

Planeación del transporte y enrutamiento de vehículos en sistemas de producción

Panorama actual de trabajos y algunas proposiciones

Jairo R. Montoya Torres*

Resumen

Este artículo considera los problemas de enrutamiento de vehículos y planeación de tareas de servicio (carga/descarga) como partes integrantes del problema de gestión de transporte en un sistema de producción. En primer lugar se presentan las características que permiten diferenciarlos del problema convencional de enrutamiento de vehículos en redes metropolitanas (VRP). Posteriormente, se propone un modelo matemático con el fin de abordar los problemas de forma independiente, a través de la minimización tanto del rendimiento promedio del sistema como de la distancia total recorrida por los vehículos. Seguidamente se exponen y analizan los algoritmos de enrutamiento de vehículos y de planeación del transporte existentes actualmente en la literatura. Así mismo, se presentan recomendaciones y conclusiones para futuros trabajos de investigación.

Palabras clave: Enrutamiento de vehículos, planeación de transporte, sistemas de manufactura, estado del arte.

Abstract

This paper considers the problem of scheduling and routing vehicles as a part of the transportation management problem in a manufacturing system. First of all, the paper exposes the characteristics that make this problem different from the conventional version of the VRP. Then, a mathematical formulation is proposed in order to minimize system's throughput and total travel distance of vehicles. Afterwards, an analysis of both scheduling and routing algorithms is done so as to present some directions for further research.

Key words: Vehicle routing, vehicle scheduling, manufacturing systems, survey.

Fecha de recepción: 17 de febrero de 2003

*Ingeniero Industrial, Universidad del Norte; M.Sc. Ingeniería Industrial, Institut National Polytechnique de Grenoble (Francia); candidato a Ph.D., Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (Francia). Investigador del Centre Microélectronique de Provence, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne. Docente del programa de Maestría en Ingeniería Industrial, Universidad del Norte. montoya@emse.fr

INTRODUCCIÓN

Dentro de un sistema de producción, el problema de gestión del transporte (planeación y enrutamiento) es importante tanto al momento del diseño (i.e. determinación del número de vehículos) como durante toda la vida productiva del mismo (gestión y optimización global). Al momento de decidir la distribución en planta, las reglas de planeación del transporte de materiales, al igual que el enrutamiento de los vehículos, deben ayudar al sistema de control a tomar decisiones de forma dinámica. De otra parte, durante la vida útil de la fábrica, el sistema de gestión del transporte debe igualmente contribuir a la optimización de los índices globales de evaluación del sistema.

Este artículo presenta un análisis de las características de este problema y hace particular énfasis en el estudio de los modelos y algoritmos existentes en la literatura. En primer lugar, en la sección 2 se hace una exposición de las características del problema de gestión de transporte, desde el punto de vista de la planeación y de la gestión de rutas para los vehículos en un taller de producción. La complejidad de ciertas aplicaciones industriales deja entrever la necesidad de abordar estos dos problemas de manera separada. Por lo tanto, se propone una serie de particularidades que justifican este enfoque.

En la sección 3 se describe la formalización de los problemas de planeación del transporte y de enrutamiento de vehículos a través de la presentación de un modelo matemático, el cual no intenta generalizar todas las posibles circunstancias que puedan presentarse en la práctica. Simplemente se busca establecer un formalismo para el análisis del problema, y se hace especial énfasis en la minimización tanto del *throughput* promedio como de la distancia total recorrida por los vehículos.

A partir de los conceptos expuestos en las secciones 4 y 5 se hace una presentación de los algoritmos de enrutamiento de vehículos y de planeación del transporte existentes actualmente en la literatura. Cabe anotar que la mayoría de los métodos actuales consideran únicamente pequeñas instancias del problema (i.e. número de vehículos, tamaño de la red de transporte), y por consiguiente el problema de planeación es considerado como trivial, y se resuelve inmediatamente a partir de la solución obtenida para el problema de selección de rutas. Finalmente se presentan algunas recomendaciones para futuros trabajos de investigación.

1. NOCIONES PRELIMINARES Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.2. Enfoques independientes para el enrutamiento de vehículos y la planeación del transporte en sistemas de producción

Debido a los objetivos diferentes, los problemas de planeación y enrutamiento de

vehículos (en un sistema de producción) deben ser considerados de manera separada pero estrechamente ligados. Ambos problemas tienen un efecto significativo en la capacidad de respuesta del sistema, y por lo tanto afectan su rendimiento, el nivel de utilización de los equipos, el tiempo de ciclo de los productos y la flexibilidad global del sistema (Jacobs-Blecha y Goetschalckx, 1992).

Intuitivamente, el problema de planeación y enrutamiento de vehículos en los sistemas de producción (*vehicle scheduling and routing problem*, VSRP) puede ser considerado como una variante del *vehicle routing problem* (VRP). La versión convencional del VRP consiste en un grafo $G=(V,E)$, donde cada vértice $v_i \in V$ representa un cliente con demanda D_{v_i} y cada arco $e_{ij} \in E$ corresponde a una ruta entre los vértices v_i y v_j , y la cual tiene asociado un costo $C_{e_{ij}}$ (i.e. tiempo, distancia). Se considera entonces un conjunto de n vehículos, cada uno con capacidad de carga k y a los cuales se les debe asignar un recorrido para servir los clientes y optimizar una función objetivo (i.e. distancia total recorrida). Este problema ha sido típicamente analizado utilizando diversas técnicas de programación matemática (Qiu y Hsu, 1999a).

Sin embargo, existen varias diferencias entre el VRP convencional y el VSRP considerado en este artículo:

- El tamaño de la red de rutas considerada en el VRP usualmente es de nivel metropolitano. Dentro de una ciudad o entre varias ciudades un vehículo puede ser considerado como un punto en movimiento comparado con la longitud del vehículo mismo respecto a la distancia recorrida. En un sistema de producción, la distancia recorrida por los transportadores de materiales entre el punto de partida y el de destino es relativamente corta, por lo cual resulta inapropiado considerar el vehículo como una partícula en movimiento.
- En el VRP se asume que las colisiones entre vehículos nunca ocurren debido a la capacidad de las rutas. En un sistema de producción, al contrario, pueden haber congestiones o incluso colisiones entre los vehículos si éstos no son enrutados correctamente. Esto se debe a la limitada capacidad de espacio en las rutas.
- En el VRP, el camino más corto normalmente coincide con el camino más rápido (pero no necesariamente con el de menor costo). En los sistemas de producción, sin embargo, es posible que el camino más rápido no sea necesariamente el más corto.
- También es necesario remarcar que a pesar de los avances tecnológicos, los modelos más avanzados de sistemas de transporte automático siguen siendo considerablemente inferiores a los sistemas humanos de transporte, en el sentido de la capacidad sensorial y la toma de decisiones. Por ejemplo, un persona sería capaz de anticipar los movimientos de los otros vehículos en el sistema, y de esta

manera evitar las colisiones, ya sea evadiendo el obstáculo o tomando una ruta alternativa. De su parte, un sistema automático usualmente posee un sistema «rudimentario» de gestión de movimientos y control para evitar colisiones. Como resultado, gran parte (o incluso la totalidad) de la responsabilidad cae en manos del *software* de control.

Estas son las razones que diferencian el VRP convencional del problema de planeación y enrutamiento de vehículos (VSRP) dentro de un sistema de producción. De esta manera se ve clara la necesidad de idear algoritmos apropiados para la gestión de tareas y el enrutamiento de vehículos en los sistemas automatizados de producción.

Por otra parte, el problema de enrutamiento de vehículos también difiere de otros problemas convencionales de la teoría de grafos, tales como el problema del camino más corto (*shortest path problem*), problemas de tipo hamiltonianos (*Hamiltonian-type problems*), o incluso algunos problemas de secuenciación de tareas (*scheduling problems*), los cuales han sido clasificados como NP-difíciles (Garey y Johnson, 1979; Gondran y Minoux, 1984; Papadimitriou y Steiglitz, 1998). Concretamente, en el VSRP, el tiempo es un factor crítico, mientras que éste no es el caso de los problemas de la teoría de grafos. Por ejemplo, un problema típico en teoría de grafos usualmente se interesa en saber si *existe* un camino óptimo que conduzca de un punto de partida hacia un punto de destino, mientras que en el VSRP, encontrar una respuesta a *cuándo* y *cómo* un transportador llega a su destino es igualmente importante. De otra parte, cabe notar que en la variante del VRP con ventanas de tiempo (VRPTW), un cliente debe ser servido en un intervalo de tiempo predefinido. Nuevamente, el VRPTW y el VSRP difieren en cuanto a que en este último se consideran los instantes de tiempo en los cuales los vehículos realizan las tareas de transporte (i.e. carga/descarga de piezas en el taller de producción) y no el instante de tiempo del servicio a los clientes (i.e. máquinas).

1.2. Formalización del problema

A partir de los conceptos expuestos, el VSRP puede ser definido de la manera siguiente. Una instancia del problema consiste en un grafo $G=(V,E)$, donde cada vértice $v_i \in V$ representa un punto de carga/descarga o una intersección entre arcos, y cada arco $e_{ij} \in E$ corresponde a una ruta admisible entre dos vértices v_i y v_j . Una medida de costo (i.e. distancia, tiempo de viaje) $C_{e_{ij}}$ está asociada a cada arco. Adicionalmente, un conjunto de tareas que deban realizar los vehículos del sistema es denotada con un binomio (a_i, d_i) , donde a_i y d_i representan el instante de disponibilidad (*arrival time*) y el instante límite de realización del trabajo (*due time*), respectivamente. El instante efectivo de cominezo (*response time*) y finalización (*completion time*) de ejecución de la tarea (a_i, d_i) son denotados, respectivamente r_i y c_i . Se considera un conjunto $M=\{(a_i, d_i) \mid i=1,2,\dots,k\}$ de tareas que se deben realizar en el sistema y n vehículos

disponibles. El objetivo del VSRP es determinar una ruta admisible para cada vehículo (*routing*), al mismo tiempo que se establece un plan de trabajo (i.e. determinar los instantes de tiempo de servicio) que permita realizar todos los k trabajos (*scheduling*) con el mejor rendimiento posible del sistema.

2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

En esta sección se propone un modelo matemático para el VSRP. Se busca, a la vez, optimizar el rendimiento del sistema (*throughput*), dado en número de unidades terminadas por unidad de tiempo, y minimizar la distancia total recorrida por cada vehículo. Las formulaciones propuestas para ambos problemas (*scheduling* y enrutamiento de vehículos) se presentan de manera independiente.

Cabe notar que el modelo propuesto no es único, puesto que dependiendo de la aplicación, la función objetivo y las restricciones pueden cambiar. Modelos correspondientes a otras funciones objetivo con restricciones similares a las expuestas son fáciles de obtener para sistemas de aplicación reales.

La notación utilizada en los modelos es la misma expuesta en la sección 2.2. Siendo m el número de vehículos requeridos para transportar las tareas, el problema de selección de tareas (*scheduling*) puede ser formulado de la manera siguiente:

$$\min Z_1 = \frac{\text{Max}(c_i) - \text{Min}(a_i)}{k} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$c_i \leq d_i, \forall i \quad (2)$$

La restricción (2) restringe el sistema a terminar cada una de las tareas antes de o a lo máximo en el instante mismo de terminación permitido (*due time*).

Luego de definir el plan de tratamiento de las tareas, el siguiente paso es determinar las rutas que debe seguir cada uno de los vehículos, de tal manera que puedan llegar a su destino y/o puedan buscar otro trabajo que deban transportar. Sea s_i la distancia recorrida por el i -ésimo vehículo, el problema de enrutamiento puede formularse como sigue:

$$\min Z_2 = \sum_{i=1}^m s_i \quad (3)$$

Sujeto a:

$$m \leq n \quad (4)$$

La restricción (4) del modelo asegura que el número de vehículos seleccionados sea a lo máximo igual al número de vehículos disponibles.

3. ALGORITMOS DE ENRUTAMIENTO

El objetivo del enrutamiento de vehículos es encontrar una ruta factible y óptima (i.e. el camino más rápido) para cada uno de los vehículos. Esta decisión incluye tres aspectos fundamentales (Qiu y Hsu, 1999a). Primero que todo es necesario saber si *existe* una ruta, la cual podría conducir el transportador desde su punto de origen al punto de destino. Segundo, la ruta seleccionada debe ser factible, es decir, libre de congestión, de conflictos, de embotellamientos, etc. (Taghaboni y Tanchoco, 1995). Tercero, el camino debe ser óptimo, o al menos casi-óptimo, de acuerdo con la función objetivo.

De acuerdo con las características de los algoritmos de enrutamiento, los trabajos existentes pueden ser básicamente clasificados en dos grandes categorías: (1) algoritmos de enrutamiento para configuraciones generales y (2) algoritmos para la optimización de rutas. Los trabajos del primer grupo usualmente estudian el problema de enrutamiento como un problema de la teoría de grafos, y utilizan enfoques iguales al algoritmo del camino más corto de Dijkstra (*shortest path algorithm*) para encontrar la(s) ruta(s) óptima(s). Estos métodos son comúnmente restrictivos en cuanto al tiempo de cálculo para el enrutamiento de más de un vehículo.

De otra parte, los trabajos del segundo grupo utilizan técnicas diversas de optimización como la programación entera. De esta manera, el control de rutas podría ser sencillo. Sin embargo, debido al esfuerzo computacional, la red que se va a optimizar es usualmente pequeña y, en consecuencia, sólo se pueden considerar instancias pequeñas del problema.

3.1. Algoritmos de enrutamiento para configuraciones generales

Esta categoría clasifica los algoritmos que se interesan únicamente en encontrar una ruta factible para los vehículos, sin poner verdadera atención al tipo de red de transporte. En otras palabras, estos algoritmos intentan proponer soluciones universales al problema de enrutamiento (i.e. ruta más rápida libre de conflictos).

El problema de enrutamiento de vehículos en sistemas de producción (i.e. enrutamiento de vehículos autoguiados o AGVS) es diferente del *Vehicle Routing Problem* (VRP), el cual ha sido típicamente resuelto utilizando técnicas de programación lineal (Taha, 1995), tal como fue expuesto en la sección 2. En el VRP, los vehículos no colisionan, puesto que son considerados como partículas moviéndose dentro de la red urbana de transporte. Sin embargo, las rutas dentro de un sistema de producción

son relativamente pequeñas en cuanto a sus dimensiones con respecto al tamaño de los vehículos. De esta forma, una consideración fundamental consiste en buscar algoritmos que encuentren soluciones que minimicen el tiempo total del recorrido en rutas libres de conflictos.

La idea de encontrar el camino más corto libre de conflictos para el enrutamiento de vehículos fue propuesta por primera vez por Broadbent *et al.* (1985). Este procedimiento utiliza el algoritmo del camino más corto de Dijkstra para generar una matriz que describe el tiempo de ocupación de las rutas por los vehículos. Conflictos potenciales entre los vehículos son detectados por comparación de los tiempos de ocupación, los cuales se evitan por exclusión anticipada del segmento congestionado al momento de buscar una nueva ruta. La complejidad en tiempo de este algoritmo es de $O(N^2)$, donde N es el número de nodos en la red (i.e puntos de carga/descarga de vehículos e intersecciones de rutas). La desventaja de este método es que el tiempo de cálculo puede ser bastante largo a medida que se aumenta el tamaño de la red o el número de vehículos.

Comparado con los sistemas unidireccionales, es intuitivamente lógico que los sistemas bi-direccionales sean más eficientes en términos de nivel de utilización de los vehículos y *throughput* potencial. Egbelu y Tanchoco (1986) demostraron estas ventajas tanto en el mejoramiento de la productividad como en la reducción del número de vehículos necesarios en un sistema bidireccional. Cabe notar que el control de tal sistema puede ser extremadamente complejo debido a la contención de múltiples vehículos en un mismo segmento. En este caso, el enrutamiento debe hacerse de tal manera que se eliminen las colisiones potenciales entre vehículos y los embotellamientos. Estos autores, aunque proponen el uso de redes bidireccionales y exponen sus ventajas, no dan ninguna garantía con respecto a la optimización de la solución obtenida.

Daniels (1988) propone un algoritmo para el enrutamiento en una red bidireccional, el cual utiliza el algoritmo PSP (*Partitioning Shortest Path*) de Glover *et al.* (1985). La factibilidad, en términos de requerimientos de tiempo y espacio, del algoritmo es demostrada teóricamente. Este método es capaz de encontrar la ruta más corta libre de conflictos para un nuevo vehículo adicionado al sistema, sin cambiar las rutas ya seleccionadas para los vehículos existentes. La complejidad computacional es $O(N \times A)$, donde N y A son el número de nodos y de arcos en la red, respectivamente. Como se puede ver, este método también puede llegar a requerir grandes esfuerzos computacionales si el tamaño de la red aumenta o si el número de vehículos es relativamente grande. Adicionalmente, cuando una ruta es asignada a un vehículo v , ésta se considera inutilizable por cualquier otro vehículo adicional hasta el instante en que v llegue a su destino. Es claro ver que, en realidad, los segmentos de la ruta son parcialmente ocupados por el transportador durante ciertos instantes de

tiempo (llamados ventanas de tiempo). Por esta razón, el algoritmo puede no encontrar una ruta factible para un vehículo, incluso si existe alguna.

Con el objetivo de permitir a otros vehículos circular dentro de los segmentos libres de una ruta durante las ventanas de tiempo, Kim y Tanchoco (1991) presentan un método para el enrutamiento dentro de una red bidireccional basado en el algoritmo del camino más corto de Dijkstra. Este método mantiene, para cada nodo, una lista de las ventanas de tiempo reservadas para los vehículos ya planificados, al igual que una lista de las ventanas de tiempo disponibles para los vehículos aún libres. Se introduce el concepto de grafo con ventanas de tiempo, en el cual el conjunto de nodos representa las ventanas de tiempo disponibles y los arcos representan la búsqueda a través de estas ventanas de tiempo. Posteriormente, el algoritmo enruta los vehículos dentro de las ventanas de tiempo del grafo descrito en lugar de hacerlo en la red física. Para encontrar una solución óptima, este algoritmo puede necesitar una gran cantidad de tiempo, del orden de $O(v^4n^2)$ para el peor de los casos, donde v es el número de vehículos y n es el número de nodos. En consecuencia, este método puede ser satisfactoriamente utilizado en pequeñas configuraciones.

Posteriormente, Kim y Tanchoco (1993) estudiaron el problema de control operacional dentro de un sistema bidireccional para el enrutamiento sin conflictos. El trabajo utiliza una estrategia conservativa «miope» en la cual sólo se considera un vehículo a la vez, todas las decisiones anteriores deben ser estrictamente respetadas y los viajes subsecuentes de un transportador no pueden ser planificados sino hasta el instante en que éste esté disponible.

Langevin *et al.* (1996) presentan un algoritmo basado en la programación dinámica para determinar una solución óptima integral al problema de planeación de tareas y enrutamiento dentro de un sistema flexible de manufactura. El algoritmo define un plan parcial de transporte y una ruta para cada vehículo, de tal manera que satisface un subconjunto de tareas por realizar. Los estados son definidos en concordancia con el plan parcial de transporte. Las operaciones de programación dinámica trabajan en los estados del sistema con el fin de encontrar el mejor conjunto del estado final, el cual contiene la solución óptima. Cabe remarcar que el número de estados puede ser extremadamente grande en los sistemas complejos. Por consiguiente, para que este método sea utilizable deben eliminarse algunos estados; y aun así el tiempo de cálculo es bastante largo. De otra parte, el estudio inicial de este método fue realizado con un sistema con dos vehículos. Se presentó una extensión a sistemas con más de dos vehículos, pero no existen garantías respecto a la optimización de la solución.

3.2. Optimización de rutas

Debido a la gran cantidad de recursos computacionales requeridos por los métodos

expuestos anteriormente para encontrar una ruta óptima, varios trabajos proponen la idea de separar la red de rutas para obtener mayor eficiencia de los métodos para la búsqueda de la solución. Estos trabajos se concentran en la optimización de la red, en lugar de hacerlo en los algoritmos de enrutamiento para una configuración dada de estaciones. Este problema es usualmente formulado como un modelo de programación lineal entera. Gaskins y Tanchoco (1987) fueron los primeros en formular este problema como un programa lineal entero de variables 0-1. El objetivo es encontrar una red óptima de rutas que minimice la distancia total de viaje para los vehículos, considerando únicamente rutas unidireccionales. Además, la distancia recorrida por los vehículos no cargados, la cual puede afectar el sistema de control y el *throughput* global del sistema, no es tomada en cuenta en el modelo. Aun así, la mayor limitación del mismo es la consideración de una flota de vehículos siempre con el mismo punto de partida y el mismo destino, haciendo que los vehículos recorran siempre la misma ruta; por lo cual el control del enrutamiento se vuelve trivial, y problemas como congestión o colisiones nunca se presentarán. De otra parte, otra limitación del modelo lineal 0-1 es que la probabilidad de obtener un conjunto solución no-vacío es muy pequeña; por lo cual las aplicaciones prácticas del modelo hace que el número de variables binarias sea muy grande y que se requiera un tiempo de cálculo extremadamente largo.

Basados en un programa lineal binario 0-1 y un método separación/evaluación (*branch and bound*), Kaspi y Tanchoco (1990) proponen una formulación alternativa del problema descrito por Gaskins y Tanchoco. Este nuevo enfoque es capaz de obtener el mejor diseño de la red para configuraciones dadas tanto del taller como de los puntos de carga/descarga. Comparado con el método anterior, este procedimiento reduce el tiempo de cálculo, debido a que no todas las posibilidades de diseño de la red son enumeradas. Sin embargo, este modelo presenta los mismos problemas expuestos anteriormente.

Por su parte, Sinriech y Tanchoco (1991) presentan un método de intersección de grafos (IGM) para resolver el problema de optimización de flujo en la red propuesta por Kaspi y Tanchoco. Presentan un procedimiento de *branch and bound* en el cual sólo un número reducido de subconjuntos solución es considerado. Únicamente los nodos de intersección son utilizados para encontrar la(s) solución(es) óptima(s). Si bien el tiempo necesario para el cálculo es reducido considerablemente y el modelo puede ser utilizado en problemas de gran tamaño, existe la posibilidad de que el algoritmo ignore algunas soluciones óptimas debido al procedimiento de intersección de nodos de la red. Así mismo, este problema es también considerado por Goetz y Egbelu (1990), quienes proponen un enfoque diferente. Modelizan y resuelven el problema de selección de rutas y la localización de las estaciones de carga/descarga utilizando un modelo de programación lineal entera, cuyo el objetivo es minimizar la distancia total recorrida tanto por los vehículos cargados como por los no cargados. Con el fin de reducir el tamaño del problema se ha propuesto igualmente un método

heurístico, el cual es satisfactoriamente manejable en instancias de gran tamaño. Sin embargo, el problema de control del enrutamiento, así como la determinación del número de vehículos que el sistema es capaz de manejar, no son considerados en este artículo.

De otro lado, en la literatura se han propuesto diversos modelos para aplicaciones específicas y configuraciones particulares de red (Tanchoco y Sinriech, 1992; Lin y Dgen, 1994; Sinriech y Tanchoco, 1994). De su parte, Hsu y Huang (1994; Huang y Hsu, 1994) presentan la complejidad computacional en tiempo y espacio para las operaciones del enrutamiento de vehículos en varias configuraciones bidireccionales específicas. Los límites superiores de complejidad en tiempo y espacio son $\Theta(n^2)$ y $\Theta(n^3)$, respectivamente, donde n es el número de nodos en la red. Sin embargo, en estos trabajos no presentan ni algoritmos de enrutamiento ni técnicas asociadas para evitar los problemas de gestión de tráfico, tales como congestión, bloqueo de rutas o colisiones entre vehículos.

4. ALGORITMOS DE PLANEACIÓN DE TRANSPORTE

La planeación (*scheduling*) de transporte consiste en la asignación de un conjunto de vehículos en un orden y a ciertos instantes de tiempo determinados, con el fin de completar una serie de tareas de carga/despacho para obtener ciertos resultados (función objetivo), como el mínimo tiempo libre de los vehículos, o incluso el tiempo de terminación más corto, bajo ciertas restricciones (Qiu and Hsu, 1999a).

En realidad, las decisiones de planificación de transporte incluyen la selección de un vehículo libre de entre varios disponibles y la selección de un cargamento de entre todos los cargamentos que se va a realizar. En la literatura, el primer problema es llamado *vehicle selection* o *vehicle-dispatching problem*, mientras que el segundo es llamado *task selection problem* (Egbelu y Tanchoco, 1984; Taghaboni y Tanchoco, 1995).

Para problemas pequeños, es usual que los problemas de enrutamiento y de planificación del transporte sean considerados como uno solo, puesto que este último es un problema trivial. Sin embargo, en problemas con un gran número de puntos de carga/descarga y una gran flota de vehículos (i.e. en sistemas de fabricación de semiconductores), el problema de planeación de transporte se convierte en no trivial, y por lo tanto debe ser considerado de manera separada al problema de enrutamiento. En este sentido, los trabajos de investigación al respecto son relativamente inadecuados y presentan una visión limitada del problema.

Akturk y Yilmaz (1996) proponen un algoritmo para el ordenamiento (*scheduling*) de vehículos y tareas bajo un jerarquía de toma de decisiones basada en un modelo de programación entera y mixta. El algoritmo propuesto, MOSA (*micro-opportunistic*

scheduling algorithm) combina dos perspectivas dentro de un solo algoritmo: un enfoque basado en las tareas (*job-based*) y otro en los vehículos (*vehicle-based*), en los cuales tanto las tareas críticas como los tiempos de viaje de los vehículos no cargados son considerados simultáneamente. El problema es entonces definido como *Time Constrained Vehicle Routing Problem* (TCVRP), pero no es exactamente idéntico a éste, el cual es NP-difícil (Kolen *et al.*, 1987). Así, el problema se resuelve en tiempo polinomial, puesto que el objetivo es la minimización de las ventanas de tiempo (en lugar de la distancia recorrida por los vehículos en el TCVRP). Sin embargo, MOSA es únicamente aplicable en sistemas con un número pequeño de transportadores y de tareas, debido a que si se produce un incremento considerable en el tamaño de estos parámetros, el tiempo de cálculo necesario para obtener la solución es considerablemente largo.

Qiu y Hsu (1999b, 2000) presentan un esquema para el enrutamiento y la planeación del transporte en una red de tipo bidireccional. De hecho, su algoritmo combina las dos funciones. Cuando un vehículo es asignado a una tarea a lo largo de una ruta lineal no se producirán ni conflictos ni congestión. La eficiencia del algoritmo está restringida por el tamaño del sistema. Sin embargo, el problema de la programación continua de tareas de carga/descarga no está resuelto en dicho trabajo, y los requerimientos de sincronización de los vehículos deben ser relajados para ciertas aplicaciones reales.

CONCLUSIONES

El enrutamiento de vehículos y la planeación del transporte son dos problemas igualmente importantes, pero independientes, en la gestión de sistemas de producción automatizados. A pesar de ello, éstos no han sido estudiados de manera separada en la literatura, e incluso este último ha sido considerado como trivial al momento de proponer métodos de solución para el enrutamiento de vehículos en sistemas relativamente pequeños. Además, en estos trabajos no se presentan ni algoritmos de enrutamiento ni técnicas asociadas para evitar los problemas de gestión de tráfico (i.e. congestión, bloqueo de rutas o colisiones entre vehículos). Estos problemas podrían ser resueltos de manera relativamente fácil en configuraciones sencillas de taller; pero se convierten en problemas graves al momento de considerar sistemas de producción complejos (i.e. fabricación de semiconductores, donde el movimiento del trabajo en proceso es de tipo cíclico).

Por lo tanto, los futuros trabajos de investigación deben focalizarse en la modelización y resolución de configuraciones particulares de la red de transporte al interior de los sistemas productivos. Otra dirección de investigación interesante sería la búsqueda de algoritmos que consideren los problemas de enrutamiento y planeación del transporte de manera simultánea. Una forma de hacerlo sería desarrollando un serie de rutas para los transportadores que serían utilizadas para

establecer la planificación de los vehículos a las tareas que van a realizar. La estrategia contraria también es perfectamente válida: determinar las rutas a partir de un plan de trabajo dado.

Cabe anotar finalmente que aunque se han desarrollado muchos trabajos en automatización de vehículos e inteligencia en el transporte, esto no implica necesariamente que los problemas de enrutamiento y planificación de transporte vayan a desaparecer. Los métodos existentes pueden ser satisfactorios en ciertas aplicaciones particulares, pero ninguno sería capaz de garantizar absolutamente que no se presentarán congestiones, colisiones o embotellamientos en el sistema, incluso si los transportadores son manejados por personas. A pesar de esto, el estado actual de la tecnología en transportes automáticos permite poner en marcha sistemas automáticos de transporte incluso antes que estos problemas sean completamente resueltos.

Agradecimientos

El autor expresa sus sinceros agradecimientos al comité de evaluación por sus sugerencias y comentarios para mejorar la calidad de este artículo.

Referencias

- AKTURK, M.S. & YILMAZ, H. (1996). Scheduling of automated guided vehicles in a decision-making hierarchy. *International Journal of Production Research*, Vol. 34, pp. 577-591.
- BROADBENT, A.J., BESANT, C.B., PREMI, S.K., WALKER & S.P. (1985). Free ranging AGV systems: Promises, problems and pathways. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Automated Material Handling*. IFS Publications, pp. 221-237.
- DANIELS, S.C. (1988). *Real-time Conflict Resolution in Automated Guided Vehicles Scheduling*. PhD thesis, Pennsylvania State University.
- EGBELU, P.J. & TANCHOCO, J.M.A. (1984). Characterization of automated guided vehicles dispatching rules. *International Journal of Production Research*, Vol. 22, pp. 359-374.
- EGBELU, P.J. & TANCHOCO, J.M.A. (1986). Potentials of bi-directional guidepath for automatic guided vehicles systems. *International Journal of Production Research*, Vol. 24, pp. 1075-1097.
- GASKINS, R.J. & TANCHOCO, J.M.A. (1987). Flow path design for automated guided vehicles systems. *International Journal of Production Research*, Vol. 25, pp. 667-676.
- GAREY, M.R. & JOHNSON, D.S. (1979). *Computers and intractability: A guide to the theory of NP-Completeness*. W.H. Freeman.
- GOETZ & W.G., EGBELU, P.J. (1990). Guide path design and location of load pick-up/drop-off points in an automated guided vehicle system. *International Journal of Production Research*, Vol. 28, pp. 927-941.
- GLOVER, F., KLINGMAN, D.D. & PHILLIPS, N.V. (1985). A new polynomially bounded shortest path algorithm. *Operations Research*, Vol. 33, pp. 65-73.
- GONDRAN, M. & MINOUX, M. (1984). *Graphs and Algorithms*. John Wiley & Sons.
- HSU, W.J. & HUANG, S.Y. (1994). Route planning of automated guided vehicles. In *Proceedings of the Intelligent Vehicles Conference*, pp. 479-485.
- HUANG, S.Y. & HSU, W.J. (1994). Routing automated guided vehicles on mesh-like topologies.

- In *International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision*.
- JACOBS-BLECHA, C. & GOETSCHALCKX, M. (1992). Analysis of horizontal transportation systems with multiload carriers. In *Proceedings of the 1992 NSF Design and Manufacturing Systems Conference*, Atlanta, pp. 871-874.
- KASPI, M. & TANCHOCO, J.M.A. (1990). Optimal flow path design of uni-directional AGV systems. *International Journal of Production Research*, Vol. 28, pp. 915-926.
- KIM, C.W. & TANCHOCO, J.M.A. (1991). Conflict-free shortest-time bi-directional AGV routing. *International Journal of Production Research*, Vol. 29, pp. 2377-2391.
- KIM, C.W. & TANCHOCO, J.M.A. (1993). Operational control of a bi-directional automated guided vehicle system. *International Journal of Production Research*, Vol. 31, pp. 2123-2138.
- KOLEN, A.W., RINNOOY KANN, A.H. & TRIENEKENS, H.W. (1987). Vehicle routing with time windows. *Operations Research*, Vol. 35, pp. 266-274.
- LANGEVIN, A., LAUZON, D. & RIOPEL, D. (1996). Dispatching, routing and scheduling of two automated guided vehicles in a flexible manufacturing system. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 8, pp. 246-262.
- LIN, J.T., DGEN, P.K. (1994). An algorithm for routing control of a tandem automated guided vehicle system. *International Journal of Production Research*, Vol. 32, pp. 2735-2750.
- PAPADIMITRIOU, C.H. & STEIGLITZ, K. (1998). *Combinatorial optimization: Algorithms and complexity*. Dover Publications.
- QIU, L. & HSU, W.J. (1999a). Scheduling and routing for AGVs: A survey. *Technical Report, CAIS-TR-99-26*, Center for Advanced Information Systems, Nanyang Technological University, Singapore.
- QIU, L., & HSU, W.J. (1999b). Scheduling and routing of AGVs on a linear path layout. *Technical Report, CAIS-TR-99-27*, Center for Advanced Information Systems, Nanyang Technological University, Singapore.
- QIU, L. & HSU, W.J. (2000). Conflict-free AGVs routing in a linear path layout. In *Proceedings of the 5th International Conference on Computer Integrated Manufacturing*, Singapore.
- SINRIECH, D. & TANCHOCO, J.M.A. (1991). Intersection graph method for AGV flow path design. *International Journal of Production Research*, Vol. 29, pp. 1725-1732.
- SINRIECH, D. & TANCHOCO, J.M.A. (1994). SFT – Segmented flow topology. In JMA Tanchoco (Ed.), *Material Flow Systems in Manufacturing*. Londres, Chapman & Hall, pp. 1725-1732.
- TAGHABONI, F. & TANCHOCO, J.M. (1995). Comparison of dynamic routing techniques for automated guided vehicle systems. *International Journal of Production Research*, Vol. 33, pp. 2653-2669.
- TAHA, H.A. (1995). *Operations Research, an Introduction*. Prentice-Hall.
- TANCHOCO, J.M.A. & SINRIECH, D. (1992). OSL – Optimal single-loop guided paths for AGVs. *International Journal of Production Research*, Vol. 30, pp. 665-681.