

NUEVAS TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN DE RUTAS PARA EL CASO DEL VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME WINDOWS

Eduardo Guillén-Solórzano (eduardoguillen@mundo-r.com)

Manuel Martínez-Carballo (mmc@economistas.org)

Universidade da Coruña

Área de Organización de Empresas

E.U. Diseño Industrial, Campus de Esteiro, Dtor. Vázquez Cabrera, S.N. 15403, Ferrol, España

Susana Barbeito-Roibal (sbar@udc.es)

Universidade da Coruña

Área de Organización de Empresas

Escuela Politécnica Superior, Campus de Esteiro, S.N. 15403, Ferrol, España

RESUMEN

In the last decades, the well-known problem of vehicle routing has derived into a number of different variants. One of these variants is the Vehicle Routing Problem with Time Windows. It is in 1987 when the bottom line of the different solutions techniques is established, since in that date, Solomon (1987) presents a state of the art research, as well as a number of benchmark problems. Since then, the development of solution techniques has increased exponentially, although most of these are based on the previous works of Solomon. In this paper we examine a number of new techniques in order to build up the routes from scratch, integrating dispersed customers into the routes the vehicles must conduct, and respecting at all times the capacity and time requirements restrictions. By using these new techniques we outperform previous methods in some of the benchmark problems, as well as the computation time needed.

PALABRAS CLAVE: VRPTW, logistics, combinatorial optimization, routing.

1. INTRODUCCIÓN

La planificación de rutas de transporte es una tarea ardua que ha sido objeto de innumerables estudios y desarrollos a lo largo del tiempo. Desde sus inicios en la primera mitad del s XX, el problema del viajante, o problema del TSP (Traveling Salesman Problem), se convirtió en un ejemplo típico de optimización combinatoria no resoluble en tiempo polinómico. Por ello desde entonces se han buscado multitud de procedimientos de solución exactos y heurísticos para averiguar las secuencias de ruta más corta entre un conjunto de clientes dispersos en el espacio. Desde su modelización y después de la aparición de un conjunto de problemas estándar, las propuestas y variantes se incrementaron notablemente. Entre ellas se encuentra la variante del VRPTW, consistente en la existencia de un número determinado de vehículos que han de suministrar determinadas cantidades de producto a un conjunto de clientes dispersos en el espacio y que demandan los servicios en determinados intervalos temporales. Además también se contemplan las restricciones de carga de cada vehículo, y las restricciones temporales del almacén central desde el que han de partir todos los vehículos y al que han de regresar al final de ese horizonte temporal. Ciertamente se corresponde con el problema general de la planificación de rutas de transporte que se puede dar en cualquier empresa industrial, o del sector de transportes, tanto de pasajeros, como de mercancías.

A pesar de su modelización matemática como un problema de programación lineal entera, su solución directa es enormemente compleja, además de requerir tiempos de cálculo que en ocasiones ascienden a meses de computación en redes de numerosos ordenadores. Es por esto que los métodos de aproximación, también conocidos como métodos heurísticos, han sido los grandes protagonistas en los últimos tiempos, ya que consiguen obtener muy buenos resultados, cercanos al óptimo, en tiempos de computación mucho más reducidos.

2. ANTECEDENTES

En la evolución de las soluciones para el problema del VRPTW es necesario marcar el punto de partida en 1987, ya que es en este año cuando Solomon aporta un conjunto de problemas estandarizados que sirven a partir de ese momento como referente para todos los modelos desarrollados en la línea de investigación orientada al VRPTW.

En ese sentido sirve como plataforma de comparación de la bondad de los métodos desarrollados por todos los autores, constituyendo una verdadera batería de soluciones normalizadas. Por ello, y con el ánimo de contrastar la eficacia y eficiencia del método recogido en este trabajo, solamente se comentan los algoritmos posteriores a esa fecha. Al mismo tiempo que Solomon (1987) aporta sus conocidos problemas tipo, también realiza una recopilación de los trabajos elaborados hasta esa fecha con la intención de sintetizar todos los avances en tres nuevos métodos.

El primero de estos métodos consiste en una extensión del conocido método de los ahorros de Clarke y Wright (1964) en el que comienza con una solución en la que cada cliente constituye una única ruta servida por vehículos individuales y 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 uniones de sendos nodos i y j en rutas independientes y que equivalen a $S_{ij} = d_{i0} + d_{0j} - d_{ij}$.

En este sentido, el algoritmo que presenta Solomon establece el cálculo de los ahorros para la construcción de rutas más grandes, pero respetando en todo momento las restricciones temporales impuestas por el modelo. Se trata de unir las mejores combinaciones hasta que ya no es posible conseguir ningún ahorro. Generalmente las soluciones no son demasiado buenas.

El segundo método que propone Solomon consiste en un método de adición del cliente más cercano a la ruta, pero en este caso contemplando un 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 estos a las mismas. Una nueva ruta se genera cuando no es posible incluir a un cliente seleccionado en ninguna posición factible.

Por último, el tercer y más exitoso método heurístico propuesto por Solomon 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.

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.

Después de iniciar una ruta con uno de estos clientes semilla, el algoritmo de Solomon utiliza dos criterios de inserción, $c_1(i,u,j)$ y $c_2(i,u,j)$ para seleccionar la inserción del cliente u entre los clientes adyacentes i y j . Sea $(i_0, i_1, i_2, \dots, i_m)$ la ruta en consideración donde i_0 e i_m representan al depósito. Para cada cliente no asignado u , se calcula el mejor coste de inserción en una ruta predeterminada de la siguiente manera:

$$c_1(i(u), u, j(u)) = \underset{\rho=1, \dots, m}{opt} c_1(i_{\rho-1}, u, i_{\rho})$$

A continuación, el mejor cliente u^* para ser insertado en la ruta es aquel para el que

$$c_2(i(u^*), u^*, j(u^*)) = \underset{u}{opt} c_2(i(u), u, j(u))$$

donde u es un cliente no asignado a ninguna ruta, y factible con las restricciones, e i y j son los clientes entre los que se insertaría.

Entonces el cliente u^* se inserta en la ruta entre los clientes $i(u^*)$ y $j(u^*)$. Cuando no hay más clientes para ser insertados en las rutas existentes, entonces el algoritmo genera una nueva ruta, a no ser que ya se hayan insertado todos. Para el cálculo de $c_1(i,u,j)$ se tiene en cuenta lo siguiente

$$c_1(i, u, j) = \alpha_1 c_{11}(i, u, j) + \alpha_2 c_{12}(i, u, j)$$

en donde

$$\begin{aligned} \alpha_1 + \alpha_2 &= 1, \quad \alpha_1 \geq 0, \quad \alpha_2 \geq 0 \\ c_{11}(i, u, j) &= d_{iu} + d_{uj} - \mu d_{ij}, \quad \mu \geq 0 \\ c_{12}(i, u, j) &= b_{ju} - b_j \end{aligned}$$

siendo d_{iu} , d_{uj} , y d_{ij} son las distancias entre los clientes i y u , u y j , e i y j respectivamente. El parámetro μ controla los ahorros en la distancia y b_{ju} denota el nuevo momento de llegada al cliente j , suponiendo que el cliente u se haya insertado en la ruta mientras que b_j era el momento de llegada antes de la inserción.

Es realmente en estos dos valores c_{11} y c_{12} donde se aprecian los criterios que utiliza Solomon para establecer estas inserciones. En el primero describe un criterio propio del método de los ahorros, dado que computa un valor equivalente al incremento en el desplazamiento provocado por esa inserción. En este sentido el planteamiento de estas inserciones se puede comparar con el mecanismo de estudio propuesto en este trabajo, que si bien no computa directamente este incremento en el desplazamiento, sí se establece una medición del incremento a través de la reducción de la holgura resultante entre los nodos i y j , también denominada *distancia de inserción* por Dullaert (2000a). Las técnicas presentadas en este trabajo contemplan inicialmente una holgura entre el nodo origen y el nodo destino. Esta holgura se corresponde con el tiempo disponible para realizar posibles escalas intermedias, correspondientes a inserciones de nodos entre el origen y el destino. Por ello se contemplan las nuevas holguras resultantes para las posibles inserciones de nodos intermedios, resultando esta nueva holgura en una medida del desplazamiento adicional provocado.

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. También se contempla una posible limitación del conjunto de posibles nodos a ser insertados, no solamente por sus ventanas de tiempo, sino también por 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.

Solomon establece su criterio para una elección secuencial de las rutas. Es decir, que las rutas se construyen una tras otra, mientras que en este trabajo se propone la construcción paralela de las rutas, 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.

Una vez seleccionado el nodo u a ser insertado, entonces se calcula un segundo criterio denotado por c_2 . Este segundo criterio hace referencia a la decisión final de inserción entre los nodos i y j , o bien la creación de una nueva ruta que visite el nodo u directamente desde θ . El criterio de inserción c_2 se calcula como $c_2(i,u,j) = \lambda d_{ou} - c_1(i,u,j)$, $\lambda \geq 0$, donde el parámetro λ se utiliza para ponderar la importancia de mantener el nodo como una ruta separada, frente a la opción de realizar definitivamente la inserción.

Finalmente Solomon 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 $c_{12}(i,u,j)$ 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. Dullaert mejora ligeramente los criterios propuestos por Solomon para el caso de rutas muy cortas, lo más interesante de sus trabajos son las reflexiones sobre las posibles inserciones entre cada dos nodos adyacentes. En este sentido analiza alguna de las características que también se encuentran en las técnicas aquí presentadas.

Este autor también considera la inserción doble de nodos, que lo denomina *inserción de arcos*, y para ello también establece el cálculo de las zonas de inserción correspondientes, a través del cálculo de las

correspondientes elipses, en función de las restricciones oportunas. Estas restricciones son las mismas que fundamentan el algoritmo presentado en este trabajo¹.

Este desglose de conceptos los utiliza para mejorar el desarrollo propuesto por Solomon para las inserciones de nodos entre el depósito y el primer nodo de cada ruta, de manera que consigue afinar más las inserciones de estos primeros nodos, ya que el algoritmo de Solomon infravaloraba únicamente estos primeros nodos. Esto bien se podría haber realizado a través de la restricción de esa elipse de forma artificial, tal y como se propone en el trabajo presentado aquí.

Potvin y Rousseau (1993) presentan una versión paralelizada del método de inserción de Solomon *II*, 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.

En este método también se presentan similitudes con las técnicas desarrolladas en este trabajo. Se mejora sustancialmente el modelo inicialmente propuesto por Solomon, ya que en este caso sí se contempla la construcción simultánea de rutas, y no de forma secuencial como lo hacía Solomon. En ese sentido gana en similitud con las técnicas aquí presentadas. Recordemos que éstas generan un primer conjunto de rutas, atendiendo a la decisión de un número R de nodos semilla establecido por el usuario, y a partir de ese momento las asignaciones de los siguientes nodos a las rutas se realiza en función a la ruta de la que se encuentren más cercanos.

En el resto de los trabajos recogidos en la literatura sobre métodos de construcción de rutas, nos encontramos generalmente con el estudio de posibles implementaciones diferentes de los métodos originales de Solomon (Foisy y Potvin, 1993), o incluso en los análisis de aplicabilidad de estos modelos a situaciones reales (Balakrishnan, 1993; Ioannou et al., 2001). Si bien, es necesario destacar que los planteamientos establecidos por Solomon son la base para el desarrollo del resto de la mayor parte de los métodos de construcción de rutas existentes, así como de los propios modelos metaheurísticos².

3. TÉCNICAS DE CONTRUCCIÓN DE RUTAS PARA EL VRPTW

El modelo presentado en este trabajo se ha incluido 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 9 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.

¹ Para mayor detalle referirse a los trabajos de Dullaert (2000a y 2000b).

² Para ampliar estas informaciones referirse a Guillén (2003)

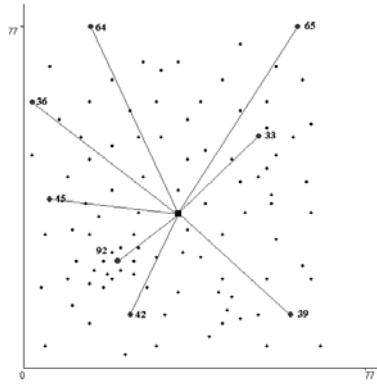


Figura 1 Regla de asignación. Cada uno de los R nodos semilla se asigna a una ruta diferente.

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, 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, y que en este caso serían los nodos 51, 81, 1, 50, 3, 28 y 12.

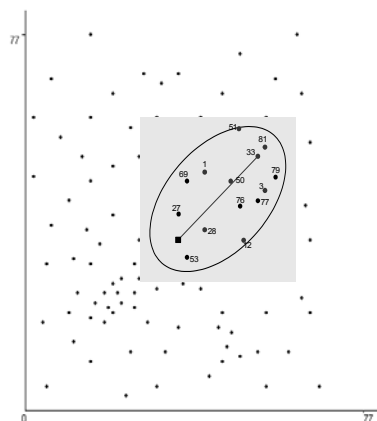


Figura 2 Área de inserción establecida según la holgura temporal existente

Tal y como se comentaba anteriormente 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 que 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.

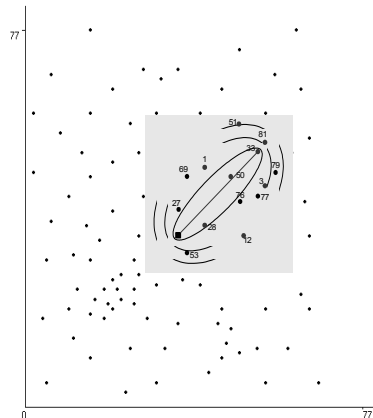


Figura 3 Delimitación de la zona de inserción simple a través del parámetro β

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 para insertar los nodos intermedios 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 serían únicamente los nodos 50 y 28. 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.

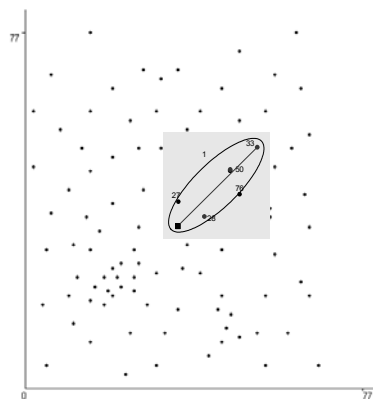


Figura 4 Selección de posibles nodos candidatos a ser insertados para un $\beta=1.10$, entre el nodo central y el nodo 33.

Una vez establecidas las diferentes posibilidades de inserción simple se recogen en una lista para posteriormente estudiar 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: la primera sería la siguiente subruta 0-50-28-33 y la segunda consistiría en 0-28-50-33.

En este caso se escogería la segunda opción dado que es la que minimiza el desplazamiento adicional sobre la distancia original. A continuación 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 3.7. Esta afirmación obedece a que 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 elipsoidal, de manera que la suma de las distancias se correspondería con la línea de puntos en color más oscuro, y caería fuera de la zona de influencia, por lo que se rechazaría esa combinación, aún siendo una buena opción.

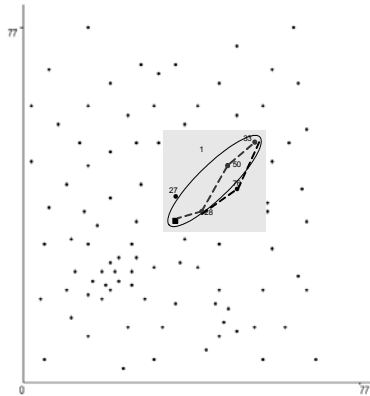


Figura 5 Evaluación de la restricción sobre la distancia incremental recorrida por el vehículo.

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 6, 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.

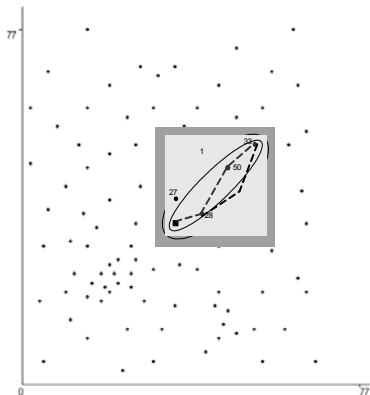


Figura 6 Ampliación de la zona de inserción para las inserciones dobles a través del parámetro γ

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 7

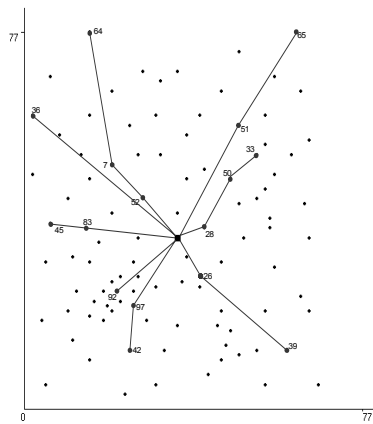


Figura 7 Resultado de los primeros nodos de las R rutas iniciales, después de aplicar las reglas de asignación, inserción simple, e inserción doble.

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 y los correspondientes tiempos estimados de llegada a los nodos en consideración.

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 8 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.

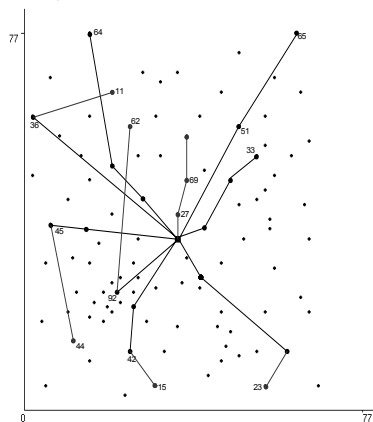


Figura 8 Selección y asignación de los siguiente R nodos críticos, según sus momentos de cierre.

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. Estos procedimientos respetan 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.

4. SOLUCIONES

Para ello se desarrolló un programa informático y se aplicó a los 56 problemas tipo de Solomon (1987) para contrastar la bondad de los procedimientos aquí expuestos. Las soluciones obtenidas se presentan a continuación a modo de comparativa con las obtenidas a través de otros métodos de construcción.

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. (2003)	1955	26,00	1239	8,00	2247	21,00	1573	11	1955	25	1485	14

Tabla 1 Comparación de los métodos de construcción de rutas

En la tabla anterior se presentan los resultados medios para los diferentes grupos de problemas de Solomon (1987). Destaca el mejor comportamiento de estas técnicas en los problemas de tipo R2 y RC2, que como es sabido se corresponden con aquellos casos en los que el horizonte temporal es más amplio, y por ello los vehículos han de realizar un mayor número de visitas. Por el contrario, se obtienen peores resultados para los problemas en los que el horizonte temporal es más reducido, y que se corresponden con casos en los que las rutas son más cortas.

5. CONCLUSIONES

Las técnicas de construcción presentadas en este trabajo para resolver el problema del VRPTW, permiten mejorar los métodos originales de construcción de rutas propuestos por Solomon (1987), y desarrollados por otros tantos autores. En este sentido en este trabajo se buscaba un perfeccionamiento de las reglas de decisión subyacentes en los métodos de construcción para conseguir una mejor combinación de clientes en las rutas de los vehículos. Tal y como se demuestra en los resultados obtenidos, estas soluciones son tanto mejores cuanto mayor es el horizonte temporal del problema. Igualmente se obtienen mejores soluciones cuanto mayor es la dispersión de los nodos en el espacio. En este sentido nos encontramos precisamente con los problemas menos intuitivos, ya que en los casos en los que los nodos están agrupados, y que como es sabido se corresponden con los problemas tipo C (*Clusterized*), la construcción de las rutas es mucho más intuitiva.

Lo interesante de estas reglas también estiba en la velocidad en la construcción de las rutas. Debido al proceso discriminante que se contempla, el número de opciones en las inserciones de nodos consideradas, al igual que en las adiciones de los mismos, permite una mayor agilidad al algoritmo, de manera que es capaz de arrojar soluciones muy rápidas.

Otra de las ventajas reside en la parametrización del modelo, de manera que es posible adaptar el modelo a los condicionantes del problema. Por ejemplo, si existe una mayor dispersión de nodos o clientes en el espacio, entonces será posible reducir las áreas de inserción consideradas, dado que siempre habrá nodos intermedios en el camino. Caso contrario, si nos encontramos con que los nodos está bastante agrupados, entonces será necesario ampliar enormemente las áreas de inserción para encontrar nodos que saturen los tiempos de espera que en otro caso se computarían.

Por último cabe destacar la necesidad de implementar sobre este tipo de procedimientos heurísticos de construcción de rutas, otras reglas o procedimientos de mejora a través de los cuáles se puedan mejorar las soluciones inicialmente obtenidas. Estos procedimientos generalmente hace referencia a los procedimientos de intercambios miopes de nodos o arcos entre diferentes rutas, de manera que paulatinamente se va mejorando la

solución inicial. También cabe destacar la posibilidad de implementar este tipo de técnicas de construcción en métodos de búsqueda metaheurísticos, a través de los cuales se procede a búsquedas intensivas de posibles combinaciones de arcos, para mejorar las soluciones de partida.

A pesar de ello estas técnicas suponen un avance hacia métodos más rápidos y eficaces en la construcción de rutas más cortas para el problema del VRPTW.

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.