobre la definitiva realización de los pedidos por parte de los clientes, ya que su asignación no se hace con una mentalidad de programación temporal lógica, sino a través de un método de optimización global, en el que la solución a cualquier posible contingencia o cambio afecta enormemente a la solución previamente obtenida, mientras que en el algoritmo aquí presentado, los cambios en nodos cuya necesidad de atención sea posterior al reloj de la programación, no provocan cambios importantes en la planificación de las rutas, ya que hasta ese momento no se habrán tenido en cuenta.

En resumen, podemos afirmar que el trabajo aquí presentado supone un nuevo método heurístico de construcción de rutas que mejora algunos aspectos de los métodos clásicos de construcción de rutas, que en su mayoría se fundamentan en los planteamientos de Solomon (1987). Sin embargo, la asignatura pendiente es la adquisición de una mayor robustez en el cálculo de la solución de cualquier tipo de problemas, ya que su eficacia es bastante desigual según que tipo de problemas esté resolviendo. Igualmente sería necesario ser más crítico en la generación de nuevas rutas durante la programación, ya que muchas de las rutas adicionales creadas durante la programación solamente visitan uno o pocos clientes, de manera que serían susceptibles de ser reasignados, insertando estos clientes en rutas más completas.

BIBLIOGRAFÍA

- Balakrishnan N., (1993), "Simple Heuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows", *J. Opl. Res. Soc.*, Vol. 44, No. 3, p. 279-287.
- Clarke G. y Wright J.W., (1964), "Scheduling of Vehicles from a Depot to a number of Delivery Points", *Oper. Res.*, Vol. 12, p. 568-581.
- Dullaert W., (2000a), "Impact of Relative Route Length on the Choice of Time Insertion Criteria for Insertion Heuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows", en *Proceedings of the Rome Jubilee 2000 Conference Improving Knowledge and Tools for Transportation and Logistics Development*: 8th Meeting of the Euro Working Group Transportation, Faculty of Engineering, "La Sapienza", University of Rome, Italy, B. Maurizio (ed), 153-156, Rome
- Dullaert W., (2000b), "A Sequential Insertion Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows with Relatively Few Customers per Route", Research Paper, Faculty of Applied Economics UFSIA-RUCA, 2000:014, Antwerpen, Bélgica
- Foisy C., y Potvin J.Y. (1993) "Implementing an Insertion Heuristic for Vehicle Routing on Parallel Hardware", *Computers and Operations Research* 20, 737-745
- Guillén E. (2003) Análisis de los métodos de construcción de rutas en los sistemas de planificación para el problema del VRPTW", Tesis Doctoral, Departamento de Análisis Económico y Administración de Empresas, Universidad de La Coruña, España
- Ioannou G., Kritikos M., y Prastacos G., (2001), "A Greedy Look-Ahead Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows", *Journal of the Operational Research Society* 52, 523-537
- Potvin J.Y. y Rousseau J.M., (1993), "A Parallel Route Building Algorithm for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Windows", *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 66, p. 331-340.