

PROCEDIMIENTO JERÁRQUICO BASADO EN OPTIMIZACIÓN Y SIMULACIÓN PARA LA GESTIÓN DE VEHÍCULOS EN SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE MANUFACTURA *

Jairo Rafael Montoya Torres **

Resumen: este artículo analiza el problema de gestión de demandas de transporte en una fábrica automatizada de producción. El problema tratado está inspirado en una aplicación real en la industria de los semiconductores. La principal diferencia con respecto a trabajos precedentes en la literatura radica en la naturaleza unificada del sistema de transporte, con la cual es posible disminuir el número de movimientos por vehículo y transportar el producto en proceso directamente de una máquina a la siguiente sin necesidad de pasar por un almacenamiento intermediario temporal. Puesto que el número de vehículos es limitado, se hace necesario implementar estrategias inteligentes para satisfacer eficientemente las demandas de transporte. Este problema es analizado utilizando un enfoque de toma de decisiones jerárquico basado en optimización y simulación. Se estudian así los niveles de decisión táctico y operativo. En el primero, se emplean herramientas de optimización matemática para determinar la mejor manera de distribuir los vehículos dentro de la fábrica con el fin de satisfacer las demandas en el menor tiempo posible. Esta decisión táctica es tomada a partir de estimaciones estáticas durante el horizonte de producción. A nivel operativo, la decisión táctica es implementada en un modelo de simulación con el fin de analizar el impacto que diversas políticas de gestión pueden tener en los indicadores clave de la producción, tomando en cuenta la evolución dinámica del sistema. Los resultados

* Este artículo está basado en parte del trabajo realizado por el autor en su disertación doctoral, la cual fue co-financiada por la Asociación Francesa de Investigación Tecnológica (ANRT) bajo contrato CIFRE No. 621/2002 y por el proyecto de investigación "Rousset 2003-2008", en asocio industrial con STMicroelectronics, Rousset, Francia. Fecha de recepción: 3 de marzo de 2006. Fecha de aceptación para publicación: 24 de marzo de 2006.

**Ingeniero Industrial, Universidad del Norte. M. Sc. in Industrial Engineering, Institute National Polytechnique de Grenoble. Doctor en Ingeniería Industrial, Ecole Nationale Supérieure de Mines de Saint Etienne y Université Jean Monnet. Profesor Asistente, Departamento de Procesos Productivos, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: jairo.montoya@javeriana.edu.co

experimentales muestran la pertinencia del método propuesto a través de un mejoramiento considerable de los indicadores de gestión del sistema productivo.

Palabras clave: transporte automatizado, gestión de vehículos, optimización, simulación, fabricación de semiconductores.

Abstract: this paper focuses on the analysis of transport strategies in Automated Material Handling Systems (AMHS) for automated manufacturing systems. The problem studied is inspired from an application found in the semiconductor industry. A difference against previous work is that our approach takes into account the unified nature load transport moves that, in the past, have limited the practical usefulness of the results provided. In a unified AMHS, vehicles can travel along the whole network path to deliver loads directly from one machine to another machine (tool-to-tool delivery) without passing by intermediate storage. Since the number of vehicles is limited, an intelligent strategy has to be implemented in order to distribute them so as to optimally satisfy transport requests during the production horizon. The problem is addressed by means of a hierarchical tactical planning-operational control approach using simulation-optimization. At the tactical, vehicles are distributed on the network path by integer linear programming. The tactical solution is then implemented on a detailed simulation model of the factory in order to analyze factory dynamics. Experimental results show the improvement of performance indexes that can be achieved by implementing the proposed procedure.

Keywords: automated transport, vehicle management, optimization, simulation, semiconductor manufacturing.

1. Introducción

Dadas las condiciones actuales de competencia en un mercado cada vez más globalizado, las empresas están viendo la automatización de todos sus procesos de manufactura

(operaciones de fabricación y de transporte y manipulación de los productos) como una muy buena alternativa para incrementar los rendimientos del sistema productivo. Este artículo se interesa particularmente en las operaciones de transporte del producto en proceso entre las etapas de fabricación. Esta es una parte importante en todo sistema de fabricación, tanto en términos de costos como en tiempo de producción. Estudios empíricos muestran que únicamente un 5% del tiempo total de manufactura de un producto corresponde a las actividades que le agregan valor [Askin, Goldberg, 2002]; el resto del tiempo corresponde al tiempo que el producto permanece tanto en las filas de espera como en actividades de transporte entre las operaciones de manufactura. Como consecuencia, grandes esfuerzos se han visto en la industria y en la literatura para el diseño y operación eficiente de los sistemas de transporte automatizado (en inglés *Automated Material Handling Systems*, AMHS). Según estudios realizados por el Material Handling Institute (MHI), los beneficios obtenidos gracias a la instalación y uso de este tipo de sistemas incluyen: disminución de los costos operativos de fabricación, mejor programación y control del inventario de producto en proceso (*work-in-process*, WIP), flexibilidad para el manejo de materiales, control eficiente del inventario, aseguramiento de la calidad del producto, aumento en la producción, mejor utilización del espacio físico, entre otros [MHI, 1993].

El desempeño de los sistemas de transporte automatizado es generalmente medido como una función decreciente con respecto al tiempo de servicio (por ejemplo, el tiempo que transcurre entre el momento en el cual una pieza emite una demanda de transporte y el momento en el cual ésta es satisfecha). El tiempo de servicio se compone básicamente de un tiempo de espera para la llegada de un vehículo y un tiempo de transporte (viaje) entre los puntos de carga y de descarga. Adicionalmente a la tecnología asociada al sistema mismo de transporte, varios aspectos tácticos y operativos afectan el desempeño de un sistema de tal condición, como son el diseño de la red de transporte, la localización de los puntos de carga y descarga, el número de vehículos en el sistema (tamaño de la flota) y las reglas de enrutamiento y despacho de los vehículos. El lector interesado en una discusión

más amplia sobre estos aspectos puede referirse a Qiu et al. [2002] y Le Anh, De Koster [2004].

Este artículo se interesa en el análisis de los aspectos tanto tácticos como operativos para un desempeño eficiente del sistema de producción. A nivel táctico, el centro de interés es el problema de localización de vehículos en la red; es decir, cómo distribuir los vehículos dentro del sistema de tal manera que las demandas sean satisfechas en el menor tiempo posible. A nivel operativo, se busca implementar dichas estrategias tácticas junto con reglas de despacho comúnmente utilizadas tanto en la literatura como en la práctica por los industriales.

El procedimiento de gestión propuesto está basado en un enfoque jerárquico de optimización matemática y simulación de eventos discretos. El estudio experimental de este procedimiento está basado en datos reales obtenidos en una fábrica completamente automatizada de la industria de semiconductores.

1.1. Contribución de este trabajo

Este artículo presenta, de una forma sucinta, una contribución a la gestión de operaciones de transporte dentro de los sistemas automatizados de producción, a través de la integración de métodos de optimización matemática y de la simulación de eventos discretos. El problema de gestión de vehículos se modela utilizando programación lineal entera con el fin de optimizar ciertos parámetros del modelo de simulación. La solución encontrada en la optimización es posteriormente integrada en un modelo detallado de simulación de la fábrica con el fin de analizar el comportamiento dinámico del sistema comparando varias reglas de gestión operativa. En este punto vale la pena resaltar que una característica distintiva de este trabajo consiste en que por primera vez, al menos en nuestro conocimiento de la literatura especializada, se presenta un modelo global de una fábrica de semiconductores completamente automatizada en la cual se utiliza un sistema unificado para el transporte del producto en proceso. Además, a través del desarrollo de un conjunto

de experiencias de simulación, es posible percibir diferentes elementos del sistema que serían intuitivamente impredecibles y que aparentemente van en contra de conceptos previamente aceptados por los fabricantes de semiconductores e implementados en las fábricas existentes.

1.2. Organización del artículo

En el artículo, inicialmente se presenta una breve descripción de la fabricación de semiconductores con el fin de mostrar las características propias de este sector industrial y la complejidad del proceso productivo en términos de gestión de flujo re-entrante. Adicionalmente se presentan ciertos elementos del caso industrial considerado en esta investigación. A continuación se presenta una revisión de la literatura relacionada, especialmente de los trabajos sobre la localización de vehículos en sistemas de producción con transporte automatizado y sobre la gestión operativa en las fábricas de semiconductores. Luego se presentan tanto el método de gestión de transporte táctico como el operativo propuestos y la descripción del estudio experimental y de los resultados numéricos. Finalmente se relacionan las principales conclusiones del trabajo y algunas perspectivas de trabajos futuros.

2. La fabricación de semiconductores

En este artículo se considera el proceso de fabricación de materiales semiconductores que sirven de soporte para la fabricación de circuitos integrados. De manera general, el proceso de fabricación de semiconductores consiste en agregar, modificar o quitar capas de materiales químicos sobre una lámina de silicio, con el fin de modificar por regiones sus propiedades eléctricas. Estos procesos son la fotolitografía (modificación de la estructura), el grabado seco o húmedo (retiro de material de ciertas regiones de la lámina), la implantación iónica, la difusión de materiales eléctricos o aislantes, la oxidación, la deposición y el pulido. Estas operaciones no son realizadas de manera lineal, sino que

intervienen en diferentes etapas del proceso de producción, según las necesidades del producto por fabricar y pueden ser repetidas varias veces.

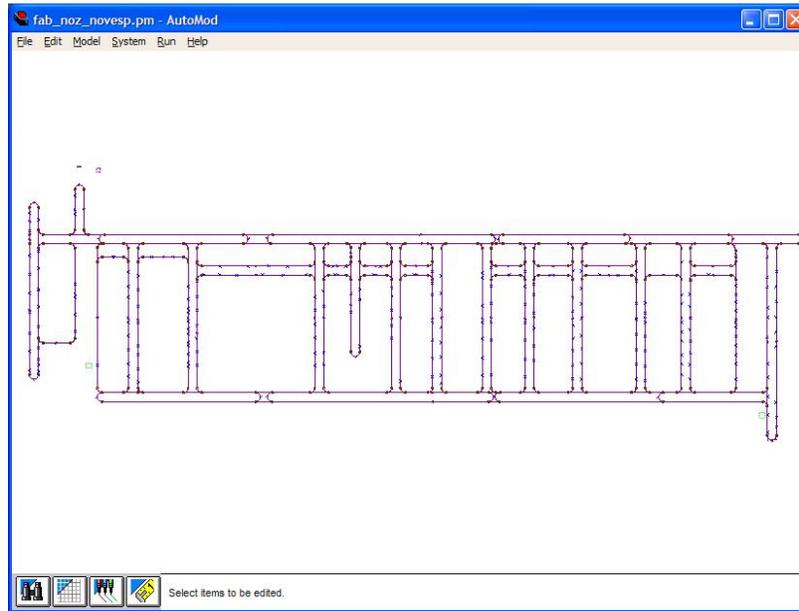
Para el desarrollo de esta investigación se considera la fábrica de semiconductores completamente automatizada descrita en Montoya [2005]. La unidad de fabricación está dividida en un cierto número de talleres, correspondientes a cada una de las etapas del proceso anteriormente descritas. Estos están separados entre sí por corredores por los cuales circulan los vehículos automáticos para el transporte del producto. Este tipo de configuración genera un gran flujo de productos entre las máquinas, especialmente porque el proceso de fabricación de semiconductores es de tipo re-entrante (la misma secuencia de operaciones se repite varias veces durante la fabricación de un producto). Las máquinas utilizadas son de alta tecnología y requieren condiciones ambientales especiales, igualmente necesarias para asegurar la calidad del producto.

En el caso industrial bajo estudio, se tienen más de setenta familias de máquinas y en cada familia puede haber una o varias máquinas idénticas en paralelo, obteniendo así un total de más de doscientos máquinas en la fábrica. Cada una de ellas tiene un punto de carga/descarga de productos donde los vehículos recuperan/entregan el producto en proceso. Se considera que sólo se produce un único tipo de producto. La secuencia de operaciones está compuesta por cerca de setecientas etapas y cada operación es ejecutada en una familia de máquinas. Puesto que el número de operaciones es superior al número de máquinas disponibles, cada pieza debe pasar varias veces por la misma secuencia de operaciones (flujo re-entrante). En este caso, el producto debe pasar cerca de cuarenta veces por la etapa de fotolitografía.

Las operaciones de transporte son realizadas por un sistema automatizado. La configuración de la red se muestra en la Figura 1. El sentido de circulación es unidireccional y viene dado por la configuración del sistema. Igualmente, se consideran vehículos unidireccionales. Como se dijo anteriormente, el sistema de transporte es de tipo unificado, lo cual permite que los vehículos circulen libremente en toda la red y puedan

transportar las piezas a cualquier sector de la fábrica sin necesidad de recurrir a almacenamiento temporal entre dos operaciones de fabricación.

Figura 1. Configuración de la red de transporte de la fábrica bajo estudio



Fuente: presentación propia del autor.

3. Literatura relacionada

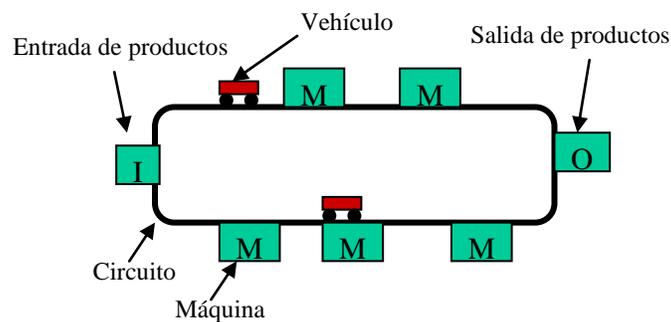
Aquí se describen brevemente los trabajos relacionados con el problema bajo estudio que se han realizado hasta la fecha. Estos pueden clasificarse en dos grandes grupos: (i) trabajos sobre localización de vehículos en sistemas de producción automatizada y (ii) trabajos sobre gestión y control operativo de vehículos (enrutamiento, despacho, control de tráfico).

3.1. Localización de vehículos para la fabricación automatizada

El problema de localización de vehículos consiste en determinar su ubicación dentro de una red de transporte en un sistema de fabricación con el fin de disminuir el tiempo de satisfacción de demandas de transporte. Estas solicitudes de transporte son emitidas por los

productos en curso de fabricación. Por consiguiente, la estrategia de localización (o posicionamiento) de vehículos dentro del sistema afecta el desempeño operativo del mismo y puede tener así incidencia en las reglas operativas de despacho o de control de tráfico. A pesar de su gran importancia para la gestión de demandas de transporte, éste ha sido poco estudiado en la literatura y los trabajos publicados sólo se interesan en sistemas pequeños con circuitos simples, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Sistema de producción automatizado con un circuito de transporte simple



Fuente: presentación propia del autor.

El primer trabajo sobre este tema fue presentado por Egbelu [1993], quien analizó un sistema con un circuito simple como el ilustrado en la Figura 2. Tanto en el trabajo de Egbelu como en los subsiguientes, el objetivo principal era identificar los puntos del circuito en los cuales deben ubicarse los vehículos una vez que estos estén desocupados (por ejemplo, cuando no hay ninguna demanda de transporte en espera). El objeto era minimizar el tiempo de servicio de la demanda siguiente. Este autor diferencia dos configuraciones: los sistemas unidireccionales y los sistemas bidireccionales. En el primer caso, los vehículos sólo pueden circular en un solo sentido a lo largo del circuito, mientras que en el segundo los vehículos pueden circular en ambos sentidos a lo largo del circuito. Vale la pena resaltar que desde el punto de vista de la gestión del tráfico, las redes bidireccionales son más complejas que las unidireccionales.

Kim [1995] considera el caso de un único vehículo en un circuito simple como el de la Figura 2 y busca minimizar el tiempo promedio de respuesta de las demandas de transporte. Este autor mostró que la versión estática del problema (por ejemplo, localización de un solo vehículo), así como una versión dinámica, se pueden resolver eficientemente, por ejemplo, mediante algoritmos polinomiales. Gademann y van de Velde [2000] demostraron que los problemas de minimización del tiempo máximo de respuesta y de minimización del tiempo promedio de respuesta se pueden resolver en tiempo polinomial para cualquier número de vehículos en un sistema con circuito simple, ya sea en el caso unidireccional como en el bidireccional.

A diferencia de los trabajos precedentes, este artículo estudia el problema general de localización de vehículos en una red de transporte mucho más compleja en la cual existen varios circuitos interconectados (Figura 1). Con respecto a los trabajos publicados en la literatura científica, este es el primer trabajo que estudia la localización de vehículos en ese tipo de configuraciones complejas. Adicionalmente, este trabajo es el primero en considerar la localización de vehículos, no una vez que no existan más demandas en espera, sino teniendo en cuenta las demandas de cada uno de los puntos de la red de tal manera que se anticipen las demandas provenientes de estos puntos.

3.2. Gestión operativa de vehículos en fábricas de semiconductores

La mayoría de los estudios publicados en la literatura sobre el transporte automatizado de productos en las fábricas de semiconductores, se focalizan ya sea en la selección de la tecnología (por ejemplo, bandas transportadoras, vehículos guiados automáticamente o sistemas de rieles) o en el diseño y configuración de la red de transporte (por ejemplo, sistemas divididos, sistemas unificados o con intercambiadores) [Horn, Podgorski, 1998], [Mackulak, Savory, 2001], [Lin, Wang, Wu, 2003]. Una completa revisión de la literatura se presenta en Montoya [2006]. Debido a la extensa literatura al respecto, se han propuesto métodos, tanto pragmáticos como sofisticados, basados en inteligencia artificial para

resolver el problema de configuración del sistema de transporte en las fábricas de semiconductores.

Con respecto a la gestión de los vehículos, contrariamente a la gran cantidad de estudios efectuados en sistemas flexibles de producción [Qiu et al., 2002], muy pocos trabajos han sido publicados para el caso particular de las fábricas de semiconductores. La mayoría de los trabajos se focalizan en el análisis por simulación de sistemas de transporte no unificados en los cuales únicamente se cuenta con circuitos simples (como el de la Figura 2), que comunican las diferentes áreas de fabricación (transporte de lotes entre las zonas de almacenamiento temporal que son externas a los talleres) [Lin, Wang, Yen, 2001], [DeJong, Wu, 2002], [Jiménez et al., 2002]. Hasta la fecha no existen trabajos que estudien el caso de gestión operativa de las demandas de transporte dentro de los talleres de fabricación. En los estudios publicados, la regla de despacho utilizada es principalmente la de primero en entrar – primero en salir (FCFS, por sus siglas en inglés).

Si bien estos estudios proveen algunos elementos acerca del comportamiento dinámico del sistema de transporte interno, se presentan por lo menos dos inconvenientes mayores. Primero, puesto que estos estudios sólo consideran los movimientos entre los departamentos de producción, la modelación del sistema de transporte es extremadamente simplificada y no logra captarse toda la complejidad del proceso productivo (por ejemplo, no se tienen en cuenta los movimientos dentro de las áreas de producción). Segundo, aquellos estudios consideran el sistema de transporte como una entidad aislada del sistema de fabricación. Debido a esto no se toma en cuenta la influencia de la variabilidad ocasionada por las actividades de producción en el momento de analizar el desempeño del sistema de transporte. En este punto es importante notar que el diseño óptimo de entidades individuales no garantiza un desempeño eficiente desde el punto de vista global, especialmente en el caso de la fabricación de semiconductores donde los indicadores de gestión de la fabricación están basados en el tiempo de ciclo de fabricación.

Adicionalmente, algunos otros trabajos publicados en la literatura consisten en modelos de simulación *ad-hoc*, que buscan identificar las condiciones bajo las cuales ciertas reglas de gestión de los vehículos funcionan bien. Al ser específicos, estos modelos de simulación no pueden generalizarse para aplicaciones en otras fábricas.

Como se puede observar, las características de los trabajos de investigación que han sido realizados hasta la fecha hacen que estos presenten ciertas limitaciones en cuanto a la aplicabilidad de los resultados obtenidos. Con la experiencia adquirida en el uso de sistemas automatizados de transporte, los fabricantes de semiconductores están optando por la instalación de sistemas unificados de transporte (por ejemplo, redes de transporte en las que los circuitos están interconectados), en los cuales los vehículos pueden desplazarse dentro de toda la red y así transportar un producto desde el punto de carga de una máquina directamente hasta el punto de descarga de la máquina que ejecuta la operación siguiente, sin necesidad de pasar por almacenamiento intermediario. Dicha característica aumenta la complejidad para la gestión operativa del sistema de transporte. Ello requiere la búsqueda y la implementación de estrategias inteligentes de control. En este artículo se presenta un procedimiento genérico basado en un enfoque de toma de decisiones jerárquico de optimización y simulación.

4. Método de gestión propuesto

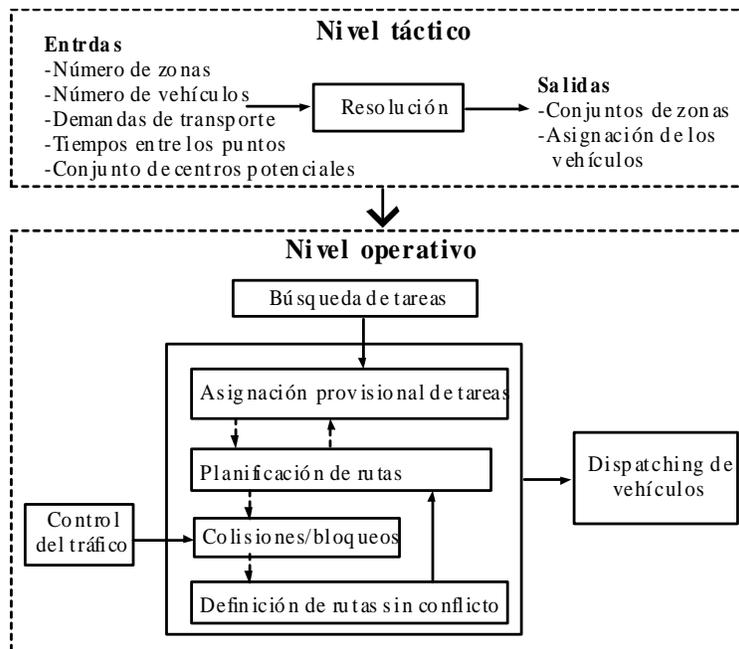
El objetivo del procedimiento propuesto es la gestión inteligente de los vehículos en una red unificada para el transporte interno de productos. Como se dijo anteriormente, un sistema unificado de transporte permite que los vehículos se desplacen dentro de la fábrica sin restricciones en todo el sistema y puedan transportar el producto en proceso de una máquina a la siguiente sin necesidad de pasar por almacenamiento temporal (si la capacidad de las filas de espera delante de éstas lo permite). Si bien la problemática de gestión de transporte estudiada fue la de una fábrica de semiconductores, el método de gestión propuesto es de carácter genérico aplicable a cualquier sistema de producción automatizada con vehículos para el transporte de productos o incluso puede adaptarse a redes

metropolitanas de transporte donde se encuentren problemáticas similares (por ejemplo, localización de ambulancias, de carros de policía o de bomberos) [Montoya, 2005].

El método propuesto está basado en un proceso secuencial de toma de decisiones, primero desde el punto de vista táctico y posteriormente operativo, como se muestra en la Figura 3. Desde el punto de vista táctico la red de transporte se divide en zonas de gestión (agrupamiento lógico de puntos de carga/descarga de la red) y se asigna una flota de vehículos a cada zona con el fin de satisfacer las demandas de transporte. Es importante resaltar el hecho de que las zonas no son necesariamente definidas por la localización geográfica de los puntos de carga/descarga, como se verá más adelante en la formulación matemática.

La solución táctica obtenida permite, de hecho, optimizar ciertos parámetros de la gestión operativa. Por lo tanto, el siguiente paso en el método propuesto es la implementación de esta solución en un modelo de simulación de la fábrica. En este modelo (programa) de simulación se integran los aspectos relacionados con las operaciones de fabricación, las reglas de programación de actividades de las máquinas, las políticas de despacho de los vehículos (reglas de servicio de las demandas de transporte), las reglas para el enrutamiento de vehículos y las políticas de control de tráfico. A continuación se presentan las consideraciones prácticas y las hipótesis del enfoque de gestión y se explican más en detalle los dos enfoques de decisión.

Figura 3. Decisiones tácticas y operativas: enfoque jerárquico



Fuente: presentación propia del autor.

4.1. Consideraciones e hipótesis

El desarrollo de los modelos de optimización y de simulación está basado en las siguientes consideraciones e hipótesis:

- La distribución en planta y la configuración del sistema de transporte están completamente definidas, incluyendo distancias de transporte fijas, localización de las máquinas y sentidos de circulación en la red.
- El flujo de material entre los recursos de fabricación (máquinas), en términos de carga por unidad de tiempo, es conocido. Éste es calculado a partir de las rutas de fabricación (secuencia de operaciones) de los productos que serán procesados y sus demandas a lo largo del horizonte de producción.
- Cada vez que un vehículo visita una máquina o un punto de carga/descarga siempre existe material para ser transportado.
- Sólo se consideran movimientos horizontales (por ejemplo, sistemas de tipo *automated guided vehicles*, *overhead transporters* o *automated rail carts*).

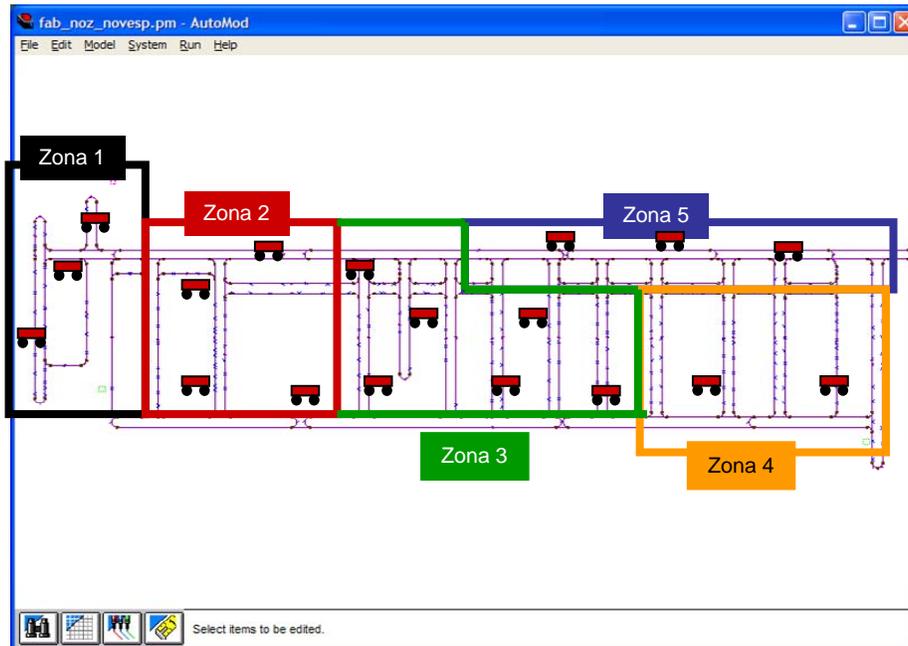
- Los vehículos se consideran idénticos, es decir, tienen las mismas velocidades de desplazamiento y las mismas capacidades de carga unitaria.
- Con respecto al problema de control de tráfico se considera que para evitar colisiones es suficiente con que éste se realice en los puntos de intersección de las vías unidireccionales.
- Tanto las máquinas como los vehículos se consideran fiables, es decir que no se tienen en cuenta los periodos dedicados al mantenimiento preventivo o reactivo.
- No se autoriza la interrupción de tareas de fabricación o de transporte ya iniciadas.
- El número de piezas por fabricar durante un periodo dado es conocido y constante. Esta hipótesis es realista en cuanto las políticas de lanzamiento de lotes generalmente son dadas por altos niveles de decisión dentro de una empresa. Adicionalmente, esto permite formular la función objetivo de tal manera que se minimice el tiempo máximo en que una pieza espera el servicio de transporte (por ejemplo, la llegada de un vehículo). Así, es posible aplicar la ley de Little [1961] para calcular el *throughput* del sistema en el periodo considerado.

4.2. Planificación táctica

Las decisiones tácticas corresponden a la localización o posicionamiento de vehículos en la red de transporte. Como se explicó antes brevemente, esta planificación consiste en dividir la red de transporte en zonas de gestión y distribuir los vehículos en el sistema de tal manera que se optimice el servicio de las demandas de transporte (mejorar el tiempo necesario para servir una demanda). La Figura 4 presenta un ejemplo de solución táctica con cinco zonas y dieciocho vehículos. Vale la pena resaltar que la solución de programación lineal entera permite determinar el número de vehículos asignados a cada zona (en el ejemplo, tres vehículos para la zona 1, cuatro en la zona 2, seis en la zona 3, dos en la zona 4 y tres en la zona 5). Para simplificar, pero sin pérdida de generalidad, los vehículos en la solución táctica están ubicados en el centro de la zona (en el punto j seleccionado). Desde el punto de vista operativo, sin embargo, los vehículos se desplazan

dentro de y entre las zonas. Por esta razón, la Figura 4 presenta los vehículos localizados en varios lugares dentro de la zona.

Figura 4. Ejemplo de solución de la planificación táctica para la fábrica bajo estudio



Fuente: presentación propia del autor.

El problema de planificación táctica puede ser resuelto utilizando métodos de programación matemática o métodos heurísticos. En trabajos precedentes [Montoya et al., 2005] se presenta y se discute la formulación en programación lineal entera basada en el modelo de resolución del problema de k -center, el cual es un problema clásico en teoría de localización de instalaciones. El problema de programación lineal entera propuesto que se muestra a continuación, toma en cuenta, sin embargo, a diferencia del k -center, la capacidad de servicio para cada una de las zonas creadas (instalaciones abiertas en el k -center) y considera que la demanda de servicio es una variable del modelo (en el k -center se considera que ésta es un parámetro del modelo).

$$\text{Minimizar } T \quad (1)$$

$$T \geq \sum_{j \in J} t_{jk} Y_{jk} \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} X_j \leq P \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} Y_{jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$Y_{jk} \leq X_j \quad \forall j \in J, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} Z_{vj} \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} D_k Y_{jk} \leq VC \sum_{v \in V} Z_{vj} \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (8)$$

$$Y_{jk} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, k \in K \quad (9)$$

$$Z_{vj} \in \{0,1\} \quad \forall v \in V, j \in J \quad (10)$$

Los parámetros del modelo son los siguientes:

P : número máximo de zonas a crear

V : conjunto de vehículos disponibles

K : conjunto de nodos (puntos) de la red de transporte

J : conjunto de nodos (puntos) de la red que pueden ser escogidos como centro de una zona

t_{jk} : tiempo de recorrido mínimo para ir del punto j al punto k

D_k : demanda promedio del punto k , medida como el tiempo necesario en segundos por hora para ejecutar todos los desplazamientos a partir del punto k

VC : capacidad disponible de los vehículos, medida como el tiempo en segundos por hora que necesita un vehículo para ejecutar una tarea

Las variables del modelo son las siguientes:

T : tiempo de cobertura, es decir, el necesario para servir una demanda

$X_j=1$ si el punto j es seleccionado como centro de zona, 0 de lo contrario

$Y_{jk}=1$ si el nodo k pertenece a la zona para la cual el punto j es el centro, 0 en caso contrario

$Z_{vj}=1$ si el vehículo v es asignado a la zona para la cual en punto j es el centro, 0 en caso contrario

La función objetivo (1) y las restricciones (2) buscan minimizar el máximo tiempo de cobertura de las demandas. Las ecuaciones (3) aseguran que se creen máximo P zonas en la red. Las restricciones (4) establecen que cada punto de la red de transporte pretenezca a una y sólo una zona. Las restricciones (5) establecen que un nodo de la red sea cubierto por una zona solamente si ésta ha sido creada. Las restricciones (6) garantizan que un vehículo sea asignado a máximo una zona. Las restricciones (7) aseguran que la capacidad de servicio de cada zona –con respecto al número de vehículos en la zona– sea satisfecha. Finalmente, los conjuntos de restricciones (8), (9) y (10) corresponden a los valores binarios 0-1 de las variables de decisión.

4.2. Gestión operacional

Para una red de transporte y una flota de vehículos determinadas, el problema de gestión operacional de vehículos consiste básicamente en resolver dos cuestiones. Primero, se trata de realizar la asignación de movimientos con y sin carga de los vehículos, de tal manera que sean satisfechas las demandas de transporte emitidas por las diferentes máquinas donde se procesa producto. Segundo, se requiere determinar las reglas para el enrutamiento de los vehículos de tal manera que puedan ejecutarse los órdenes para la satisfacción de las demandas. En un sistema unificado de transporte como el estudiado en este artículo, la implementación de una estrategia de servicio basada en zonas de gestión también impone la definición de políticas inteligentes para controlar el flujo de vehículos entre las diferentes zonas [Montoya, 2005]. Aquí se presentan las diferentes reglas implementadas en el análisis de simulación para resolver cada uno de estos problemas.

4.2.1. Gestión del flujo de vehículos en las zonas

La solución táctica obtenida para la distribución de vehículos en el sistema debe ser implementada desde el punto de vista operacional. En el trabajo se implementaron y

compararon varias políticas para controlar el flujo de vehículos entre y dentro de las zonas creadas [Montoya, 2005], [Montoya-Torres, Dauzère-Pérès, 2006]. En este artículo únicamente se presenta la política dominante.

Inicialmente, cada zona creada en la fábrica cuenta con un cierto número de vehículos asignados por la solución de orden táctica. De esta forma, desde el punto de vista operativo, se considera que un vehículo v asignado a la zona con centro j (i.e. $Z_{vj}=1$) puede servir a las demandas de transporte provenientes de un punto k siempre y cuando éste pertenezca a esta zona (i.e. $Y_{jk}=1$). Puesto que el sistema de producción tiene un comportamiento dinámico, los productos deberán ocasionalmente ser descargados en zonas diferentes a la zona inicialmente asignada al vehículo. En este caso, el vehículo v debe solicitar autorización para cambiar de zona de asignación. Dicha autorización únicamente es acordada si el número actual de vehículos en la zona de llegada es inferior al número determinado por la solución táctica. Si dicho vehículo no es asignado a la zona de llegada, entonces éste queda autorizado para servir a cualquier demanda de transporte en espera en el sistema, según la regla de despacho implementada.

4.2.2. Despacho de los vehículos

El despacho de vehículos (la asignación de vehículos a las demandas de transporte) es una parte muy importante para la gestión de sistemas de transporte, puesto que puede afectar significativamente el desempeño global del sistema de fabricación. La mayoría de los métodos utilizados son de tipo heurístico por naturaleza. Egbelu y Tanchoco [1984] identificaron dos situaciones principales. La primera es llamada a la iniciativa del vehículo (*vehicle-initiated task assignment*) y consiste en resolver el problema de asignación de un vehículo v a una tarea de transporte cuando varias demandas se encuentran simultáneamente en espera del servicio dentro de la zona j a la cual ha sido asignado el vehículo ($Z_{vj}=1$). Bajo esta categoría, varias reglas han sido propuestas y analizadas en la literatura [Egbelu, Tanchoco, 1984]. En este estudio se ha considerado la regla FCFS por ser la más utilizada en la literatura y por su facilidad de implementación práctica [Caumont

et al., 2006]. El objetivo de este análisis es entonces estudiar la pertinencia de la gestión por zonas tomando como referencia una regla básica de despacho, si bien se pueden considerar otras reglas como las que se mencionan en Montoya [2005] y Montoya et al. [2006].

La segunda situación es llamada a la iniciativa de la máquina (*load-initiated task assignment*) y consiste en resolver el problema de asignación de una demanda en espera de transporte que se encuentra dentro de la zona j a un vehículo v cuando varios vehículos sin carga se encuentran desocupados en el sistema. Bajo esta categoría, Egbelu y Tanchoco [1984] presentan y analizan varias reglas. La regla considerada en este estudio es LIV (*Longest Idle Vehicle*, el vehículo escogido es aquél que lleva inactivo el mayor tiempo). La ventaja más importante de esta regla consiste en el balance de carga entre los vehículos de la flota.

4.2.3. Enrutamiento de los vehículos y gestión del tráfico

Una vez ha sido tomada la decisión de asignación de vehículos a las demandas de transporte, se debe determinar la ruta que estos deben seguir. El problema de enrutamiento consiste, entonces, en determinar un recorrido que lleve al vehículo desde su localización actual hasta el punto de carga de la pieza seleccionada y desde allí hasta el destino final de descarga de la pieza [Qiu et al., 2002]. La decisión de enrutamiento depende de tres aspectos fundamentales:

- (i) Se debe detectar si existe o no una ruta.
- (ii) La ruta seleccionada debe ser factible (libre de congestión).
- (iii) Esta ruta debe ser óptima, o al menos pseudo-óptima, con respecto a una función objetivo.

En la práctica común, el problema de enrutamiento es generalmente resuelto mediante la selección del camino más corto entre dos puntos, a menos que éste se encuentre congestionado. En este caso, las corridas preliminares del programa de simulación mostraron que el camino más corto es también el más rápido [Montoya, 2005].

5. Estudio experimental

El procedimiento jerárquico de gestión de vehículos propuesto fue implementado en la fábrica descrita en el numeral 2. Los experimentos de optimización y de simulación fueron ejecutados en un PC Pentium® 4 (3.4 GHz). El modelo de programación lineal entera fue resuelto utilizando el solver Xpress® [Xpress, 2004]. Los tiempos de transporte entre cada par de puntos de la red están dados en una matriz de tamaño $|K| \times |K|$, donde $|K| > 220$ es el número total de nodos (puntos de carga/descarga) del sistema de transporte. El conjunto J de centros potenciales de zona puede ser igual a K . Sin embargo, debido a restricciones de carácter computacional, (espacio en memoria y tiempos de cálculo), se utilizó un subconjunto $|J|=30$ puntos antes de correr el programa lineal. Estos puntos fueron seleccionados utilizando un algoritmo de tipo *Greedy* [Montoya, 2005]. Los valores de los otros parámetros del modelo son considerados confidenciales y, por lo tanto, no pueden ser presentados.

Los resultados del programa lineal para resolver el problema táctico fueron luego implementados desde el punto de vista operativo en un programa de simulación de la fábrica. Este último fue construido utilizando el software AutoMod™ en el que se realizaron algunas corridas preliminares con el fin de validar y verificar el comportamiento del modelo de simulación.

Los factores y niveles del estudio experimental de simulación se presentan en la Tabla 1. Debido al tamaño de los experimentos y al elevado tiempo de cálculo para cada escenario, se diseñó un experimento multifactorial sin repeticiones [Montgomery, 1991]. En total, se consideraron veinticuatro escenarios ($4 \times 6 \times 1 \times 1$) y, para cada escenario, se analizó un periodo de producción de cuatro meses. Con el fin de evitar datos sesgados debido a la inicialización del modelo, los primeros dos meses se consideraron como periodo transitorio. Las estadísticas recuperadas durante el periodo transitorio fueron eliminadas y no se tomaron en cuenta para el análisis de resultados.

Tabla 1. Factores y niveles del diseño experimental

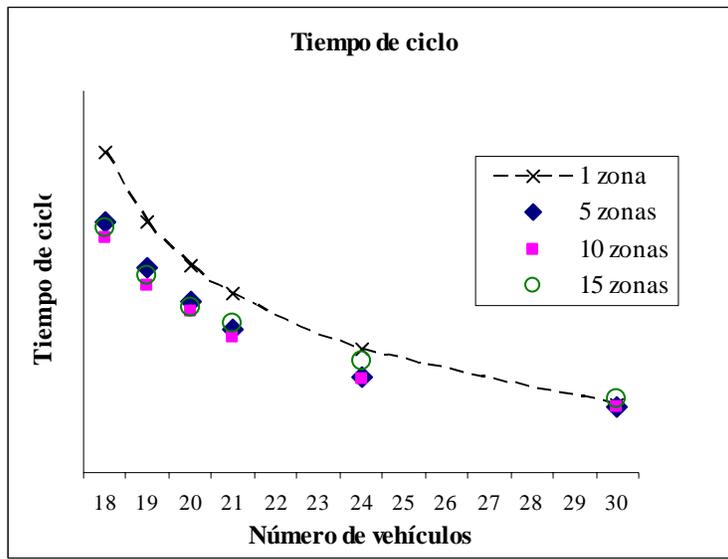
Factores	Niveles
Número de zonas por crear	1, 5, 10, 15
Número de vehículos	18, 19, 20, 21, 24, 30
Regla de dispatching a la iniciativa del vehículo	FCFS
Regla de dispatching a la iniciativa de la máquina	LIV

Fuente: presentación propia del autor.

Puesto que las fábricas de semiconductores son empresas en las que el costo de capital es una clave para su éxito y la competencia en el mercado está basada en la reducción de tiempos de fabricación, los principales indicadores de desempeño están a su vez basados principalmente en el tiempo. Durante las corridas de simulación se recolectaron datos acerca del tiempo de fabricación, del tiempo necesario para la satisfacción de una demanda de transporte, la utilización de los vehículos (carga de trabajo) y el tiempo de servicio (el tiempo que requiere un vehículo para efectuar un movimiento completo de búsqueda y entrega de un producto en la fábrica).

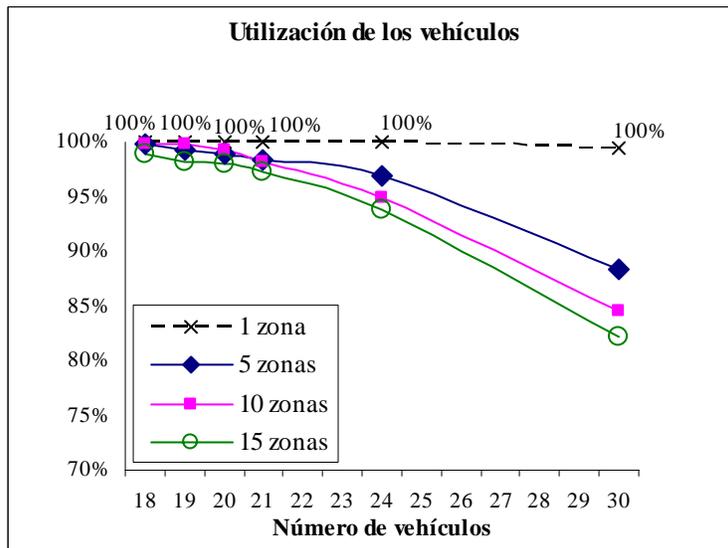
Los resultados para el tiempo de ciclo de fabricación y el nivel de utilización de los vehículos se presentan en las figuras 5 y 6, respectivamente. Las líneas punteadas representan el escenario de base sin la implementación del método propuesto. Las otras líneas y puntos en las gráficas indican los resultados para cada uno de los escenarios con cinco, diez y quince zonas creadas. Algunos valores numéricos no pueden ser presentados debido a la confidencialidad de los resultados.

Figura 5. Resultados comparativos de simulación para el tiempo de ciclo



Fuente: presentación propia del autor.

Figura 6. Resultados de simulación para el nivel de utilización de los vehículos



Fuente: presentación propia del autor.

Se puede observar que la implementación de la estrategia de gestión de demandas basada en las zonas permite disminuir el tiempo total promedio fabricación de las piezas. Adicionalmente, se puede obtener una reducción considerable del grado de utilización de los vehículos, lo cual permite una mejor utilización de la flota cuando algunos vehículos

estén en mantenimiento preventivo o reactivo, o incluso reducir el número de vehículos en el sistema y así ahorrar capital en el momento de la inversión inicial.

Es importante notar la convergencia en el valor del tiempo de ciclo a medida que se aumenta el tamaño de la flota de vehículos. Este es un resultado lógico puesto que, a medida que se alcanza la capacidad del sistema, no es posible obtener ningún mejoramiento en el tiempo de fabricación de productos y, por lo tanto, el grado de utilización de los vehículos comienza a disminuir considerablemente. De esta forma, los resultados experimentales muestran la importancia de una política de control de vehículos bien diseñada, en particular en los sistemas de producción completamente automatizados como son las fábricas de semiconductores.

6. Conclusión y perspectivas

En este artículo se estudió el problema de modelación y análisis de estrategias de gestión de vehículos en un sistema unificado de transporte automatizado. Se tomó como estudio de caso una fábrica moderna de semiconductores con un flujo de producción particularmente complejo.

Para este problema de gestión del transporte se propuso un procedimiento jerárquico basado en la integración de la optimización matemática clásica y de la simulación de eventos discretos. La jerarquía del método propuesto para la toma de decisiones considera un nivel táctico y un nivel operativo. Desde el punto de vista táctico, la red de transporte se divide en zonas de gestión asignando una flota de vehículos que permita satisfacer adecuadamente las demandas. Desde el punto de vista operativo la solución táctica es implementada junto con reglas de despacho, de enrutamiento y de control de tráfico dentro del sistema.

Este procedimiento híbrido optimización-simulación basado en una gestión del sistema por zonas permitió resaltar algunos aspectos de interés, principalmente relacionados con las

posibles reducciones en inversión inicial que se pueden obtener. Así, los resultados de las simulaciones mostraron la influencia que las estrategias de gestión operativa tienen sobre los indicadores de desempeño del sistema. Con las reglas implementadas se logró observar un mejoramiento, tanto en el tiempo promedio de fabricación como en el grado de utilización de los vehículos, cuando se utiliza la estrategia de gestión por zonas.

En cuanto a extensiones futuras de este trabajo, el método de optimización basado en programación lineal presenta algunos inconvenientes desde el punto de vista práctico. En particular, debido al tamaño de la red (número de puntos de carga/descarga) y al número de vehículos en el sistema, se necesita un tiempo de cálculo considerable para la obtención de la solución óptima. Este es un gran inconveniente si se desea utilizar dicho procedimiento bajo un contexto dinámico (en tiempo real) de toma de decisiones. Por lo tanto, una extensión interesante de este trabajo puede ser la resolución del problema táctico a través de métodos heurísticos o metaheurísticos. Un estudio sobre la garantía del margen de error entre la solución dada por estos métodos y la solución óptima es indispensable para su implementación desde el punto de vista operativo en el programa de simulación.

Agradecimientos

El autor agradece el apoyo financiero por parte de la Asociación Francesa de Investigación Tecnológica (ANRT) y de las entidades gubernamentales de la región Provence-Alpes-Côte d'Azur, Francia, a través del proyecto de investigación Rousset 2003-2008, realizado en asocio industrial con STMicroelectronics, Rousset, Francia. Igualmente, el autor agradece la excelente colaboración de S. Dautère-Pérès y L. Vermariën durante el desarrollo de este trabajo y la ayuda técnica de G. Rodríguez.

Referencias

Askin, R.G., Goldberg, J.F. *Design and analysis of lean production systems*. New York: John Wiley & Sons, 2002.

- Caumond, A., Lacomme, P., Moukrim, A., Tchernev, N. "An MILP for Scheduling Problems in an FMS with one Vehicle". En: *European Journal of Operational Research*, 2006. Por aparecer.
- DeJong, C.D., Wu, S.P. "Simulating the Transport and Scheduling of Priority Lots in Semiconductor Factories". En: *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*. CIUDAD: EDITORIAL, 2002, 1387-1391.
- Egbelu, P.J. "Positioning of Automated Guided Vehicles in a Loop Layout to improve response Time". En: *European Journal of Operational Research*, 71, 1993, 32-44.
- Egbelu P.J., Tanchoco, J.M.A. "Characterization of Automatic Guided Vehicle Dispatching Rules". En: *International Journal of Production Research*, 22 (3), 1984, 359-374.
- Gademann, A.J.R.M., van de Velde, S.L. Positioning Automated Guided Vehicles in a Loop Layout. En: *European Journal of Operational Research*, 127, 2000, 565-573.
- Horn, G., Podgorski, W. "A Focus on Cycle Time-vs.-Tool Utilization "Paradox" with Material Handling Methodology". En: *Proceedings of the 1998 IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, CIUDAD: EDITORIAL, 1998, 405-412.
- Jiménez, J., Kim, B., Fowler, J., Mackulak, G., Chung, Y.I., Kim, D.J. "Operational Modeling and Simulation of an Inter-bay AMHS in Semiconductor Wafer Fabrication". En: *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*. CIUDAD: EDITORIAL, 2002, 1377-1382.
- Kim, K.H. "Positioning of Automated Guided Vehicles in a Loop Layout to minimize the Mean Vehicle Response Time". En: *International Journal of Production Economics*, 39, 195, 201-214.
- Le-Anh, T., De Koster, M.B.M. *A Review of Design and Control of Automated Guided Vehicle Systems*. Technical report ERS-2004-030-LIS. Rotterdam: Erasmus Research Institute of Management, Rotterdam School of Management/Rotterdam School of Economics, Erasmus Universiteit Rotterdam, 2004.
- Lin, J.T., Wang, F.K., Yen, P.Y. "Simulation Analysis of Dispatching Rules for an Automated Interbay Material Handling System in Wafer Fab". En: *International Journal of Production Research*, 39 (6), 2001, 1221-1238.

- Lin, J.T., Wang, F.K., Wu, C.K. “The Connecting Transport of Automated Material Handling System in Wafer Fab”. En: *International Journal of Production Research*, 41 (3), 2003, 529-544.
- Little, J.D. “A Proof for the Queuing Formula $L=\lambda \times w$ ”. En: *Operations Research*, 16, 1961, 651-665.
- Mackulak, G.T., Savory, P. “A Simulation-based Experiment for comparing AMHS Performance in a Semiconductor Fabrication Facility”. En: *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 14 (3), 2001, 273-280.
- Material Handling Institute. *AGVs Application Profiles*. Charlotte: Material Handling Institute, 1993.
- Montgomery, D.G. *Diseño y análisis de experimentos*. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- Montoya, J.R. *Transport automatisé dans les systèmes de fabrication de semi-conducteurs: Nouvelles approches de gestion tactique et opérationnelle*. Thèse de doctorat, France: Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne y Université Jean Monnet, 2005.
- Montoya, J.R. “A Literature Survey on Design Approaches and Operational Issues of Automated Wafer-Transport Systems for Wafer Fabs”. En: *Production Planning and Control*, 2006. Por aparecer.
- Montoya, J.R., Dauzère-Pérès, S., Vermariën, L., Marian, H. Vehicle Positioning in Complex Automated Transport Systems. En: *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*. Vol. 2. CIUDAD: EDITORIAL, 2005, 165-170.
- Montoya, J.R., Dauzère-Pérès, S. Vehicle Management in unified AMHS for Wafer Fabrication Plants. *Working paper*, 2006.
- Montoya, J.R., Dauzère-Pérès, S., Vermariën, L., Marian, H. Zone-Based Vehicle Control in unified AMHS for Wafer Fabs. En: *Pre-prints of the 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, CD-ROM, 2006 (To appear also as Post-conference book edited by Elsevier).

Qiu, L. Hsu, W.J. Huang, S.Y., Wang, H. “Scheduling and Routing for AGVs: A Survey”.

En: *International Journal of Production Research*, 40 (3), 2002, 745-760.

Xpress. *Xpress MP Manual. Dash Optimization*. Xpress, 2004.