

Ingeniería y Universidad

Revista de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana

Revista de Categoría B

Índice Nacional de Publicaciones Científicas y Tecnológicas de Colombia

ISSN 0123-2126 - ISSN Versión Electrónica 2011 - 2769

Volumen 12, Número 1, enero - junio de 2008

Artículos de investigación científica y tecnológica

[Un procedimiento greedy para el problema de posicionamiento de vehículos en sistemas complejos de transporte automatizado para manufactura](#)

Jairo Rafael Montoya Torres

[Análisis de un sistema de comunicaciones afectado por los desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh](#)

Camilo Torres Zambrano, Carlos Iván Páez Rueda

[Diseño de una camilla/mesa proctológica](#)

Martha Ruth Manrique Torres, Luis Jorge Lombana Amaya, Guillermo Andrés Pérez Rodríguez, Ovidio Rincón Becerra

Nota: HELA, este artículo no se puede abrir desde la página 19/feb/09

[Modelo de simulación para fabricar losa tradicional en la región sureste de México](#)

Julio Rodrigo Baeza Pereyra

[Modelo de medición y evaluación de la usabilidad en sitios web de la banca virtual en Colombia](#)

Elkin René Pulido Granados, Víctor Hugo Medina García

Un procedimiento *greedy* para el problema de posicionamiento de vehículos en sistemas complejos de transporte automatizado para manufactura*

A Greedy Procedure for Vehicle Positioning in Complex Automated Transportation Systems used in Manufacturing

Um procedimento *greedy* para o problema do posicionamento de veículos em sistemas complexos de transporte automatizado para a manufatura

*Jairo Rafael Montoya Torres***

* Fecha de recepción: 19 de septiembre de 2007. Fecha de aceptación para publicación: 14 de marzo de 2008. Este artículo se deriva de la investigación denominada *Posicionamiento de vehículos para el manejo de materiales en sistemas de manufactura*, financiada por el Fondo de Investigación de la Universidad de La Sabana, bajo contrato número CEA-18-2007.

** Ingeniero Industrial, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Master of Science in Industrial Engineering and Management, Institut National Polytechnique de Grenoble, Francia. Doctor en Ingeniería Industrial, Ecole National Supérieure des Mines de Saint-Etienne y Université Jean Monnet, Francia. Profesor asociado, Universidad de La Sabana. Correo electrónico: jairo.montoya@unisabana.edu.co

Resumen

Este artículo analiza el problema de localización o posicionamiento de vehículos para el transporte de producto en proceso 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 almacenamientos intermedios temporales. Puesto que el número de vehículos es limitado, se hace necesario implementar estrategias inteligentes para satisfacer eficientemente las demandas de transporte. Para resolver este problema, en trabajos anteriores se ha propuesto un enfoque de toma de decisiones basado en la optimización y simulación según la jerarquía de decisiones tácticas y operativas, respectivamente. En este trabajo se estudia sólo la parte táctica, donde gracias a estimaciones estáticas, el objetivo es determinar la mejor manera de distribuir los vehículos dentro de la fábrica, con el fin de satisfacer las demandas en el menor tiempo posible. Se propone un procedimiento heurístico de resolución basado en el principio *greedy* con estrategia de búsqueda local. Se realiza un estudio experimental comparativo empleando juegos de datos de una planta de manufactura automatizada. Los resultados muestran la pertinencia del método propuesto, a través del mejoramiento de los indicadores de gestión del sistema productivo y del tiempo de cálculo para la toma de decisiones en tiempo real.

Palabras clave

Sistemas de transporte automatizado, semiconductores, métodos heurísticos.

Abstract

This paper discusses the problem of vehicle location or positioning for material handling in automated manufacturing systems. The problem is inspired by a real-life application in semiconductor manufacturing. The main difference between this paper and previous works is the consideration of the unified nature of the transport system in which vehicles can travel from one machine to another without passing through intermediate storage. Since a vehicle fleet size is limited, it is necessary to implement intelligent strategies to satisfy transportation requests. Previous works have focused on hierarchical mathematical programming and simulation approaches. This paper studies the tactical decision level, in which, based on static demand estimates, the objective is to determine the best distribution of vehicles within the factory so as to minimize the time required to service a transport request. A greedy heuristic procedure is proposed. Experimental tests have been conducted using previous data from the literature based on a real-life automated factory. An improvement in both production metrics and computation time has been obtained.

Key words

Automated Material Handling Systems, semiconductors, heuristic methods.

Resumo

Este artigo analisa o problema de localização ou posicionamento de veículos para o transporte do produto em processo de uma fábrica de produção automatizada. O problema abordado está inspirado numa aplicação real na indústria dos semicondutores. A principal diferença, com respeito aos trabalhos precedentes na literatura, radica-se na natureza unificada do sistema de transporte, com o qual é possível diminuir o número de movimentos por veículo e transportar o produto em processo diretamente de uma máquina para a seguinte, sem necessidade de passar por armazenamentos intermediários temporários. Considerando que o número de veículos é limitado, é necessário implementar estratégias inteligentes para satisfazer eficientemente as demandas de transporte. Para resolver este problema, nos trabalhos anteriores o enfoque tem sido na toma de decisões baseado na otimização e simulação segundo a hierarquia de decisões tácticas e operacionais, respectivamente. Neste trabalho estuda-se só o nível táctico, onde graças a estimaciones estáticas, o objetivo é determinar a melhor maneira de distribuir os veículos dentro da fábrica com a finalidade de satisfazer as demandas no menor tempo possível. Propõe-se um procedimento heurístico de resolução baseado no princípio *greedy* com a estratégia de procura local. Realiza-se um estudo experimental empregando jogos de dados de uma planta de manufactura automatizada. Os resultados ilustram a pertinência do método proposto através do melhoramento dos indicadores da gestão do sistema productivo e do tempo de cálculo para a tomada de decisões no tempo real.

Palavras chaves

Transporte automatizado, posicionamento de veículos, procedimientos heurísticos.

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 ocupa de 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 y Goldberg, 2002); el resto, al tiempo que el producto permanece tanto en las filas de espera como en actividades de transporte entre las operaciones de manufactura. En consecuencia, se han efectuado grandes esfuerzos en la industria, referidos en la literatura al diseño y operación eficiente de los sistemas de transporte automatizado (AMHS, por su sigla en inglés de *Automated Material Handling Systems*). Según estudios realizados por el Material Handling Institute (MHI, 1993), 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 del producto en proceso (*work-in-process* o *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.

El desempeño de los sistemas de transporte automatizado generalmente se mide como una función decreciente con respecto al tiempo de servicio (tiempo que transcurre entre el momento en el cual una pieza emite una demanda de transporte y el momento en el cual esta es atendida). El tiempo de servicio se compone básicamente de un tiempo de espera para la llegada de un transportador o vehículo y un tiempo de transporte (viaje) entre los puntos de carga y descarga.

Adicionalmente a la tecnología asociada al sistema mismo de transporte, varios aspectos tácticos y operativos afectan el desempeño de un sistema como este, 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 los trabajos de Qiu *et al.* (2002) y Le-Anh y De Koster (2006).

Entre los problemas asociados a la gestión del sistema de transporte, en la literatura tradicionalmente se citan el despacho y el enrutamiento. El primero consiste en definir un orden para el servicio de las demandas de transporte, es decir, decidir qué vehículo de la flota disponible debe servir a una determinada demanda. El problema de enrutamiento, por otra parte, consiste en, una vez escogido el vehículo que servirá a la demanda, definir una ruta factible que lo lleve desde su localización actual hasta el punto donde se generó la demanda, y desde allí hasta el destino final.

En grandes sistemas complejos de manufactura con sistemas automatizados de transporte se presenta un tercer problema: el posicionamiento o localización de los vehículos. En términos globales, consiste en decidir dónde ubicar los diferentes vehículos de la flota con el fin de poder responder rápidamente a una demanda de transporte, esto es, llegar al punto de demanda en el menor tiempo posible. En la jerarquía del proceso de toma de decisiones, el problema de posicionamiento de vehículos puede ser visto, en principio, como un problema táctico, junto con los problemas de diseño de la red de transporte y definición del tamaño de la flota de vehículos.

Dentro de este contexto, este artículo se interesa en analizar los aspectos tácticos para un desempeño eficiente del sistema de producción. En este nivel de toma de decisiones, el centro de interés es el problema de localización o posicionamiento de vehículos en la red de transporte. Como se mencionó, la pregunta clave es ¿cómo distribuir los vehículos dentro del sistema de tal manera que las demandas se satisfagan en el menor tiempo posible? El impacto de la implementación de dicha estrategia se refleja operativamente, de forma que el posicionamiento de vehículos permite obtener reglas para el despacho de los vehículos mucho más eficientes que las comúnmente utilizadas tanto en la literatura como en la práctica industrial (Montoya, 2006).

Con miras a poder establecer una comparación con métodos presentados en la literatura, el procedimiento sugerido para la resolución del problema de posicionamiento se ha estudiado experimentalmente con base en datos reales

obtenidos en una fábrica completamente automatizada de la industria de los semiconductores, y descrita en detalle por Montoya (2006). Así, se utiliza el mismo conjunto de datos y las mismas restricciones del modelo de sistema de manufactura allí planteado.

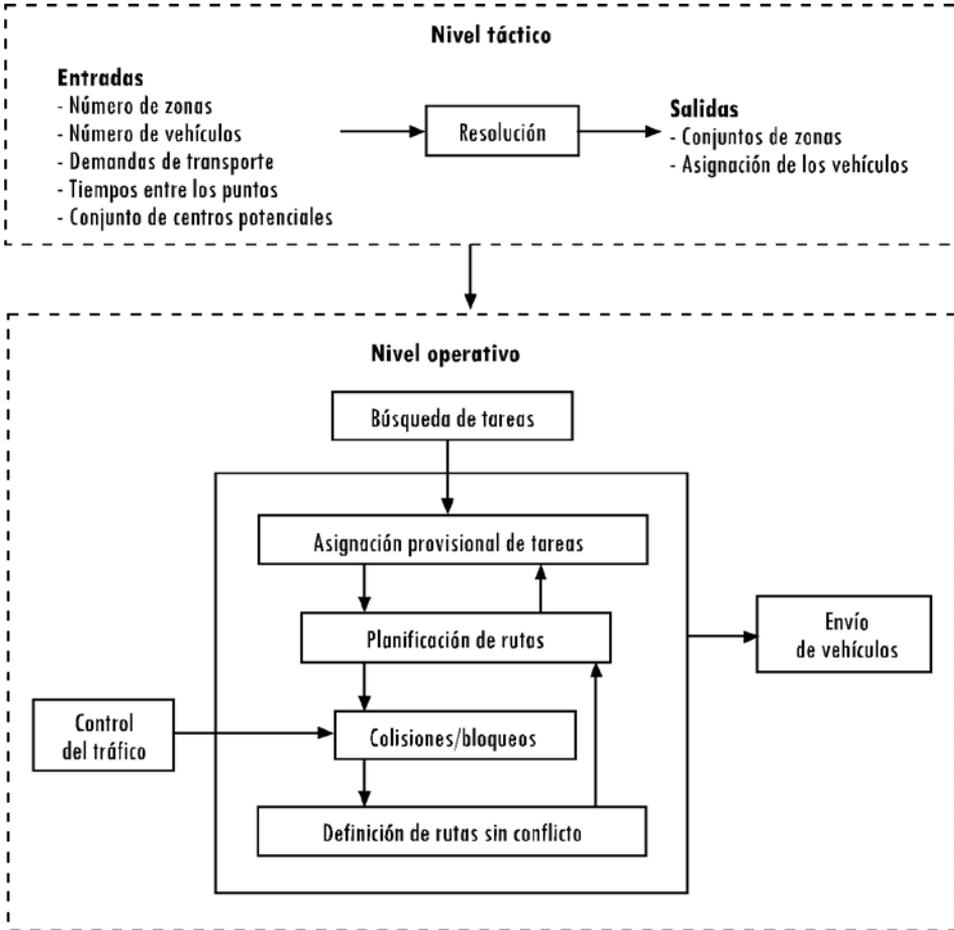
Un sistema unificado de transporte permite que los vehículos se desplacen dentro de la fábrica sin restricciones dentro de todo el sistema, lo que les permite transportar el producto en proceso de una máquina a la siguiente sin necesidad de pasar por un almacenamiento temporal (si la capacidad de las filas de espera delante de estas lo permite). Si bien la problemática de gestión de transporte estudiada fue encontrada en 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 en (Montoya, 2005 y 2006) está basado en un proceso secuencial de toma de decisiones, primero desde el punto de vista táctico y, luego, operativo, como se muestra en la Figura 1. Inicialmente, desde la perspectiva táctica, la red de transporte se divide en zonas de gestión (por ejemplo, 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 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. Esta solución táctica optimiza ciertos parámetros de la gestión operativa.

Por lo tanto, el siguiente paso en el método propuesto es implementar esta solución en un modelo de simulación de la fábrica. En este modelo 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 dinámico 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.

Como ya se mencionó, este artículo se ocupa del problema táctico correspondiente a la definición de zonas en la red de transporte y a la localización o posicionamiento de vehículos en cada una de ellas, de tal forma que se logre mejorar el tiempo de servicio de las demandas (Figura 2). Como se verá posteriormente en la segunda parte del artículo, los modelos matemáticos existentes para estudiar este problema pueden llegar a ser demasiado complejos.

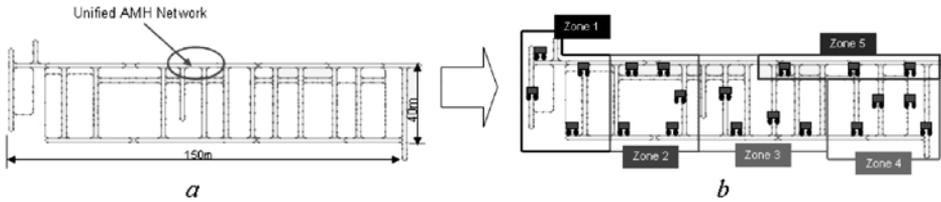
Figura 1. Niveles táctico y operativo del enfoque jerárquico de gestión del sistema de transporte



Fuente: presentación propia del autor.

Así, el tiempo de cálculo necesario para encontrar la solución del problema para grandes tamaños de red se vuelve prohibitivo cuando se desea implementarlo en un proceso dinámico de toma de decisiones, incluso si se ha realizado una preselección de puntos potenciales para establecer la configuración de las zonas. La contribución de este artículo consiste en mejorar las técnicas de resolución del problema de posicionamiento de vehículos en grandes redes complejas de transporte, a fin de lograr disminuir el tiempo de cálculo sin seccionar previamente la red.

Figura 2. Ejemplo del problema de definición de zonas (a) antes y (b) después de realizar una definición geográfica*



* Nótese que los procedimientos de resolución presentados en este artículo pueden definir las zonas independientemente de la localización geográfica de los puntos.

Fuente: presentación propia del autor.

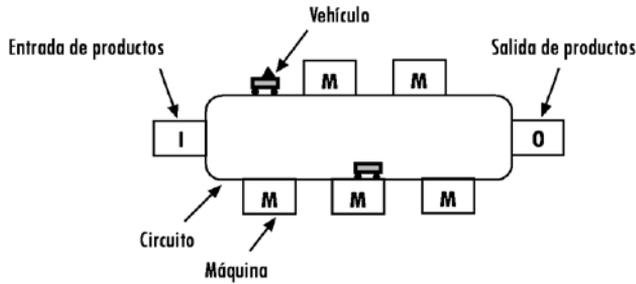
Este artículo está organizado de la siguiente manera. La primera parte presenta una revisión de los trabajos sobre localización de vehículos en sistemas de producción con transporte automatizado. La segunda parte se ocupa de la modelación del problema bajo la forma de un programa lineal entero. Se presentan tanto las hipótesis del modelo como algunas de sus extensiones. Así mismo, se discute allí una aplicación práctica de los modelos propuestos. La tercera parte muestra con detalle el método de resolución propuesto basado en el principio *greedy*, con estrategias de mejoramiento basadas en un algoritmo de búsqueda local. Se ha aceptado la pertinencia e importancia de los algoritmos basados en el principio *greedy* para la resolución de problemas conocidos de optimización combinatoria como *NP*-completos (Korte y Vygen, 2002), con lo que este enfoque puede considerarse una estrategia ambiciosa en búsqueda de la mejor solución a cada momento. En la cuarta parte se describen el estudio experimental y los resultados numéricos. El artículo termina con las conclusiones y algunas perspectivas de trabajo futuro.

1. Literatura relacionada

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 (Montoya, 2005 y 2006). Estas solicitudes de transporte son emitidas por los productos en proceso de fabricación. Por consiguiente, la estrategia de localización (o posicionamiento) de vehículos dentro del sistema afecta su desempeño operativo y puede incidir en las reglas operativas de despacho o control de tráfico. Pese a su gran importancia para la gestión de demandas de transporte, este problema ha sido poco estudiado

en la literatura académica, y los trabajos publicados sólo se interesan en sistemas pequeños con circuitos simples, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. 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 3. Tanto en este trabajo como en los posteriores, el objetivo principal era identificar los puntos del circuito en los cuales deben ubicarse los vehículos una vez están desocupados (por ejemplo, cuando no hay demanda alguna de transporte en espera), a fin de minimizar el tiempo para servir a la siguiente demanda. 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, 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 3 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 puede resolver eficientemente, por ejemplo mediante el uso de 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, tanto en el caso unidireccional como en el bidireccional.

Como se puede observar, las características de los trabajos previos 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, las plantas de manufactura automatizada están optando por instalar sistemas unificados de transporte —como redes de transporte en la cuales 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. Esta característica aumenta la complejidad para la gestión operativa del sistema de transporte y requiere la búsqueda e implementación de estrategias de control inteligentes.

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 2a). Como se mencionó, los trabajos de Montoya *et al.* (2005 y 2007) y Montoya (2005 y 2006) son los primeros en estudiar este problema para redes de transporte en sistemas de manufactura; aplicaciones similares se pueden encontrar para problemas en redes metropolitanas como en Adenso-Días y Rodríguez (1997) y Brotcorne *et al.* (2003). En estos trabajos la función objetivo está relacionada con la satisfacción de un criterio social de servicio como es lograr llegar al punto de demanda en un máximo de tiempo. Esto hace que la formulación de un modelo de resolución requiera acotar el valor solución de la función objetivo.

Este artículo presenta, además, una extensión de los modelos presentados en Montoya *et al.* (2005 y 2007). Como se verá más adelante, estos modelos necesitan unos supuestos fuertes al momento de aplicarlos a un proceso dinámico de toma de decisiones. El procedimiento presentado se basa en reducir el tiempo de cálculo, con miras a implementar la estrategia de posicionamiento de vehículos en el sistema de control del sistema de transporte automatizado de la planta. Adicionalmente, este trabajo es el primero en considerar la localización de los vehículos tomando en cuenta las demandas de cada uno de los puntos de la red, de manera que se anticipen las demandas provenientes de estos puntos y no como otros, que se ocupan de dicha localización una vez no existen más demandas en espera.

2. Modelamiento matemático del problema de posicionamiento de vehículos

2.1 Consideraciones e hipótesis

El desarrollo de los modelos de resolución del problema de posicionamiento de vehículos está basado en las siguientes consideraciones e hipótesis (Montoya, 2006):

- La distribución en planta y la configuración del sistema de transporte están completamente definidas, incluidas distancias de transporte fijas, localización de las máquinas y sentidos de circulación en la red.
- El flujo de material entre los recursos de fabricación (por ejemplo, máquinas) en términos de carga por unidad de tiempo es conocido y es calculado a partir de las rutas de fabricación (secuencia de operaciones) de los productos que serán procesados y de 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, esto es, tienen las mismas velocidades de desplazamiento, y son de carga unitaria.
- Con respecto al problema de control de tráfico, se considera que para evitar colisiones es suficiente con que este se realice en los puntos de intersección de las vías unidireccionales.
- Tanto las máquinas como los vehículos se consideran fiables, es decir, no se tienen en cuenta los períodos dedicados al mantenimiento preventivo o reactivo.
- No se autoriza la interrupción de tareas de fabricación o de transporte ya iniciadas.
- El número de piezas que se va a fabricar durante un período dado es conocido y constante. Esta hipótesis es realista, por 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 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 período considerado.

2.2 Modelo de programación lineal entera y sus extensiones

Las decisiones tácticas corresponden a la localización o posicionamiento de vehículos en la red de transporte. Como se explicó, 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. La Figura 2 muestra un ejemplo de solución táctica con 5 zonas y 18 vehículos. Vale la pena resaltar que la solución del programa lineal entero permite determinar el número de vehículos asignados a cada zona (en el ejemplo, 3 vehículos para la zona 1, 5 en la zona 2, 4 en la zona 3, 4 en la zona 4 y 3 en la

zona 5). Para simplificar el problema sin perder generalidad, los vehículos en la solución táctica están ubicados en el centro de la zona (por ejemplo, en el punto j seleccionado). Sin embargo, desde el punto de vista operativo, los vehículos se desplazan dentro y entre las zonas. Por esta razón, la Figura 2 muestra los vehículos localizados en varios lugares dentro de la zona.

El problema de planificación táctica puede resolverse utilizando métodos de programación matemática o métodos heurísticos. El modelo presentado a continuación fue propuesto por Montoya *et al.* (2005). La formulación consiste en un programa lineal entero (PLE), basado en el modelo de resolución del problema de k -center, el cual es un problema clásico en teoría de localización de instalaciones. El PLE propuesto, a diferencia del k -center, toma en cuenta 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 cree que esta es un parámetro del modelo). A continuación se describen los parámetros y las variables del modelo.

Parámetros:

P : número máximo de zonas que se van a crear.

V : conjunto de vehículos disponibles, con $|V|$ el tamaño de la flota de vehículos.

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 (en segundos en una hora) necesario para ejecutar todos los desplazamientos a partir del punto k .

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

Variables:

T : tiempo de cobertura (tiempo necesario para servir una demanda).

$X_j = 1$ si el punto j es seleccionado como centro de zona, 0 si no.

$Y_{jk} = 1$ si el nodo k pertenece a la zona para la cual el punto j es el centro, 0 si no.

$Z_{vj} = 1$ si el vehículo v es asignado a la zona para la cual en punto j es el centro, 0 si no.

El programa correspondiente es entonces:

$$\text{Minimize } T \tag{1}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

El objetivo consiste en minimizar el tiempo necesario para servir a la demanda más alejada de las zonas. Es decir, reducir el máximo tiempo de cobertura de las demandas. La expresión matemática correspondiente es:

$$\min \left\{ \max_k \sum_{j \in J} t_{jk} Y_{jk} \right\}$$

Para desarrollar un programa lineal esta función debe transformarse en la función objetivo (1) y las restricciones (2). La ecuación (3) asegura que se creen máximo P zonas en la red. Las restricciones (4) establecen que cada punto de la red de transporte pertenezca a una y sólo una zona. Las restricciones (5) establecen que un nodo de la red sea cubierto por una zona solamente, si esta 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 a 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.

Con el fin de garantizar una solución factible, la capacidad total de los vehículos en el sistema debe ser mayor o igual que la demanda total de transporte.

Esto significa que la restricción (11) tiene necesariamente que ser satisfecha. Esta ecuación, además, permite encontrar el tamaño mínimo de la flota de vehículos requerida por el sistema.

$$\sum_{k \in K} D_k \leq VC \times |V| \quad (11)$$

Con esta formulación monoobjetivo se tiene interés en abrir todas las P zonas. El inconveniente radica en que la carga de los vehículos (expresada por su tasa de utilización) puede ser muy elevada o muy pequeña (Montoya *et al.*, 2007). Además, se supone que el tiempo de cobertura se minimiza con una disponibilidad de los vehículos del 100% del tiempo, pues no se tienen en cuenta las fallas o los períodos de mantenimiento. Así mismo, es posible fijar una tasa de utilización máxima de los vehículos e incluirla en las restricciones del modelo. Para ello se define un parámetro adicional denotado como UR_{\max} (con $UR_{\max} \in [0,1]$). Ahora las restricciones (7) pueden remplazarse por las restricciones (12), que se muestran a continuación:

$$\sum_{k \in K} D_k Y_{jk} \leq UR_{\max} VC \sum_{v \in V} Z_{vj} \quad \forall j \in J \quad (12)$$

Al aplicar el modelo anterior es posible que en la solución se encuentren vehículos subutilizados. Con el ánimo de balancear la carga de transporte en la flota de vehículos, se podría incluir el nivel de utilización de los vehículos como una variable en el modelo. Así, en un modelo de optimización bicriterio, UR_{\max} representa el nivel de utilización máxima de los vehículos y se considera una variable incluida en la función objetivo, como se muestra en la ecuación (13). En este caso se debe tomar en cuenta la tasa de utilización individual de los vehículos. Un conjunto de variables UR_{vj} se define como la tasa de utilización del vehículo v asignado a la zona para la cual el punto j es el centro ($UR_{vj} \in [0,1]$). Esto permite equilibrar la carga de trabajo de los vehículos. Este nuevo modelo, que se presenta a continuación, permite equilibrar la carga de los vehículos asignados a las zonas.

$$\text{Minimize } CO_1 \times T + CO_2 \times UR_{\max} \quad (13)$$

$$T \geq \sum_{j \in J} t_{jk} Y_{jk} \quad \forall k \in K \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J} X_j \leq P \quad (15)$$

$$\sum_{j \in J} Y_{jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (16)$$

$$Y_{jk} \leq X_j \quad \forall j \in J, k \in K \quad (17)$$

$$\sum_{j \in J} Z_{vj} \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (18)$$

$$\sum_{k \in K} D_k Y_{jk} \leq VC \sum_{v \in V} UR_{vj} \quad \forall j \in J \quad (19)$$

$$UR_{vj} \leq Z_{vj} \quad \forall v \in V, j \in J \quad (20)$$

$$UR_{\max} \geq \sum_{j \in J} UR_{vj} \quad \forall v \in V \quad (21)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (22)$$

$$Y_{jk} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (23)$$

$$Z_{vj} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, \forall v \in V \quad (24)$$

$$UR_{vj} \in [0,1] \quad \forall j \in J, \forall v \in V \quad (25)$$

Se trata entonces de un modelo de optimización multiobjetivo para el cual resulta interesante buscar el conjunto de soluciones pareto-óptimas. Para ello es posible variar los valores de los coeficientes CO_1 y CO_2 de la función objetivo. Sin embargo, el interés de este trabajo es formalizar el problema de posicionamiento y analizar su impacto, en términos de tiempo de cálculo, en los procesos de toma de decisiones en la planta. De esta manera, para resolver el modelo se fijaron los valores de estos dos coeficientes como $CO_1 = CO_2 = 1$. Esta decisión se justifica por el hecho de que los valores de las variables T y UR_{\max} están acotadas: $1 \leq T \leq \max t_{ik}$ y $0 \leq UR_{\max} \leq 1$. De este modo, si T es menor que 1 y UR_{\max} no puede tomar valores superiores a 1, el peso de T en la función objetivo será siempre más importante que la tasa de utilización de los vehículos. Por consiguiente, se obtiene implícitamente una estrategia lexicográfica para la resolución del modelo.

2.3 Discusión sobre los modelos de PLE

Debido al gran tamaño de la red de transporte donde se tienen $K > 200$ puntos de carga y descarga (nodos en el grafo), la formulación del problema como modelo de programación lineal entera resulta costosa en términos computacionales (Montoya *et al.*, 2005; Montoya, 2006). La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos para el tiempo de cálculo al aplicar los dos modelos descritos, empleando el conjunto de datos del estudio experimental que se muestra más adelante. Como se observa en la tabla, el tiempo requerido para obtener la solución óptima con el modelo monoobjetivo (minimización del tiempo de cobertura T) es de 581 segundos (9,68 minutos) para dividir el sistema en 5 zonas, 7.612 segundos (2,11 horas) para dividir el sistema en 10 zonas y 4.014 segundos (66,9 minutos) para dividir el sistema en 15 zonas. Ahora bien, al aplicar el modelo biobjetivo, los tiempos de cálculo observados son de 1.434 segundos (23,9 minutos), 9.607 segundos (2,66 horas) y 18.321 segundos (5,08 horas), respectivamente. Esto representa un incremento de 146,8%, 26,2% y 356,4%, respectivamente en los tiempos de cálculo al incluir más elementos en el PLE. Esta situación es una primera motivación para diseñar un procedimiento heurístico eficiente y eficaz.

Tabla 1. Tiempos de cálculo (tiempo de CPU en segundos) para la resolución de los modelos de PLE con una flota de 30 vehículos en el sistema

Tipo de modelo de PLE	Número de zonas por crear		
	5 (s)	10 (s)	15 (s)
Modelo PLE monoobjetivo	581	7.612	4.014
Modelo PLE biobjetivo	1.434	9.607	18.321

Fuente: presentación propia del autor.

Como se mencionó en la descripción de los modelos matemáticos, estos utilizan un subconjunto J de puntos que han debido ser seleccionados previamente como candidatos para ser escogidos como centros de zona. Por lo tanto, $J \subset K$ y $|J| < |K|$, donde K es el conjunto de todos los puntos de la red de transporte (nodos del grafo). Debido a esta restricción fuerte para la resolución de redes de gran tamaño, estos modelos de programación entera son sensibles a los cambios que se puedan presentar en el conjunto J .

La Tabla 2 presenta algunos ejemplos del impacto que tiene la preselección de los puntos en el conjunto J cuando se desea minimizar el tiempo de cobertura

T . El conjunto J corresponde a un primer conjunto de puntos preseleccionados. Los resultados obtenidos para el valor del tiempo de cobertura T cuando se desean crear 5, 10 y 15 zonas son respectivamente 73, 50 y 41 unidades de tiempo. El conjunto J' representa otro subconjunto de puntos preseleccionados, es decir $J' \neq J$. Al resolver nuevamente los programas enteros, se observa que el valor del tiempo de cobertura aumenta cuando el objetivo era crear 10 zonas en el sistema. Finalmente, para un tercer subconjunto de puntos preseleccionados, J'' , los valores para el tiempo de cobertura T obtenidos al correr los modelos son 63, 63 y 60 unidades de tiempo al crear respectivamente 5, 10 y 15 zonas en la red.

Tabla 2. Impacto del conjunto J en la solución de los modelos de PLE reflejado en el valor mínimo del tiempo máximo de cobertura

Conjunto	Número de zonas		
	5	10	15
J	73	50	41
J'	73	51	41
J''	63	63	60

Fuente: presentación propia del autor.

Un tercer aspecto de los modelos matemáticos es la forzada relación de linealidad entre las variables de decisión en la función objetivo y en las restricciones. Esto hace que no sea posible considerar funciones objetivo en las cuales se incluya, por ejemplo, un cálculo para la varianza de la utilización de los vehículos o la tasa de cubrimiento de la demanda en cada una de las zonas creadas.

La implementación de métodos de resolución alternativos basados en procedimientos heurísticos o metaheurísticos podría ser una buena alternativa para sobrepasar estas limitaciones de los modelos de programación lineal. Por esta razón, este artículo propone un método heurístico de tipo *greedy*, con estrategia de búsqueda y con una función objetivo compuesta, que evidencia buenos resultados en el tiempo de cálculo y en el valor de la función objetivo. A continuación se describe el procedimiento correspondiente.

3. Procedimiento *greedy*

El procedimiento de resolución sugerido para el problema de posicionamiento de vehículos está basado en el principio *greedy* con estrategia de búsqueda local.

Durante la resolución de un problema, los métodos *greedy* construyen la solución de forma secuencial, tomando decisiones en cada etapa del procedimiento. El principio *greedy* consiste en adoptar las decisiones que parecen ser las mejores en un momento dado (se dice que actúa de forma miope), sin preocuparse de las consecuencias posteriores y sin reevaluar las decisiones ya tomadas.

Un algoritmo *greedy* se dirige lo más rápidamente posible a una solución sin cuestionarla. Debido a su apetito voraz, no es seguro que el algoritmo *greedy* llegue a la solución óptima, pero permite obtener un buen resultado rápidamente, que lo hace interesante al momento de pensar en implementar el método de posicionamiento en un sistema inteligente de gestión dinámica en la planta de manufactura. Incluso si la solución no es la óptima, se han reconocido los beneficios de los métodos *greedy* para la resolución de problemas combinatorios de tipo *NP*-completos (Korte y Vygen, 2002). Como se verá en la descripción de las etapas del algoritmo, el método propuesto también incluye un procedimiento de búsqueda local que permite mejorar la estrategia estándar.

El método *greedy* propuesto se describe en detalle en la Tabla 3. Adicionalmente a los dos criterios de decisión descritos por la ecuación (13), es decir, el tiempo máximo de cobertura y la utilización máxima de los vehículos, el algoritmo incluye una decisión en cuanto al balance de la demanda de cada una de las zonas creadas. Cuando ninguno de los tres criterios es mejorado en alguna de las etapas del algoritmo, se eliminan iterativamente los centros de zona existentes, reemplazados por los otros centros potenciales de zona para evaluar el mejoramiento posible de los criterios que se van a optimizar. Si es posible obtener mejoramiento en el valor de la función objetivo, entonces se guarda esta nueva configuración de zonas en la red de transporte. De no ser posible este mejoramiento, el algoritmo se detiene. Por otro lado, si en alguna de las etapas se introduce un nuevo punto como centro de zona, se busca reorganizar las zonas de tal forma que se reduzca la demanda máxima de las zonas o se logre distribuir la flota actual de vehículos.

Tabla 3. Descripción del algoritmo *greedy* propuesto

Entradas	Número P de zonas que se van a crear Conjunto K de puntos de la red Tiempos t_{ik} entre los puntos i y k de la red Número $ V $ de vehículos Capacidad VC de cada uno de los vehículos
Salidas	Conjunto de zonas creadas <u>Asignación de los vehículos a las zonas</u>
Objetivos	Criterio 1: tiempos máximos de cobertura T Criterio 2: demanda máxima de las zonas Criterio 3: <u>dispersión de la tasa de utilización de los vehículos</u>
Etapas 1	Escoger el punto centro de zona que garantice el mínimo tiempo de cobertura máxima
Etapas 2	Escoger un segundo punto como centro de zona (el mejor) que forme con el primero dos zonas, minimizando el tiempo de cobertura máxima a lo más igual al valor obtenido en la etapa 1 y que mejore el primer criterio de decisión. Si no, que mejore el segundo criterio de decisión (manteniendo el mismo valor para el primer criterio), o si no que mejore el tercer criterio de decisión (manteniendo el mismo valor para los otros dos criterios)
Etapas 3	Escoger un tercer punto como centro de zona (el mejor) que forme con los otros dos, tres zonas de tal forma que se mejore el resultado para los tres <u>criterios de decisión en su respectivo orden de prioridad</u>
Etapas 4	Repetir el procedimiento hasta que no sea posible obtener mejoramiento alguno en la función objetivo, o hasta que alguna de las restricciones no pueda ser satisfecha (e. g. el número máximo de zonas)

Fuente: presentación propia del autor.

4. Estudio experimental

Con miras a realizar una comparación experimental del método propuesto se emplearon datos reales provenientes de una planta de fabricación de semiconductores presentada por Montoya (2006). La selección de dicho conjunto de datos se sustenta en el interés de contrastar el método sugerido en este artículo con los resultados obtenidos aplicando los modelos de programación lineal entera propuestos en trabajos precedentes. Los experimentos se ejecutaron en un PC Pentium® 4 (3,4 GHz). Los modelos de programación lineal entera se resolvieron utilizando el solver Xpress® (Dash Optimization, 2004), mientras que el algoritmo heurístico propuesto se programó en C++ Builder. El conjunto de datos empleados fue el mismo que los descritos en (Montoya, 2006) y se detallan a continuación.

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, para el modelo de PLE, fundamentalmente debido a restricciones de carácter computacional, se utilizó un subconjunto $|J| = 30$ puntos antes de correr el programa lineal. Para el caso del procedimiento heurístico, el conjunto J de centros potenciales de zona se consideró exactamente igual al conjunto K . Los valores de los otros parámetros del modelo se consideran confidenciales y no son presentados. Adicionalmente, se tomó una flota de 24 o 30 vehículos disponibles en el sistema. El número de zonas que se van a crear se fijó en 5, 10 y 15, para obtener así un total de 9 escenarios de análisis, empleando los dos modelos de PLE presentados y el algoritmo *greedy* propuesto. Los indicadores clave de comparación fueron tanto los criterios definidos en las funciones objetivos descritas por las ecuaciones (1) y (13), como el tiempo de cálculo necesario para encontrar las soluciones.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 4, 5 y 6. Es necesario recordar que, debido a restricciones en la capacidad de memoria del equipo de cómputo utilizado, los modelos de PLE consideran un subconjunto J de puntos que han sido previamente seleccionados para ser potencialmente centros de zona. Por lo tanto, $J \subset K$ y $|J| < |K|$, donde K es el conjunto de todos los puntos de la red. Para el algoritmo *greedy* este conjunto $J=K$ y $|J| = |K|$, lo cual significa que todos los puntos de la red pueden ser seleccionados como centro de zona en la resolución del problema.

Tabla 4. Resultados para el modelo de PLE monoobjetivo

Tamaño de la flota: 24 vehículos			
Número máximo de zonas que se van a crear	5	10	15
Número de zonas creadas	5	10	15
Tiempo máximo de cobertura (T)	73	50	41
Utilización promedio de los vehículos (%)	78,5	75,1	68,4
Utilización mínima de los vehículos (%)	67,8	38,3	29,0
Utilización máxima de los vehículos (UR_{\max}) (%)	99,9	97,0	97,3
Tamaño de la flota: 30 vehículos			
Número máximo de zonas que se van a crear	5	10	15
Número de zonas creadas	5	10	15
Tiempo máximo de cobertura (T)	73	50	41
Utilización promedio de los vehículos (%)	76,9	76,8	77,7
Utilización mínima de los vehículos (%)	57,1	51,0	44,9
Utilización máxima de los vehículos (UR_{\max}) (%)	92,1	99,9	98,0

Fuente: presentación propia del autor.

Tabla 5. Resultados para el modelo de PLE biobjetivo

Tamaño de la flota: 24 vehículos			
Número máximo de zonas que se van a crear	5	10	15
Número de zonas creadas	5	10	15
Tiempo máximo de cobertura (T)
Utilización promedio de los vehículos (%)	72,6	72,1	71,9
Utilización mínima de los vehículos (%)	72,3	61,6	52,4
Utilización máxima de los vehículos (UR_{\max}) (%)	72,9	76,7	89,1
Tamaño de la flota: 30 vehículos			
Número máximo de zonas que se van a crear	5	10	15
Número de zonas creadas	5	10	15
Tiempo máximo de cobertura (T)	73	50	41
Utilización promedio de los vehículos (%)	59,2	57,5	57,7
Utilización mínima de los vehículos (%)	56,7	44,8	40,1
Utilización máxima de los vehículos (UR_{\max}) (%)	63,7	61,7	61,8

Fuente: presentación propia del autor.

Tabla 6. Resultados aplicando el algoritmo *greedy*

Tamaño de la flota: 24 vehículos			
Número máximo de zonas que se van a crear	5	10	15
Número de zonas creadas	5	10	15
Tiempo máximo de cobertura (T)	71	51	38
Utilización promedio de los vehículos (%)	72,5	72,5	72,5
Utilización mínima de los vehículos (%)	65,5	61,6	46,9
Utilización máxima de los vehículos (UR_{\max}) (%)	80,7	90,4	97,3
Tamaño de la flota: 30 vehículos			
Número máximo de zonas a crear	5	10	15
Número de zonas creadas	5	10	15
Tiempo máximo de cobertura (T)	71	49	45
Utilización promedio de los vehículos (%)	57,99	57,99	57,99
Utilización mínima de los vehículos (%)	49,13	52,65	50,33
Utilización máxima de los vehículos (UR_{\max}) (%)	61,18	64,93	70,87

Fuente: presentación propia del autor.

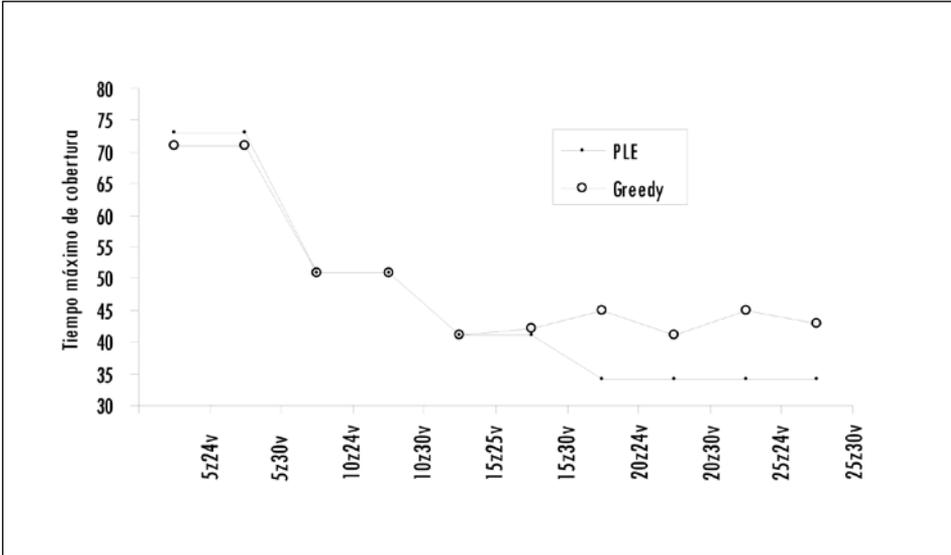
A partir de esta observación se pueden explicar las diferencias obtenidas para el valor del tiempo máximo de cobertura T obtenido con los modelos de PLE (73, 50 y 41) en comparación con los obtenidos con el algoritmo *greedy* (71, 49 y 45), cuando se desean crear respectivamente 5, 10 y 15 zonas en la red de transporte. Para los dos primeros casos se obtiene un valor inferior con el método *greedy*, mientras que para el último caso se obtiene un valor superior para el tiempo de cobertura máxima. Este aumento en el valor de T se explica probablemente por la misma naturaleza del método *greedy*, la cual implica que el algoritmo estará buscando llegar rápidamente a una solución sin preocuparse de las consecuencias posteriores al seleccionar otros puntos de la red como centros de zona.

Como se puede observar en los resultados presentados, hay una disminución en el valor solución de T en la medida en que el número P de zonas que se van a crear aumenta. Esto también se observa con la implementación de los modelos de PLE. Este resultado es lógico, en cuanto el objetivo es crear la mayor cantidad de zonas posibles con el fin de disminuir el valor de T .

El algoritmo *greedy* considera todos los puntos de la red como centros potenciales de zona (por ejemplo, $J=K$). Con el fin de analizar más a fondo el impacto de seleccionar previamente el subconjunto J , se realizaron más experimentos comparando el valor de T para un mayor número de zonas creadas (más de 15 zonas). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4. El primer resultado interesante tiene que ver con el valor de T para la creación de 20 o más zonas utilizando los modelos de PLE; en ese caso el valor de T permanece constante. Esto se explica por la definición previa del subconjunto J de puntos candidatos a ser centro de zona. De aquí la importancia de escoger este subconjunto J . Por otro lado, se observa que el valor de la solución obtenida con el método *greedy* para el tiempo de cobertura máxima es mayor que la solución dada por los modelos de programación lineal entera. Este resultado es de esperar, debido al objetivo del método *greedy*, que consiste en encontrar una solución factible lo más rápidamente posible.

Como se explicó anteriormente, este es el impacto de la estrategia implícita en el algoritmo que no le permite cuestionarse sobre la solución y que lleva a encontrar mejoramientos únicamente de manera local. Sin embargo, al aumentar mucho el número de zonas que se van a crear, podría aumentar la complejidad de la gestión dinámica operativa del sistema, lo cual implicaría el diseño de reglas de despacho y de enrutamiento de los vehículos más sofisticadas (Montoya, 2005). Los otros resultados obtenidos con el algoritmo *greedy* se presentan en la Tabla 6. A pesar de las diferencias encontradas para el valor del tiempo de cobertura máxima (T), el método *greedy* provee resultados comparables para el promedio de utilización de los vehículos.

Figura 4. Comparación del valor del tiempo de cobertura entre los PLE y el método *greedy*



Fuente: presentación propia del autor.

Con respecto al tiempo de cálculo, la Tabla 7 retoma los valores presentados en la Tabla 1 para los modelos de PLE y presenta los tiempos obtenidos para el algoritmo *greedy* en el caso de 30 vehículos. Como se puede apreciar, el tiempo de cálculo se logra reducir hasta en un 95%. Estos resultados de la muestra tomada ilustran la relevancia de la implementación del método *greedy* en el contexto dinámico de toma de decisiones para el sistema de transporte, y puede ser utilizado para la definición o redefinición de zonas en la fábrica, en la medida en que la demanda de transporte evoluciona en tiempo real durante el horizonte de producción.

Tabla 7. Tiempos de cálculo con 30 vehículos en el sistema

Tiempo CPU (s)	Número de zonas			Mínimo (min)	Máximo (min)
	5	10	15		
Modelo PLE monoobjetivo	581	7.612	4.014	9,68	126,87
Modelo PLE biobjetivo	1.434	9.607	18.321	23,90	305,35
Algoritmo <i>greedy</i>	510	872	909	8,50	15,15

Fuente: presentación propia del autor.

Así sería posible imaginar un método híbrido de resolución, en el cual el método *greedy* sea empleado para escoger los puntos pertenecientes al subconjunto J y luego los modelos de PLE sean empleados para calcular la solución óptima de la configuración deseada. Igualmente, el método *greedy* puede servir de base para generar nuevos procedimientos metaheurísticos para la resolución rápida y eficaz del problema.

5. Conclusiones

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 la fábrica automatizada de semiconductores presentada por Montoya (2006), con un flujo de producción particularmente complejo. Como apoyo al proceso de producción en sí mismo se consideró el problema táctico de posicionamiento o localización de vehículos dentro de la red automatizada de transporte. En la literatura este problema había sido abordado a partir de modelos de programación lineal entera. Debido a las limitaciones de estos modelos para ser aplicados de forma dinámica en la redefinición de zonas y asignación de la flota de vehículos en el sistema (tiempo de cálculo muy elevado y dependencia de una preselección de puntos), este artículo propuso un método heurístico basado en el principio de resolución *greedy*.

El objetivo principal era mejorar los indicadores de tiempo de cálculo sin afectar la cobertura de puntos de la red y el nivel de utilización de los vehículos. Los resultados en cuanto a los valores de las funciones objetivo son comparables con los modelos matemáticos propuestos en la literatura. Además, los resultados obtenidos para el procedimiento *greedy* sugerido permiten aplicar el algoritmo, con los fines de resolver en tiempo real el problema táctico de posicionamiento de los vehículos en la red durante la fabricación y de desarrollar herramientas de apoyo a la toma de decisiones en la fábrica.

Referencias

- ADENSO-DÍAZ, B. and RODRÍGUEZ, F. A Simple Search Heuristic for the MCLP Application to the Location of Ambulante Bases in a Rural Region. *Omega International Journal of Management Science*. 1997, núm. 25, pp. 181-187.
- ASKIN, R. G. and GOLDBERG, J. F. *Design and Analysis of Lean Production Systems*. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- BROTCORNE, L.; LAPORTE, G., and SEMET, F. Ambulance Location and Relocation Models. *European Journal of Operations Research*. 2003, vol. 147, pp. 451-463.

- DASH OPTIMIZATION. *Xpress MP manual*, 2004.
- EGBELU, P. J. Positioning of Automated Guided Vehicles in a Loop Layout to Improve Response Time. *European Journal of Operational Research*. 1993, vol. 71, pp. 32-44.
- GADEMANN, A. J. R. M. and VAN DE VELDE, S. L. Positioning Automated Guided Vehicles in a Loop Layout. *European Journal of Operational Research*. 2000, vol. 127, pp. 565-573.
- KIM, K. H. Positioning of Automated Guided Vehicles in a Loop Layout to Minimize the Mean Vehicle Response Time. *International Journal of Production Economics*. 1995, vol. 39, pp. 201-214.
- KORTE, B. and VYGEN, J. *Combinatorial Optimization. Theory and Algorithms*. Berlin: Springer, 2002.
- LE-ANH, T. and KOSTER, M. B. M. De. A Review of Design and Control of Automated Guided Vehicle Systems. *European Journal of Operational Research*. 2006, vol. 171, pp. 1-23.
- LITTLE, J. D. A Proof for the Queuing Formula $L = \lambda \times w$. *Operations Research*. 1961, vol. 16, pp. 651-665.
- MATERIAL HANDLING INSTITUTE (MHI). *AGVS application profiles*. Charlotte, 1993.
- MONTOYA, J. R. Internal Transport in Automated Semiconductor Manufacturing Systems. Novel Approaches for Tactical and Operational Management. *4OR A Quarterly Journal of Operations Research*. 2007, vol. 5, núm. 1, pp. 93-97.
- . Procedimiento jerárquico basado en optimización y simulación para la gestión de vehículos en sistemas automatizados de manufactura. *Ingeniería y Universidad*, 2006, vol. 10, núm. 1, pp. 77-96.
- . *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.; DAUZÈRE-PÉRÈS, S.; VERMARIËN, L., and MARIAN, H. Vehicle Positioning in Complex Automated Transport Systems. *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, vol. 2, pp. 165-170. Catania, Italy. September 19-22, 2005.
- MONTOYA, J. R., DAUZÈRE-PÉRÈS, S.; VERMARIËN, L., and MARIAN, H. Tactical Vehicle Location in Large Unified Automated Material Handling Systems. *Production Planning and Control*. Inédito. 2007.
- QIU, L.; HSU, W. J.; HUANG, S. Y., and WANG, H. Scheduling and routing for AGVs. A survey. *International Journal of Production Research*. 2002, vol. 40, núm. 3, pp. 745-760.

Análisis de un sistema de comunicaciones afectado por los desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh*

Analysis of a Communication System affected by flat and slow Rayleigh Fading

Análise de um sistema de comunicações afetado pelo desvanecimento plano e lento tipo rayleigh

*Camilo Torres Zambrano***

*Carlos Iván Páez Rueda****

* Fecha de recepción: 1 de marzo de 2007. Fecha de aceptación para publicación: 18 de enero de 2008. Este artículo se deriva del trabajo de grado para optar al título de Maestría en Ingeniería Electrónica del primer autor, denominado *Modulación adaptable para voz y datos en canales variantes en el tiempo*.

** Ingeniero electrónico, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Estudiante de la Maestría en Ingeniería Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: camilo.torres@javeriana.edu.co

*** Ingeniero electrónico, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Máster en Ingeniería Electrónica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Profesor asistente, Departamento de Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: paez.carlos@javeriana.edu.co

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de desempeño de un sistema de comunicaciones digitales, conformado por una modulación M-ary QAM y un canal afectado por los desvanecimientos multitrayectoria plano y lento tipo Rayleigh con ruido AWGN limitado en la banda. Los resultados se compararon con algunas probabilidades de error teóricas para este tipo de canales. Las curvas de desempeño halladas permitieron encontrar unas nuevas cotas para el desempeño del sistema, las cuales son valiosas para el cálculo simplificado de radioenlaces.

Palabras clave

Modulación de luz, sistemas de telecomunicación, métodos de Montecarlo, simulación por computador.

Abstract

In this paper, we present the performance of a digital communication system made up by a modulation M-ary AQM and a channel with a flat, slow multipath fading type Rayleigh with AWGN noise limited in the band. The results found are compared with some theoretical error probabilities for this type of channel. The curves presented allowed us to find a new approach for this kind of system, which is valuable for simplified measurements of radio links.

Key words

Light modulation, telecommunication systems, Monte Carlo methods, computer simulation.

Resumo

No presente artigo apresentam-se os resultados do desempenho de um sistema de comunicações digitais conformado por uma modulação M-ary QAM e um canal afetado pelo desvanecimento multi-trajetória de tipo plano e lento tipo Rayleigh com ruído AWGN limitado na banda. Os resultados encontrados são comparados com algumas probabilidades de erro teóricas para esse tipo de canais. As curvas de desempenho encontradas permitiram achar novos níveis para o desempenho do sistema, as quais são valiosas para o cálculo simplificado de radio enlaces.

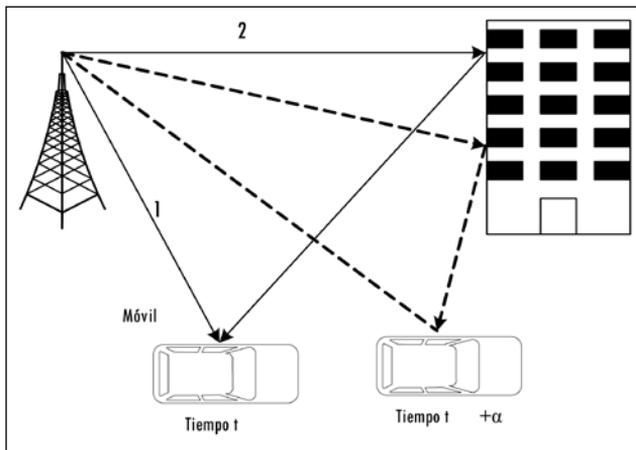
Palavras chaves

Modulação M-ary QAM, canal AWGN, envolvente complexa, simulação Monte Carlo.

Introducción

El siglo XXI se ha caracterizado por el incremento exponencial de las soluciones inalámbricas para los problemas relacionados con las telecomunicaciones. Al utilizar un canal de radiofrecuencia como medio de transmisión no guiado de un sistema de comunicación, este debe combatir todos los fenómenos que se presenten, en particular el desvanecimiento multirrayectoria. Este fenómeno, cuya característica usualmente es variante en el tiempo, se produce por la velocidad de movimiento del transmisor o del receptor o por la disposición variante de los objetos presentes en el canal, causantes de la reflexión, la refracción y la dispersión de la onda transmitida, como se ilustra en la Figura 1.

Figura 1. Desvanecimiento multirrayectoria



Fuente: presentación propia de los autores.

En este artículo se presentan los resultados de desempeño de la modulación M-ary QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) en un canal de comunicaciones afectado por desvanecimientos multirrayectoria plano y lento de tipo Rayleigh,

enmarcado dentro del trabajo de investigación denominado *Modulación adaptable para voz y datos en canales variantes en el tiempo* (Torres, 2007). Los resultados del modelo de simulación planteado y su correspondiente validación abren la posibilidad de continuar con el diseño de un novedoso esquema de modulación de características adaptables, que permita simultáneamente transferir información de dos tipos de tráfico, cuyas medidas de desempeño en el enlace son disímiles, como son las generadas por el tráfico de aplicaciones de voz y datos.

Como metodología de análisis se escogió la técnica de simulación por medio de la envolvente compleja, que tiene como ventajas trasladar la complejidad del problema a un modelado particular del sistema de comunicaciones particular, una implementación eficiente en *software*, un análisis estadístico pertinente y un costo computacional inherente. Con esta técnica de simulación aplicada a las telecomunicaciones se pueden crear herramientas de diseño y análisis asistido por computador, que permiten predecir el desempeño de los sistemas bajo condiciones del canal mucho más complejos y, por ende, determinar la eficiencia de los protocolos que combaten sus efectos (Woerner *et al.*, 1994; Tranter y Kosbar, 1994; Shanmugan, 1994).

A continuación se exponen algunos antecedentes teóricos relacionados con el sistema de comunicaciones que se modeló y se documentan algunos resultados teóricos de desempeño, referidos en la literatura, para la modulación M-ary QAM. Luego se presenta el modelo de simulación para encontrar las medidas de desempeño de la modulación M-ary QAM en un canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), limitado en banda, y en un canal con desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh.

Después se presentan y se discuten los resultados obtenidos a través de la implementación del modelo del sistema en *software*, comparados con los resultados teóricos encontrados en la literatura. A partir de los resultados obtenidos se plantea una nueva cota teórica que permite encontrar el desempeño del sistema de forma simple y que resulta valiosa para el cálculo simplificado de radioenlaces. Finalmente, se exponen las conclusiones y la perspectiva del trabajo realizado.

1. Antecedentes de la teoría de comunicaciones digitales

A continuación se presentan los antecedentes teóricos relacionados con la técnica de análisis escogida y el sistema de comunicaciones M-ary QAM.

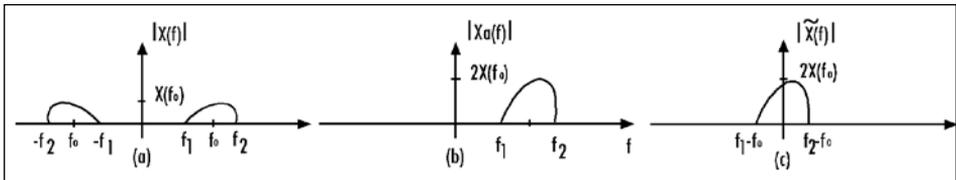
1.1 Teoría de la envolvente compleja

La simulación es una actividad indispensable en el diseño y análisis de sistemas de comunicaciones, especialmente cuando se analizan esquemas de una mayor complejidad. La técnica de simulación aplicada se basa en el desarrollo teórico de la envolvente compleja y su aplicación en telecomunicaciones. Por tal razón se presenta esta teoría en el contexto de la teoría de señales y sistemas.

A una señal real de banda angosta $x(t)$ con frecuencia $f \in (f_1, f_2)$ se le puede asociar una señal analítica denominada la *preenvolvente compleja*, denotada por $x_a(t)$ a través de (1). La señal $x_H(t)$ es la transformada de Hilbert de $x(t)$. La relación de los componentes de frecuencia entre la señal real de banda angosta y su preenvolvente compleja se puede deducir de la Figura 2 (a y b).

$$x_a(t) = x(t) + jk_H(t) \tag{1}$$

Figura 2. Señal de banda angosta y equivalente pasa bajos



Fuente: presentación propia de los autores.

A la señal $x(t)$ se le puede asociar otra señal analítica denotada por $\tilde{x}(t)$ (Ecuación 2). Dicha función tendría una representación en frecuencia como se observa en la Figura 2c y recibe el nombre de la envolvente compleja.

$$\tilde{x}(t) = x_a(t)e^{-j2\pi f_0 t} \tag{2}$$

La función analítica correspondiente es una representación en el plano de las funciones complejas conveniente para la simulación, ya que es una representación banda base de la señal original; por ende, requeriría una cantidad mucho menor de muestras que la señal original para su representación discreta. La expresión $e^{j2\pi f_0 t}$ en la envolvente compleja representa la frecuencia de la portadora. A partir de la envolvente compleja es posible encontrar la señal banda base original a través de la relación planteada en (3).

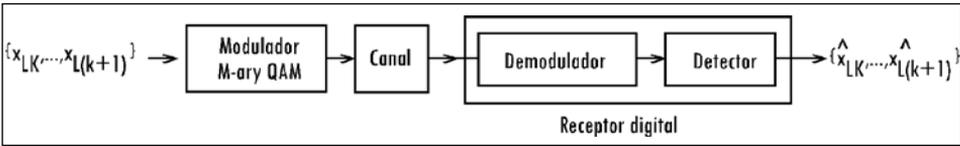
$$x(t) = \text{Re} \{x_a(t)\} = \text{Re} \{\tilde{x}(t)e^{j2\pi f_0 t}\} \tag{3}$$

Para un mayor detalle sobre la teoría de la envolvente compleja y su aplicación a sistemas de telecomunicaciones se puede consultar a (Benedetto y Biglieri, 1999).

1.2 Transmisión digital M-ary QAM

En la Figura 3 se detalla el diagrama en bloques conceptual que representa una transmisión digital que utiliza una modulación M-ary QAM.

Figura 3. Sistema de transmisión digital M-ary QAM



Fuente: presentación propia de los autores

El modulador digital Mary-QAM se encarga de transformar el bloque k-ésimo de bits de tamaño $L = \log_2(M)$, denotado por $\{x_{L(k+1)}, \dots, x_{L(k+1)L}\}$ en una señal analógica $s_k(t)$ denotada por (4), válida en el intervalo de tiempo $[kT_s, kT_s + T_s]$, donde las amplitudes d_k y q_k dependen de la energía transmitida por el bloque k-ésimo.

$$S_k(t) = A_c d_k \cos(2\pi f_0 t) - A_c q_k \sin(2\pi f_0 t), \quad kT_s < t < (k + 1)T_s \tag{4}$$

El diagrama en bloques denominado receptor tiene como función extraer el vector que contiene la información necesaria para estimar cuál fue el símbolo enviado a partir de la señal recibida del canal $r_k(t)$ en el intervalo de tiempo $[kT_b, kT_b + T_b]$. Cuando dicho receptor se denomina óptimo, es porque se ha diseñado para minimizar la probabilidad de error. En el diagrama en bloques general de dicho receptor se ilustra su conformación a través de los subsistemas denominados demodulador y detector.

El objetivo del subsistema demodulador es proyectar la señal recibida $r_k(t)$ en el subespacio de la modulación. Este proceso se realiza por medio de las funciones base que representan dicho subespacio. El resultado de dicho subsistema en el intervalo de tiempo $[kT_s, kT_s + T_s]$ es un vector denotado por $r_k = [r_{k1}, r_{k2}, \dots, r_{kL}]$, que representa la señal k-ésima enviada más los fenómenos introducidos por el canal. El objetivo del detector es encontrar la secuencia de bits original asociada al k-ésimo bloque, minimizando la probabilidad de una incorrecta decisión. Se pueden encontrar diversos criterios y algoritmos para implementar los subsistemas de demodulador y detección en Proakis (2004).

1.3 Canal AWGN

El canal AWGN es un canal aleatorio donde se genera una salida modelada por medio de (5).

$$r_k(t) = s_k(t) + n(t), \quad kT_s < t < (k+1)T_s \quad (5)$$

Donde $s_k(t)$ es la señal de entrada al canal en el intervalo de tiempo $[kT_s, (k+1)T_s]$ y $n(t)$ es un proceso aleatorio que representa un ruido ideal denominado *blanco gaussiano*, conformado por una densidad espectral de potencia constante en todas las frecuencias de valor $N_0/2$, con media cero e independiente de la señal de entrada. La señal $s_k(t)$ se asume que está limitada en frecuencia, con ancho de banda W y con potencia finita.

El modelo de un canal AWGN no es conveniente para analizar sistemas desde el punto de vista de la causalidad y la potencia, ya que no es físicamente realizable. Por lo tanto, es usual definir un ruido limitado en banda derivado del ruido blanco gaussiano para análisis de sistemas. El canal AWGN con ruido limitado en banda es caracterizado por (6), donde f_0 es la frecuencia central de operación y las funciones $n_d(t)$ y $n_q(t)$ son procesos estocásticos banda base con ancho de banda W , mutuamente independientes, con media cero y varianza $N_0W/2$.

$$r_k(t) = s_k(t) + n_d(t) \cos(2\pi f_0 t) - n_q(t) \sin(2\pi f_0 t), \quad kT_s < t < (k+1)T_s \quad (6)$$

Para un mayor detalle del canal AWGN y el canal AWGN con ruido limitado en banda se puede consultar a (Hanzo *et al.*, 2000).

1.4 Canal con desvanecimientos plano y lento

En el modelo de un canal de comunicaciones AWGN, la señal de entrada solamente está afectada por una atenuación y por un retardo constante. Los canales afectados por desvanecimiento multitraectoria generan atenuaciones y retardos variantes con el tiempo, efectos que pueden degradar significativamente el desempeño del sistema de comunicación; por lo tanto, requiere un análisis detallado (Biglieri *et al.*, 1998).

Si un canal varía lentamente, esto es, se tiene una velocidad lenta de movimiento entre el transmisor y el receptor con respecto a la duración del símbolo, entonces este puede ser modelado por medio de (7), donde R y ϕ son variables aleatorias distribuidas con parámetros constantes en el intervalo $[kT_s, (k+1)T_s]$ (Goldsmith, 2005).

$$r_k(t) = R_k(t + \phi) + n(t) \quad (7)$$

En el caso particular del modelo con desvanecimiento plano y lento, $n(t)$ es un señal AWGN limitada en banda, la variable aleatoria ϕ está distribuida uniformemente en el intervalo $[-\pi, \pi]$ y R es una variable aleatoria tipo Rice o Rayleigh. En el caso de una variable tipo Rice, significa que el canal modela el fenómeno de múltiples trayectorias, donde una tiene componente dominante. En caso de una variable aleatoria Rayleigh, el canal modela el fenómeno donde no existe componente dominante de las múltiples vías (Gibson, 2002).

Si se asume que el desvanecimiento es lo suficientemente lento con respecto al tiempo de convergencia del sistema de sincronismo del receptor, entonces la recepción coherente permitirá simplificar (7) a (8).

$$r_k(t) = R_k(t) + n(t) \quad (8)$$

En la ecuación (8) se evidencia que el modelo de un canal con desvanecimiento plano y lento considera una atenuación aleatoria igualmente distribuida en un período de un símbolo. Para un mayor detalle del canal variante en tiempo plano y lento se puede consultar a Sklar (1997).

1.5 Probabilidad de error teórica de la modulación M-ary QAM

Con el fin de determinar si los resultados obtenidos son correctos, es necesario especificar las medidas de desempeño teóricas existentes para la modulación M-ary QAM bajo el tipo de constelación escogido. Una cota superior para la probabilidad de error de la modulación M-ary QAM bajo un canal AWGN limitado en banda está determinada por la ecuación (9), donde E_0 es la energía de la señal con menor amplitud, que a partir de los conceptos geométricos de la constelación corresponde a $E_0 = (d_{\min}^2 / 2)$ (Haykin, 2002).

$$P_{e,M-QAM} \approx 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_0}{N_0}} \right) \quad (9)$$

Considerando todos los símbolos equiprobables, la probabilidad de error por bit con la modulación M-ary QAM para un canal AWGN limitado en banda queda determinada por (10), siendo E_{av} la energía promedio de la constelación definida por medio de (11) (Goldsmith, 2005).

$$P_{b,M-QAM} = 1 - \left(1 - \frac{2(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} Q \left(\sqrt{\frac{E_{av}}{N_0} \frac{3 \log_2 M}{M-1}} \right) \right)^2 \quad (10)$$

$$E_{av} = 2 \left[\frac{2E_0}{\sqrt{M}} \sum_{i=1}^{\sqrt{M}/2} (2i-1)^2 \right] \quad (11)$$

El cálculo teórico de la probabilidad de error en un canal con desvanecimiento lento y plano tipo Rayleigh es mucho más elaborado y no se tienen respuestas generales. En ese caso, la probabilidad de error en BPSK (*Binary Phase Shift Key*) o 2-QAM está determinada por (12) y en 4-QAM por medio de (13) (Chen, 2008).

$$P_{e,2-QAM} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{E[R^2]E_b / N_0}{1 + E[R^2]E_b / N_0} \right)^{1/2} \right) \quad (12)$$

$$P_{e,4-QAM} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{E[R^2]\gamma_s}{2 + E[R^2]\gamma_s} \right)^{1/2} \right) \quad (13)$$

De acuerdo con Tang *et al.* (1999), en el caso de 16-QAM, la probabilidad de error por bit para un canal con desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh se puede determinar por medio de (14).

$$P_{b,16-QAM}(E) = \sum_{i=1}^6 \omega_i \Gamma(a_i, b_i, \bar{\gamma}, \rho) \quad (14)$$

Donde las funciones relacionadas en (14) corresponden a las ecuaciones (15), (16) y (17), al igual que a los valores de la Tabla 1. Aquí se asume que el parámetro de correlación ρ , definido en Tang *et al.*, 1999), toma el valor de 0,9999 para obtener una buena estimación del desvanecimiento en la recepción.

$$\Upsilon(a, b, \bar{\gamma}, \rho) = \frac{1-\rho}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\sin 2\theta J(\sqrt{\rho} \sin 2\theta \sin \phi + 1, \sqrt{(1-\rho)\bar{\gamma}}(a \cos \theta + b \sin \theta))}{(\sqrt{\rho} \sin 2\theta \sin \phi + 1)^2} d\phi d\theta \quad (15)$$

$$J(x, y) = \frac{1}{2} - \frac{3x}{4\sqrt{2x+y^2}} + \frac{b^3}{4(2x+y^2)^{3/2}} \quad (16)$$

$$\bar{\gamma} = E[R^2]E_b / N_0 \quad (17)$$

Tabla 1. Coeficientes en el cálculo del BER para 16-QAM

i		1	2	3	4	5	6
ω_i	$\frac{1}{4} \times$	1	1	1	-1	1	1
a_i	$\frac{1}{\sqrt{42}} \times$	3	1	3	3	-1	1
b_i	$\frac{1}{\sqrt{5}} \times$	0	0	-2	2	2	2

Fuente: Tang *et al.* (1999).

Para el caso de 64-QAM, la expresión que se evaluó tiene la forma de (14), al considerar 28 términos dentro de la sumatoria (Tabla 2).

Tabla 2. Coeficientes en el cálculo del BER para 64-QAM

i		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ω_i	$\frac{1}{12} \times$	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1
a_i	$\frac{1}{\sqrt{42}} \times$	1	3	5	7	7	7	5	5	-3	3	-1	1	7	7
b_i	$\frac{1}{\sqrt{42}} \times$	0	0	0	0	-4	4	-4	4	4	4	4	4	-6	-2

Continúa

i		15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
ω_i	$\frac{1}{12} \times$	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1
a_i	$\frac{1}{\sqrt{42}} \times$	7	7	-5	5	5	5	-3	3	3	3	-1	-1	1	-1
b_i	$\frac{1}{\sqrt{42}} \times$	2	6	6	-2	2	6	3	1	5	9	1	5	3	7

Fuente: Tang *et al.* (1999).

Debido a la complejidad de la evaluación de la ecuación (14), en Goldsmith (2005) se propone una cota superior enunciada en (18).

$$P_{b,M-QAM} \approx \frac{\alpha_M}{2\beta_M \gamma_b} \quad (18)$$

Donde α_M representa el número de vecinos más cercanos con mínima distancia, y β_M una constante que relaciona la mínima distancia con la energía promedio por símbolo. Goldsmith (2005) aproxima dichas expresiones por medio de (19) y (20).

$$\alpha_M \approx \frac{4(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M} \log_2 M} \quad (19)$$

$$\beta_M \approx \frac{3 \log_2 M}{M-1} \quad (20)$$

2. Modelo propuesto para el sistema M-ary QAM

A continuación se presenta el modelo propuesto para analizar la modulación M-ary QAM bajo las condiciones de un canal AWGN limitado en banda y un canal con desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh, por medio de la técnica de la envolvente compleja.

2.1 Modelo teórico propuesto por medio de la envolvente compleja

A partir de la representación de la señal M-ary QAM expresada en (4) y la definición de la envolvente compleja presentada en (2), se demuestra en Torres (2007) que su envolvente compleja está determinada por (21).

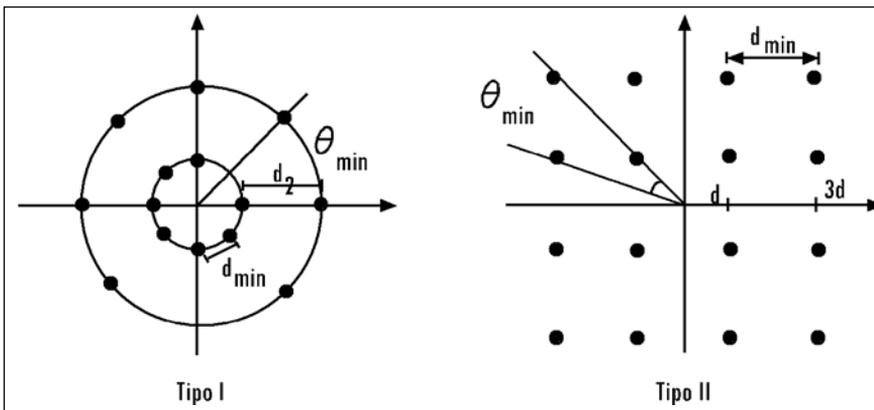
$$\hat{s}_k(t) = A_c d_k + j A_c q_k, \quad kT_s < t < (k+1)T_s \tag{21}$$

Aquí se tienen en cuenta las siguientes consideraciones de diseño para elegir el tipo de asignación de los valores d_k y q_k (Chen, 2008):

- Mínima distancia, denotada por d_{\min} (Figura 4), que determina la inmunidad al ruido del esquema de modulación.
- Mínima rotación de fase, denotada por θ_{\min} (Figura 4), lo cual determina la inmunidad a la dispersión por Jitter, en errores de recuperación de reloj y rotación de fase del canal.
- La potencia promedio pico a pico r , una medida de la robustez contra distorsiones no lineales introducidas por los amplificadores de gran señal o HPA (*High Power Amplifier*).

Para los tipos de constelaciones usuales en la modulación M-ary QAM, en la Figura 4 se presentan su representación geométrica, la mínima distancia y la mínima rotación de fase, que son críticas para el desempeño del sistema.

Figura 4. Formas de constelación 16-QAM



Fuente: presentación propia de los autores.

En la Tabla 3 se comparan los datos de la mínima distancia, la mínima rotación de fase y la potencia promedio pico para la constelación ilustrada en la Figura 4. La constelación Tipo I tiene una mayor inmunidad a la distorsión por *Jitter* con respecto a la constelación Tipo II, pero esta última es más robusta al desvanecimiento, más eficiente espectralmente y tiene mayor eficiencia de potencia y mejor desempeño en términos de probabilidad de error para canales AWGN (Chen, 2008). Por lo anterior, y teniendo en cuenta el tipo de canal que se va a modelar, se implementó la constelación Tipo II, conocida como *constelación rectangular*.

Tabla 3. Elementos que se van a considerar en una constelación tipo I y II con M-ary QAM

Tipo	d_{\min}	θ_{\min}	r
I	45°	$0,53 \sqrt{E_s}$	1,5
II	$<45^\circ$	$0,63 \sqrt{E_s}$	1,8

Fuente: Hanzo *et al.* (2000).

El sistema de demodulación implementado es el demodulador óptimo basado en el concepto del correlador en su representación de la envolvente compleja. El detector implementado está basado en el criterio de ML (máxima verosimilitud). Si se asume que la convergencia del sistema de sincronismo del receptor permite una operación coherente ideal, entonces el ruido limitado en banda definido en (6) tendrá una representación por medio de la envolvente compleja por medio de (22).

$$\hat{n}(t) = n_d(t) + jn_q(t) \quad (22)$$

El canal AWGN, con un ruido limitado en banda enunciado en (6) y con desvanecimientos plano y recto tipo Rayleigh enunciado en (8), tendrá una representación por medio de la envolvente compleja por medio de (23) y (24), respectivamente.

$$\hat{r}_k(t) = A_c d_k + n_d(t) + jA_c q_k + jn_q(t), \quad kT_s < t < (k+1)T_s \quad (23)$$

$$\hat{r}_k(t) = RA_c d_k + n_d(t) + jRA_c q_k + jn_q(t), \quad kT_s < t < (k+1)T_s \quad (24)$$

Como el sistema cambia un símbolo cada T_s segundos, entonces el ancho de banda al primer nulo de la envolvente compleja asociada con la señal M-ary QAM se representa mediante la ecuación (25). La definición de este ancho de banda desempeña un papel importante en el proceso de simulación, ya que definirá la cantidad mínima de muestras por cada símbolo.

$$BW = \frac{1}{T_s} \quad (25)$$

La potencia del ruido limitado en banda en su representación de la envolvente compleja está determinada por (26), siendo BW el ancho de banda de la señal que se va a transmitir.

$$P_{\bar{n}} = 2N_0 BW = \sigma^2 \quad (26)$$

2.2 Modelo de la simulación propuesto por medio de la envolvente compleja

Para realizar el análisis del sistema M-ary QAM propuesto se utilizó un muestreo sobre la señal en la representación de la envolvente compleja en el intervalo de tiempo $[kT_s, (k+1)T_s]$. La cantidad de muestras escogidas en un período de un símbolo fue de seis, que garantiza el cumplimiento del criterio de Nyquist.

A fin de generar cada una de las señales que representan el ruido limitado en banda se utilizaron dos variables aleatorias gaussianas idénticamente distribuidas e independientes, con media cero y varianza σ^2 obtenidas a partir de una potencia: densidad espectral de ruido N_0 y ancho de banda. En la implementación del integrador en el demodulador basado en el correlator se utilizó la definición de la integral por medio de sumas de Reiman enunciada en (27), con $\Delta T = T_s/M$.

$$\int_{kT_s}^{kT_s+T_s} f(t) dt \approx \Delta T \sum_{i=0}^{M-1} f(kT_s + \Delta T \cdot i) \quad (27)$$

Para el detector se implementó el criterio ML y como fuente se utilizó una secuencia pseudoaleatoria equiprobable con una asignación Gray (Tang *et al.*, 1999) de los símbolos en la constelación. Para estimar las curvas de desempeño de la probabilidad de error de un bit se utilizó la simulación de Monte Carlo, en la cual de N símbolos enviados se cuentan los N_e símbolos recibidos errados. El cálculo de dicha probabilidad de error se obtuvo por medio de (28).

$$\hat{P}_B = \frac{N_e}{N} \quad (28)$$

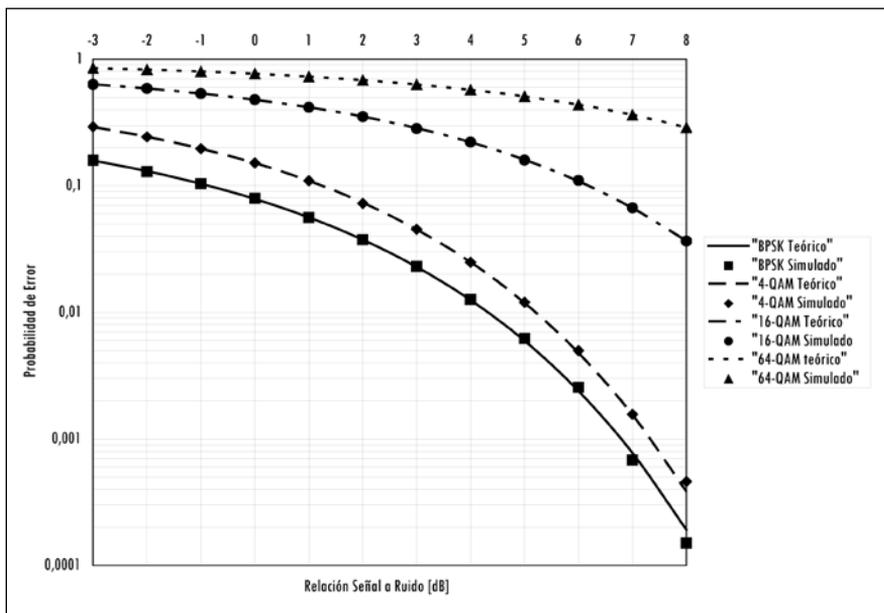
El estimador de la probabilidad de error definida en (28) depende del número de muestras generadas. Por ello se trata de una variable aleatoria que debe analizarse estadísticamente. Para generar las curvas de desempeño por medio de la simulación, se generó una secuencia equiprobable conformada por diez mil símbolos. El estimador de la probabilidad de error bajo estas condiciones presentó un intervalo de confianza mejor al 95%.

3. Resultados

3.1 Verificación del modelo

En la Figura 5 se ilustra el desempeño de la modulación BPSK (2-QAM), 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM en un canal AWGN limitado en banda. Allí se presentan los resultados teóricos de dicha probabilidad de error, comparados con los resultados encontrados a través del modelo de simulación planteado.

Figura 5. Curva de probabilidad de error de las modulaciones M-QAM en un canal AWGN limitado en banda

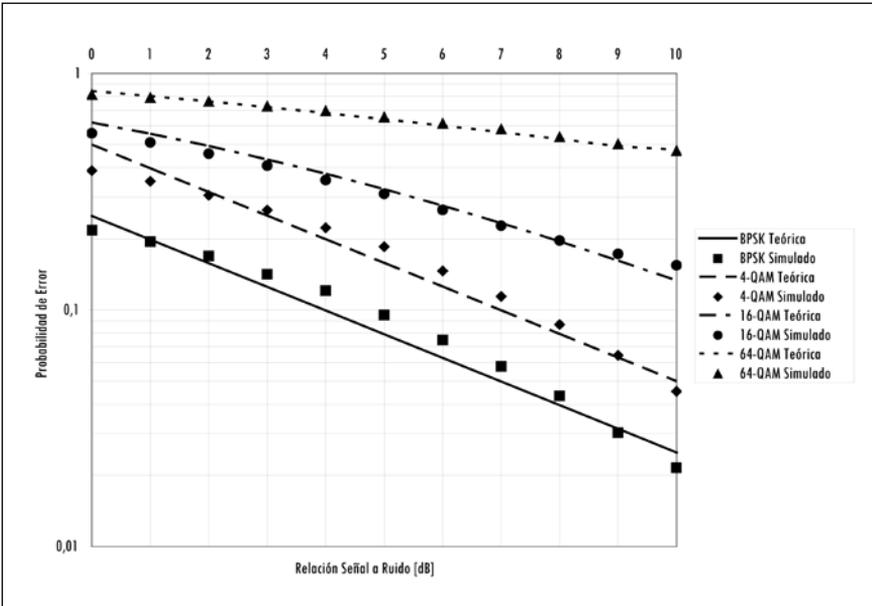


Fuente: presentación propia de los autores.

La cantidad de símbolos utilizados en la simulación no permite encontrar valores adecuados en un canal AWGN para $SNR > 8 \text{ dB}$, debido a que se encuentra el fenómeno de eventos raros. Este fenómeno se presenta en la simulación de Monte Carlo cuando en (28), el espacio de muestra N no es representativo para encontrar los eventos de análisis N_e . En la simulación realizada sería posible incrementar la ventana de análisis de SNR para el caso AWGN a costa de incrementar el tiempo de la simulación de manera exponencial.

En la Figura 6 se ilustra el desempeño de la modulación B-PSK (2-QAM), 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM en un canal con desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh. En esta figura se ilustran simultáneamente los resultados teóricos de dichos canales para efectos comparativos considerando un $E(R^2)=1$.

Figura 6. Curva de probabilidad de error de las modulaciones M-QAM en un canal con desvanecimiento plano y lento tipo Rayleigh

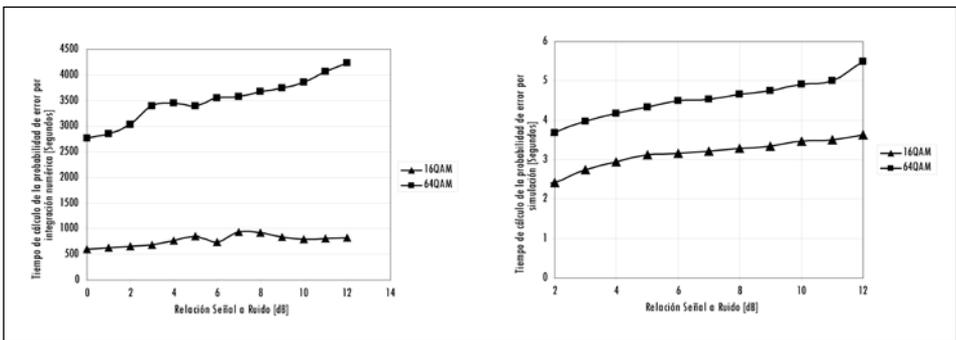


Fuente: presentación propia de los autores.

La comparación de los resultados obtenidos entre el canal AWGN y el canal con desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh permite concluir que el primero tiene una dependencia exponencial de argumentos polinomiales, y el segundo, una dependencia exponencial con argumentos lineales en el intervalo analizado.

El cálculo teórico del desempeño de las modulaciones 16-QAM y 64-QAM ante un canal con desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh se realizó mediante la integración numérica de (14), con exigentes requerimientos de recursos de computación, respecto de los necesarios para la simulación. En la Figura 7 se aprecia el tiempo requerido para estimar la probabilidad de error en los casos críticos 16-QAM y 64-QAM, para un $E(R^2)=1$.

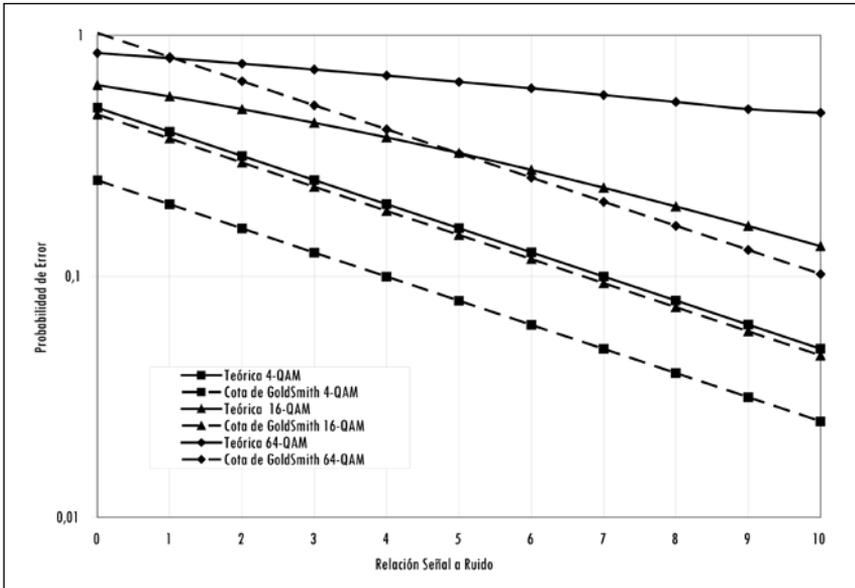
Figura 7. Curva del tiempo de cálculo de la probabilidad de error por medio de integración numérica y simulación, utilizando un computador Pentium IV con 512 MB en RAM



Fuente: presentación propia de los autores.

En la Figura 8 se ilustran simultáneamente los cálculos de la probabilidad de error utilizando la cota enunciada en la ecuación (18) frente a los datos obtenidos por medio del cálculo numérico de la expresión (14) para un $E(R^2)=1$. El análisis comparativo evidencia que la ecuación (18) es una cota demasiado optimista; por ende, no es conveniente para los casos particulares 16-QAM y 64-QAM.

Figura 8. Curva de probabilidad de error de 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM enunciada en (14) comparada con la cota superior planteada por Goldsmith en (18), para $E(R^2)=1$

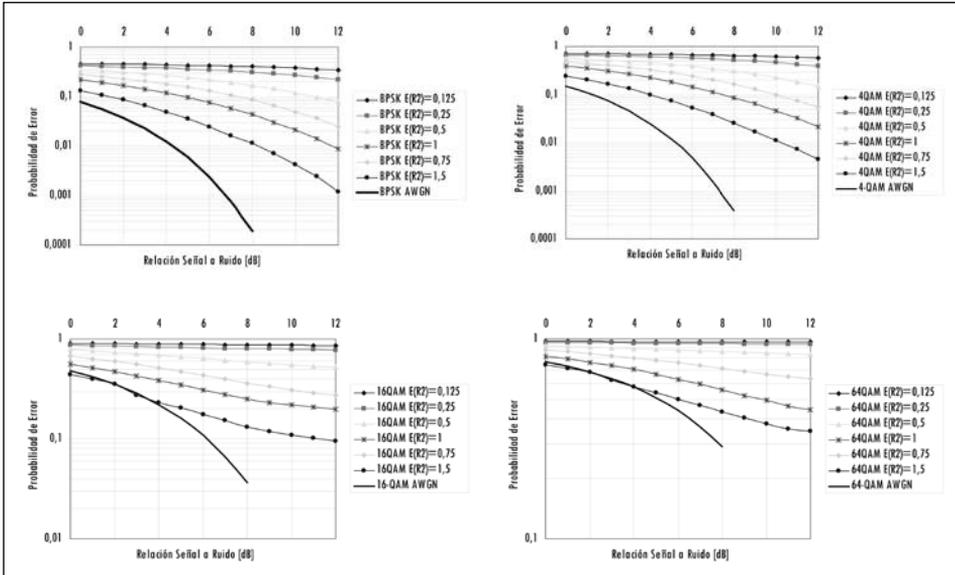


Fuente: presentación propia de los autores.

3.2 Curvas de desempeño

En la Figura 9 se ilustra la probabilidad de error estimada para un canal con desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh al variar el parámetro $E(R^2)$ para los casos BPSK (2-QAM), 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM. En la Figura 9 se muestra la curva de desempeño de la modulación M-ary QAM con un canal AWGN limitado en banda para efectos comparativos.

Figura 9. Probabilidad de error de 16-QAM y 64-QAM para diferentes valores de $E(R^2)$



Fuente: presentación propia de los autores.

Con el fin de determinar las condiciones de potencia adicionales requeridas en un canal con desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh que produzca el mismo desempeño de un canal AWGN con ruido limitado en banda, en la Figura 9(a) se muestra la distancia E . Así mismo, con el propósito de establecer la degradación del sistema de comunicaciones si en este se mantiene constante la relación señal a ruido, en la Figura 9(a) se muestra la distancia D . Con dichas medidas es posible comparar ambos sistemas y determinar la influencia o degradación en el sistema de comunicaciones en cálculos de diseño ante la escogencia específica de alguno de los dos canales.

Debido a que la cota establecida en (Goldsmith, 2005) para el desempeño de un sistema de modulación M -ary QAM de alto orden es demasiado optimista y a que la evaluación de la ecuación (14) para un grado de confiabilidad aceptable tiene velocidad de convergencia lenta, se plantean —gracias a los resultados obtenidos en la simulación— dos nuevas aproximaciones para la probabilidad de error, basadas en una aproximación logarítmica que usa el error cuadrático medio y que para el caso particular de 16-QAM arroja el resultado (29) y para el caso de 64-QAM el resultado (30), con la relación señal a ruido

$\bar{\gamma}$ planteada en la ecuación (17) en escala lineal y los intervalos $1 \leq \bar{\gamma} \leq 15,84$ y $0,125 \leq E(R^2) \leq 1,5$.

$$P_{e,16-QAM} \approx (-0,366 \cdot E(R^2) + 0,957) \bar{\gamma}^{(-0,436 \cdot E(R^2) + 0,042)} \quad (29)$$

$$P_{e,64-QAM} \approx (-0,156 \cdot E(R^2) + 1) \bar{\gamma}^{(-0,238 \cdot E(R^2) + 0,047)} \quad (30)$$

Las expresiones (29) y (30) permiten estimar de forma simplificada la probabilidad de error de estas modulaciones, bajo la consideración de un canal con desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh con un error mejor a +/- 10%.

4. Conclusiones

En este artículo se presentó la metodología de análisis, la implementación del modelo de simulación y el cálculo de las curvas de desempeño de la modulación M-ary QAM en un canal AWGN limitado en banda y en un canal con desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh, por medio de la teoría de la envolvente compleja.

Se comparó la cota planteada por Goldsmith (2005) y se encontró que es demasiado optimista para el sistema analizado. El modelo computacional para calcular el resultado de la probabilidad de error ante las condiciones variantes del canal resulta costoso, en cuanto al tiempo de computación, y por ello se concluye que el modelo por medio de la simulación es atractivo para analizar el desempeño del sistema. Con los resultados encontrados se planteó una nueva cota para la probabilidad de error de la modulación M-ary QAM ante las condiciones del canal propuesto.

Las curvas de la probabilidad de error encontradas para el caso del canal con desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh muestran un aumento considerable en la probabilidad de error en comparación de un canal AWGN limitado en banda. Ya que el canal con desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh es variante en el tiempo, lo cual es usual en aplicaciones inalámbricas fijas en las que no existe línea de vista entre el transmisor y el receptor, la metodología planteada es valiosa para encontrar las medidas de desempeño de un sistema que tiene una compleja descripción analítica. Este es el caso de diversas aplicaciones de comunicaciones inalámbricas modernas, como el estándar 802.16TM-2004-OFDM, también conocido como WiMAX fijo, cuyo esquema de modulación adaptable se basa en la modulación M-ary QAM.

En un canal de características variantes en el tiempo, como el analizado, la medida de desempeño de la probabilidad de error no puede ser mejorada siguiendo la estrategia tradicional de incremento de la energía por símbolo en el transmisor, ya que las curvas de desempeño encontradas muestran una mejora ínfima comparada con la de dicha medida de desempeño ante un canal AWGN limitado en banda. Este resultado implica que se deben buscar estrategias alternativas para incrementar la potencia si se desea tener un mejor trabajo por parte del sistema de comunicaciones.

La técnica de análisis por medio de la envolvente compleja presenta una ventaja frente a la simulación directa de los fenómenos de banda pasante, ya que disminuye la cantidad de muestras requeridas a cambio de una mayor complejidad analítica y de implementación; requiere un análisis e implementación de diversos modelos en variable compleja.

5. Prospectiva

La literatura indica que las modulaciones M-ary QAM son esquemas eficientes espectralmente, característica que se puede explotar en canales con una alta variabilidad de la relación señal a ruido para adaptar el esquema de modulación de forma dinámica y aumentar su eficiencia de esa manera. Esta característica será explorada para analizar un esquema de modulación adaptable y reconfigurable ante la presencia de un canal con desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh, que permita enviar información de fuentes de tráfico disímiles, como lo son las fuentes de voz y datos, sin perder eficiencia y eficacia en la transmisión (Torres, 2007).

6. Nomenclaturas y símbolos

$x(t)$: Señal original de banda angosta.

$x_H(t)$: Transformada de Hilbert de la señal original de banda angosta.

$x_a(t)$: Preenvolvente compleja de la señal original de banda angosta.

$\tilde{x}(t)$: Envolvente compleja de la señal original de banda angosta.

$\text{Re}\{\cdot\}$ Parte real.

$s_k(t)$: Señal analógica asociada al símbolo k-ésimo en el transmisor.

$\hat{s}_k(t)$: Envolvente compleja asociada al símbolo k-ésimo en el transmisor.

$\cos(\cdot)$: Función trigonométrica coseno.

$\sin(\cdot)$: Función trigonométrica seno.

$\mathbf{r}_k = [r_{k1}, r_{k2}, \dots, r_{kL}]$: Vector analógico de dimensión L .

$r_k(t)$: Señal analógica asociada al símbolo k -ésimo en el receptor.

$\hat{r}_k(t)$: Envoltente compleja asociada al símbolo k -ésimo en el receptor.

$n(t)$: Señal analógica que representa un ruido blanco gaussiano.

$\hat{n}(t)$: Envoltente compleja que representa un ruido blanco gaussiano.

M-ary QAM: Modulación de amplitud en cuadratura de M símbolos por constelación.

$P_{b,M}$ -QAM: Probabilidad de error por bit en una modulación M-ary QAM.

$P_{e,M}$ -QAM: Probabilidad de error en una modulación M-ary QAM.

E_{av} : Energía promedio asociada a la modulación M-ary QAM.

$E(R^2)$: Segundo momento de la variable aleatoria R .

Referencias

- BENEDETTO, S. and BIGLIERI, E. *Principles of Digital Transmission. With Wireless Applications*. New York: Kluwer Academic, 1999.
- BIGLIERI, E.; PROAKIS, J., and SHAMANI, S. Fading Channels. Information-Theoretic and Communications Aspects. *IEEE Trans. on Information Theory*. 1998, vol. 44, núm. 6, pp. 2619-2692.
- CHEN, S. *ELEC6014 (EZ412/612) Radio Communications Networks and Systems Lectures*. Southampton: School of Electronics and Computer Science University of Southampton, 2008.
- GIBSON, D. J. *The Communications Handbook*. 2 ed. Boca Ratón: CRC Press, 2002.
- GOLDSMITH, A. *Wireless Communications*. New York: Cambridge University Press, 2005.
- HANZO, L.; WEBB, W., and KELLER, T. *Single and Multi-Carrier Quadrature Amplitude Modulation. Principles and Applications for Personal Communications, WLANs and Broadcasting*. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- HAYKIN, S. *Communications Systems*. 4 ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- PROAKIS, J. *Digital Communications*. New York: McGraw Hill, 2004.
- SHANMUGAN K. S. Simulation and Implementation Tools for Signal Processing and Communication Systems. *IEEE Communications Magazine*. 1994, vol. 32, núm. 7, pp. 36-40.
- SKLAR, B. Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems I. Characterization. *IEEE Communications Magazine*. 1997, vol. 35, núm. 9, pp. 90-100.
- TANG, X.; ALOUINI, M., and GOLDSMITH, A. Effect of Channel Estimation Error on M-QAM BER Performance in Rayleigh Fading. *IEEE Trans. on Communication*. 1999, vol. 47, núm. 12, pp. 1856-1864.
- TRANter, W.; SHANMUGAN, K. S.; RAPPAPORT, T., and KOSBAR, K. *Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications*. New York: Prentice Hall, 2004.
- TORRES, C. *Modulación adaptable para voz y datos en canales variantes con el tiempo*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2007.

- TRANTER, W. H. and KOSBAR, K. L. Simulation of Communication Systems. *IEEE Communications Magazine*. 1994, vol. 32, núm. 7, pp. 26-35.
- WOERNER, B.; REED, J. H., and RAPPAPORT, T. Simulation Issues for Future Wireless Modems. *IEEE Communications Magazine*. 1994, vol. 32, núm. 7, pp. 42-53.

Modelo de simulación para fabricar losa tradicional en la región sureste de México*

Simulation Model for the Production of Traditional Roof Slabs in Southeastern Mexico

Modelo de simulacro para a fabricação de louça tradicional na região sudeste do México

*Julio Rodrigo Baeza Pereyra***

* Fecha de recepción: 29 de agosto de 2007. Fecha de aceptación para publicación: 31 de marzo de 2008. Este artículo se deriva del proyecto de investigación denominado *Simulación estocástica de rendimientos de mano de obra en procesos de construcción*, financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), de México, con número de proyecto 33335U.

** Ingeniero civil, Universidad Autónoma de Yucatán, México. Máster en Ingeniería de Construcción, Universidad Autónoma de Yucatán. PhD en Ingeniería Civil, Worcester Polytechnic Institute, Estados Unidos. Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México. Correo electrónico: bpereyra@tunku.uady.mx

Resumen

En este artículo se expone el proceso para elaborar un modelo matemático de fabricación de losa tradicional, conocida también como vigueta y bovedilla, tal y como se usa en la región sureste de México. Este método es el más utilizado para construir viviendas, a escala masiva, en dicha región, por lo que el estudio de los procesos para su obtención resulta de gran importancia, a fin de poder compararlo con otros métodos constructivos. Se usó la técnica de muestreo de trabajo para identificar sus procesos y duraciones. De esta se obtuvo una tabla comparativa de las duraciones de los procesos, que se analizaron bajo diferentes distribuciones de probabilidad. Para cada operación en el método constructivo se eligió la distribución de probabilidades que más se apegara a los resultados observados. Finalmente, se elaboró un esquema gráfico de operaciones, que se simuló en EzStrobe®. Se concluyó que la gran cantidad de actividades hacen difícil la representación de dicho método constructivo, pero se puede realizar un modelo en hormigón para simularlo.

Palabras clave

Vigas de celosía, losas, simulación por computadores, materiales de construcción.

Abstract

This article presents the process for making a mathematical model for the production of traditional roof slabs, as used in southeastern Mexico. This type of slab is the one most frequently used in large-scale affordable housing construction in this region; thus, the study of the process involved in its production is of great interest and importance, in case it should be compared with other types of construction methods. The job sampling technique was used to identify the stages of the process and their durations. A comparative table of durations was obtained and an analysis of factors under different probability distributions was performed. For each operation in the production process, the probability distribution most adequate for the population was chosen. Finally, a graphical model of operations was made using EzStrobe®. It was concluded that the large number of activities involved in this method makes its representation difficult. However, a representation of the process can be formulated for simulation purposes.

Key words

Trusses, slabs, computer simulation, building materials.

Resumo

Expõe-se o processo para a elaboração de um modelo matemático da fabricação de louça tradicional, conhecida também como de vigote e abobadilha, assim como se usa na região sudeste do México. Este método é o mais utilizado para a elaboração de vivendas em escala massiva na região, pelo qual o estudo dos processos para sua obtenção resulta de grande importância para poder compará-lo com outros métodos constructivos. Foi usada a técnica de amostra de trabalho para identificar os processos e as durações dos mesmos. Obteve-se uma tabela comparativa das durações e dos processos e foram analisados baixo diferentes distribuições de probabilidade. Para cada operação no método construtivo foi eleita uma distribuição de probabilidades que mais se aderisse aos resultados observados. Finalmente elaborou-se um esquema gráfico de operações simuladas com EzStrobe®. Concluiu-se que a grande quantidade de atividades são difícil para a representação deste método construtivo, mas não obstante, é possível realizar um modelo de concreto armado para sua simulação.

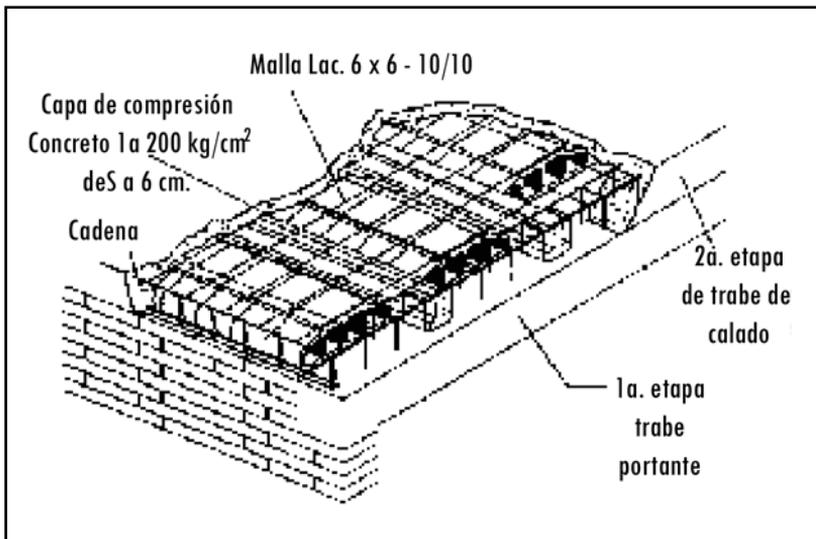
Palavras chaves

Método de vigote e abobadilha, amostra de trabalho, simulação computadorizada.

Introducción

El sistema de construcción de losa tradicional a base de viguetas y bovedillas prefabricadas de hormigón (Figura 1) es el más usado en la construcción de losa, desde 1978, en la península de Yucatán. Este sistema ha mostrado una gran versatilidad de construcción y grandes ahorros de tiempo para los constructores, en comparación con el sistema de losa armada que se tenía. Sin duda, este sistema de losa a base de piezas prefabricadas de hormigón abatió los costos que se tenían por los tiempos de fabricación principalmente, pago por mano de obra e insumos, como madera para cimbras, apuntalamiento, acero de refuerzo, cemento, etc.

Figura 1. Sistema de vigueta y bovedilla



Fuente: Sosa Canto (2005).

Sin embargo, a medida que se le ha venido empleando, principalmente en los proyectos de vivienda, se han observado algunos problemas (Tun, 1996):

- El esfuerzo físico intensivo de la fuerza laboral, lo cual se transforma en altos costos de mano de obra, así como de heridas y accidentes.
- El decremento de productividad y calidad en la fabricación del producto final.
- Algunas fallas de colapso, fisuras, humedad, entre otras, por un mal proceso constructivo.
- Los tiempos de espera y los costos por desperdicios, que llegan a ser muy altos en la fabricación de vivienda masiva.
- Algunas dificultades en el control de calidad de los materiales y resistencias de diseño, debido a la poca supervisión en los procesos de fabricación del hormigón.
- Algunos problemas de logística para el suministro, colocación o almacenaje de las piezas.

No obstante lo anterior, los fabricantes de vivienda masiva requieren una metodología concreta, a fin de comparar los beneficios y las desventajas de dicho sistema con otras opciones de techumbre. Por ello se han hecho modelos para colocar otros tipos de techumbres prefabricada, tal como la del sistema L-18 (Sosa *et al.*, 2007), pero se carece de medios para poder compararlos con los del método tradicional, debido a que no se precisan todas las tareas que involucra dicho método y porque no se han medido los tiempos de realización de dichas tareas. Además, no existe una secuencia fija para cada actividad.

Este trabajo se concentra en la creación de un modelo para simular techumbres de viguetas y bovedilla, con los siguientes fines:

- Identificar las tareas que dicho proceso necesita para su ejecución.
- Determinar las duraciones promedio de cada actividad.
- Establecer el tipo de distribución estadística más apropiada para cada tarea.
- Elaborar una secuencia cíclica para el modelo.

1. Metodología

En este trabajo se observó directamente el proceso de fabricación de la losa tradicional en campo. Las observaciones tuvieron lugar en un proyecto de construcción de cien viviendas. Las características del proyecto no se presentan en este trabajo, debido a que son parte del acervo de la empresa constructora, pero para cualquier duda al respecto se puede consultar a dicha empresa (Grupo Promotora Residencial). Sin embargo, se tuvo acceso al complejo habitacional para la toma de los datos.

Para lograr hacer el seguimiento del proceso hubo visitas continuas al proyecto de construcción durante semana y media. En ese lapso se grabaron videos y se anotaron datos y observaciones sobre dicho trabajo. Pasado ese tiempo, se identificó una lista de las actividades observadas, duraciones y recursos utilizados.

A continuación se grabaron videos durante las visitas a la obra y se apuntaron en las cédulas diseñadas los tiempos de inicio y terminación de las actividades observadas (Figura 2). Posteriormente, tales tiempos se restaban para obtener un tiempo total en términos de las unidades de media establecidas (Sosa Canto, 2005).

En resumen, la secuencia en general para realizar el muestreo para el método fue la siguiente:

- Observación del proceso, con el fin de determinar las operaciones según las actividades realizadas en el sistema de losa.
- Elaboración de una cédula de registro de datos, acorde con la variable de estudio, que se genere en cada una de las actividades observables en el funcionamiento operacional dentro del sistema tradicional en obra (Figura 2).
- Recopilación y anotación, en la cédula de registro (instrumento de captura), de datos primarios y secundarios y del papel de las actividades en cada proceso.

La unidad de análisis cualitativa para este estudio fue la losa de cubierta para conjuntos habitacionales de interés social; en términos cuantitativos, el metro cuadrado, en el proceso constructivo de la losa en comparación. Las muestras fueron no probabilísticas, porque no hubo un proceso de selección formal y arbitrario de muestras dentro de una población (como en el laboratorio), pero a partir de los datos obtenidos del muestreo se pudieron hacer inferencias sobre la población. Para la medición y la evaluación técnica del proceso constructivo del método se siguió el siguiente procedimiento:

1. A partir de los datos obtenidos de cada actividad involucrada en el proceso constructivo, se determinaron las curvas de distribución estadística que más se ajustaran a la población de duraciones.
2. Se elaboró el modelo de operación del proceso constructivo, que fue la base para crear el modelo de simulación.
3. Se creó el modelo que se iba a simular en función de las características del proyecto de vivienda en la obra.
4. Se elaboró el modelo de simulación utilizando el programa EzStrobe©.
5. Se realizó una prueba piloto de investigación, corriendo el modelo, y se verificaron los resultados con la realidad.

Figura 2. Cédula de registro y análisis de datos por actividad para variable tiempo

Cédula de registro de tiempos

Actividad: _____

Unidad de medida: _____

Método _____

Recursos utilizados: _____

Equipo y/o herramienta: _____

Materiales: _____

Otros: _____

Ciclo	Ubicación	Inicio		Fin		Total	T
		Hr	Min	Hr	Min		
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							

Datos estadísticos

Sum

max

min

Media

D.E.

Var

Rango

Interv

Categorías

Ran/café

Ancho interv

Continúa

Ciclo	Ubicación	Inicio			Fin			Total min	T Min/unid
		Hr	Min	Seg	Hr	Min	Seg		
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									

Datos histograma				
Intervalo	LI	LS	Mk	Histograma
1	0.00	0.00	0	0
2	0.00	0.00	0	0
3	0.00	0.00	0	0
4	0.00	0.00	0	0
5	0.00	0.00	0	0
6	0.00	0.00	0	0
7	0.00	0.00	0	0
	0.00	0.00	0	0

Datos actividad	m ² de losa observados =	m ² aprox
	Vol. concreto l m ² de losa:	M ³ aprox
	Rendimiento:	0.00 min/m ²
	Simbología:	Col = colado, # = colado observado, Ly = losa vigueta y bovesilla, m ² de la losa

Fuente: Sosa Canto (2005).

El primer paso del procedimiento metodológico consistió en agrupar todos los datos obtenidos para las diferentes actividades mencionadas y determinar para cada una de ellas su comportamiento estadístico de probabilidad o curvas de distribución de la siguiente manera:

- Se capturaron de manera ordenada y agrupada todos los datos obtenidos en el formato de la cédula de registro.
- Se verificó el comportamiento real de la población de las actividades para los datos que se tenían, utilizando el paquete estadístico SPSS© v. 10, que permitió visualizar especialmente la dispersión de los datos de las distribuciones.
- Se determinaron los siguientes parámetros estadísticos de los datos: valor máximo, mínimo, media, desviación estándar, rango, un intervalo de categorías y un ancho de intervalo o marca de clase.
- Con los datos anteriores, se graficó el histograma del comportamiento de los datos, cuyo fin era tener una idea de la curva de distribución del comportamiento de la población de cada actividad en particular (Law y Kelton, 2000).
- Se conceptualizaron las distribuciones para las actividades del sistema de losa tradicional.
- Se analizó la dispersión de los datos por actividad, evaluando el área bajo la curva del histograma obtenido con los datos. Esta fue comparada con cada una de las áreas de las curvas totales de distribución obtenidas con SPSS©. De dicha comparación se obtuvieron diferencias de medias y desviaciones estándar para cada actividad y se eligió la distribución correspondiente, atendiendo a la menor diferencia en valor absoluto entre los arrojados por cada distribución teórica y los histogramas de datos.
- El modelo de operación del proceso constructivo y la creación del modelo que se iba a simular consistieron en elaborar los modelos gráficos de operación para cada proceso identificado en la fabricación de la losa tradicional, lo cual al final forma el modelo completo para simular el sistema constructivo total (Kamat y Martínez, 2005).

La Tabla 1 muestra los elementos que componen la lógica del proceso o actividad estudiada. Cada elemento representa el estado en el cual se encuentran los insumos y las tareas por realizar (Martínez, 2001). Siguiendo la representación mencionada, se codificó el modelo operativo en lenguaje de computadora, y con este se simuló el modelo completo de todo el proceso constructivo para este sistema de losa. En esta etapa se utilizaron los parámetros estadísticos obtenidos

de las curvas de distribución poblacional para el proceso constructivo, resultantes del análisis de los datos registrados para cada una de las actividades involucradas dentro del sistema constructivo de la losa tradicional.

Tabla 1. Descripción de elementos básicos para crear modelos de simulación

Símbolo del elemento	Nombre de la actividad	Descripción
	Actividad normal	Se utiliza para modelar una tarea de trabajo, que no tiene una dependencia de comienzo lógico y representa una actividad que procesa recursos.
	Actividad combinada	Se utiliza para modelar una o más tareas de trabajo, que sí tienen una dependencia de comienzo lógico y representa a una o más actividades que procesan recursos.
	Nodo Q o cola de espera	Representa las cantidades producidas resultado del proceso de una actividad normal o combinada, por el uso de cantidades parciales del recurso definido.
	Flecha de precedencia	Indica la dirección en la que fluye la simulación.

Fuente: presentación propia del autor.

El lenguaje de computadora empleado para la simulación —y con el cual se transcribieron los modelos operativos— fue EzStrobe© v. 10. Posteriormente, se muestran los resultados correspondientes al análisis estadístico de los datos, donde se verifica la equivalencia de los resultados obtenidos del análisis de los datos de campo con las distribuciones de probabilidad obtenidas con SPSS©, contra los obtenidos con el simulador y las distribuciones de probabilidad equivalentes al simulador (Leach *et al.*, 2007). Según lo observado en el campo:

- Se considera que el total de cuadrillas de dos personas por casa no llevaría el mismo ritmo de producción hasta la etapa de la colocación del hormigón, por tres factores: la pericia del trabajador, el suministro de materiales y la agrupación de las cuadrillas al momento de colocar el hormigón; por lo que se consideran cinco viviendas listas para el hormigón por día.
- El jornal considerado fue de 9 horas efectivas, en promedio. La cantidad de equipo, tanto humano como mecánico, está descrita dentro de las características de los proyectos observados.

- La cantidad de obreros disponibles durante cada ejecución de simulación se reduce en un 13%, debido al ausentismo.
- Se consideran dentro del modelo de simulación de la losa tradicional tres posibles demoras en el proceso de fabricación: la falta de materia prima, el ausentismo y la falla de la mezcladora de hormigón.
- Los modelos simulan el tiempo que se tardaría en fabricar una cantidad de losas simultáneamente en función de los recursos humanos y equipos disponibles a partir de la etapa de nivelación sobre los muros de una vivienda.

2. Resultados

2.1 Descripción de las actividades realizadas

En la observación del proceso constructivo de este sistema de losa se registraron 40 actividades, agrupadas en 5 partidas, con el fin de facilitar el análisis de los datos utilizados en el proceso de simulación (Tabla 2). A continuación se presentan la lista general de actividades observadas y se explica brevemente el contenido de las partidas (Tabla 3).

Tabla 2. Partidas y actividades relacionadas

Acarreos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Acarreo de acero del almacén a la obra 2. Acarreo de polines y tablas por parte del contratista; el tiempo depende de la distancia recorrida
Preliminares 1: habilitado, cimbra y colocación de estructura de la losa	<ol style="list-style-type: none"> 3. Habilitado de los armados de las vigas de entrepiso que se colocarán integralmente con la losa; incluye corte, forjado de estribos y amarres 4. Cimbrado y apuntalamiento del fondo de las vigas de entrepiso 5. Habilitado del acero de las losas de hormigón, como volados, losa de baño, balcones, etc. 6. Cimbrado y apuntalamiento del paso 5
Preparación de la cubierta de la losa	<ol style="list-style-type: none"> 7. Acarreo de las viguetas junto a los muros 8. Marcado de la posición de viguetas sobre los muros, según croquis 9. Izado de viguetas y colocación de bovedillas guía en los extremos 10. Acarreo y colocación de bovedillas de hormigón 11. Apuntalamiento de viguetas 12. Colocación de tableado perimetral

Continúa

	<ol style="list-style-type: none"> 13. Despuntado de bovedillas laterales 14. Colocación de armado perimetral a base de armex 15. Colocación de bastones para refuerzo negativo en losas 16. Tendido de poliducto para instalación eléctrica
<p>Preliminares 2: actividades antes de colocar el hormigón</p>	<ol style="list-style-type: none"> 17. Supervisión del estado final de la losa, apuntalamientos, armados, instalación eléctrica, etc., y autorización 18. Acarreo de recursos en el lugar de la colocación del hormigón, revolvedora y cemento 19. Cortado a la mitad de sacos de cemento 20. Colocación de fibra de vidrio en cada mitad del saco 21. Llenado de tambores de agua o piletas con una manguera conectada a la bomba más cercana al pozo de extracción 22. Acarreo de la revolvedora cerca del lugar de la colocación del hormigón 23. El oficial a cargo de la colocación del hormigón reúne a los obreros para la colocación del hormigón 24. Organización del grupo de trabajo 25. Arranque de la revolvedora 26. Humedecimiento de la superficie para la colocación del hormigón con cubetas de agua o directamente con la manguera
<p>Colocación del hormigón de losa</p>	<ol style="list-style-type: none"> 27. Llenado de cubetas con agregado o agua 28. Acarreo de polvo, incluye idas y vueltas 29. Acarreo de grava, incluye idas y vueltas 30. Acarreo de agua, incluye idas y vueltas 31. Acarreo cemento, incluye idas y vueltas 32. Revoltura del hormigón y vaciado de la olla 33. Llenado de las cubetas con hormigón 34. Acarreo de cubetas a la persona que sube el hormigón, incluye los retornos con cubetas vacías 35. Izado de las cubetas de hormigón 36. Acarreo y vaciado para acomodo del hormigón; incluye el retorno con cubetas vacías 37. Acomodo del hormigón en cadenas perimetrales 38. Acomodo de hormigón en vigas de entrepiso 39. Acomodo del hormigón en losa armada 40. Acomodo del hormigón en losa

Fuente: presentación del propia del autor.

Tabla 3. Partidas en las que se agruparon las actividades

Partida	Unidades de análisis	Descripción
Acarreos	Lote	Se refiere al total de tiempo erogado para trasladar los recursos, acero, tablas y polines, necesarios para la fabricación de una cubierta.
Preliminares 1: habilitado, cimbra y colocación de estructura de la losa	m y m ²	Contempla el tiempo total de la fabricación del acero y la cimbra para la colocación del hormigón de vigas y losa armada por cubierta.
Preparación de la cubierta de la losa	m ²	Contempla el tiempo total necesario para la preparación de una cubierta antes de la colocación del hormigón, según las actividades observadas.
Preliminares 2: actividades antes de colocar el hormigón	Lote	Se refiere al total de tiempo erogado para juntar a la cuadrilla de trabajo, acarrear los elementos (cemento y revolvedora) y dejar listos los recursos (agua, cemento y agregados) que se van a utilizar.
Colocación del hormigón de losa	ml y m ²	Contempla el tiempo total necesario para colocar el hormigón de la estructura, vigas y losa.

Fuente: presentación propia del autor.

Las cuarenta actividades mostradas en la Tabla 2 son realizadas por la cuadrilla de trabajo con un mínimo uso de maquinaria. Esto se da sólo cuando se emplea la mezcladora de hormigón.

2.2 Datos y distribuciones de probabilidad estadística

En esta parte se resumen los tipos de distribución poblacional identificados para cada una de las actividades por partida dentro de cada sistema constructivo de losa tradicional, utilizando el programa SPSS©. A continuación se muestran, a modo de ejemplo, los resultados para la actividad de acarreo (Figura 3). Para las demás actividades se sugiere revisar lo dicho por Sosa Canto (2005).

Figura 3. Cédula de captura de datos acarreo del recurso acero

Cédula de registro de tiempos	
Actividad:	Acarreo de acero del almacén a la obra. Necesario para la losa armada y de vigueta. Incluye varilla para parrillas, vigas y bastones, armex, alambroñ y A.R ec.
Unidad de medida:	Lote
Método:	Losa de vigueta y bovedilla
Recursos utilizados:	M.O. 1 chofer (contratista) + ayudante
Equipo y/o herramienta:	Camioneta
Materiales:	Varillas de 3/8" y 1/2", armex, alambroñ, alambre recocido.
Otros:	Gasolina

Ciclo	Ubicación	Inicio			Fin			Total	T
		Hr	Min	Seg	Hr	Min	Seg		
1	Losa 1	10	29	19	10	58	42	29,38	
2	Losa 2	10	16	4	10	47	33	31,48	
3	Losa 3	9	30	32	10	1	21	30,82	
4	Losa 4	11	14	20	12	5	48		
5	Losa 5	10	46	11	11	16	38	30,45	
6	Losa 6	16	6	22	16	39	19	32,95	
7	Losa 7	15	36	15	16	3	49	27,57	
8	Losa 8	15	25	27	15	57	48	32,35	
9	Losa 9	10	35	6	11	6	27	31,35	
10	Losa 10	12	24	33	12	54	57	30,4	
11	Losa 11	10	16	19	10	45	32	29,22	
12	Losa 12	16	34	52	17	6	9	31,28	

Datos estadísticos	
Sum	797,87
max	39,13
min	23,23
Media	30,51
D.E.	3,34
Var	11,18
Rango	15,90
Interv	7,00
Categorías	6,00
Ran/café	2,65
Ancho interv	1,33

Continúa

Ciclo	Ubicación	Inicio			Fin			Total min	T Min/unidad
		Hr	Min	Seg	Hr	Min	Seg		
13	Losa 13	15	13	10	16	4	46		
14	Losa 14	15	27	50	15	58	12	30,37	
15	Losa 15	10	15	8	10	42	24		
16	Losa 16	10	50	8	11	25	23		
17	Losa 17	9	25	7	10	1	4		
18	Losa 18	11	22	59	11	52	36		
19	Losa 19	10	22	40	10	49	43		
20	Losa 20	10	5	20	10	37	32		
21	Losa 21	16	23	11	16	54	20		
22	Losa 22	15	14	22	15	56	11		
23	Losa 23	15	45	15	16	16	22		
24	Losa 24	11	26	27	11	59	15		
25	Losa 25	10	39	19	11	18	27		
26	Losa 26	16	21	52	16	45	6		
27	Losa 27	15	41	10	16	13	11		
28	Losa 28	15	32	21	15	56	22		
29	Losa 29	10	18	48	10	43	15		
30	Losa 30	12	30	38	13	12	46		

Datos histograma				
Intervalo	LI	LS	Mk	Histograma
1,00	20,58	24,56	22,57	0,00
2,00	24,56	25,88	25,22	2,00
3,00	27,21	28,53	27,87	3,00
4,00	29,86	31,18	30,52	7,00
5,00	32,51	33,83	33,17	11,00
6,00	35,16	36,48	35,82	1,00
7,00	37,81	39,13	38,47	1,00

Datos actividad	
Las losas son de	40.000 m ² aprox
El total de datos cuestionados	30.000 m ² aprox
Rendimiento:	30,51 min/lote
El tonelaje de acero requerido por losa es	

Histograma

Fuente (Sosa Canto, 2005).

La Tabla 4 resume los análisis estadísticos para todas las partidas, utilizando el programa SPSS©. Se muestran los datos de tiempo resultantes de comparar los datos a la luz de las de diferentes distribuciones. De esta comparación se seleccionaron las que se muestran en la tabla indicada.

Tabla 4. Datos estadísticos poblacionales de tiempo por unidad de análisis para el sistema de losa tradicional

Actividad	Tipo de distribución
Demora por suministros	Triangular con parámetros: 0,5, 1, 2 jornales
Acarreos	Uniforme 0,154 jornal/losa
Preliminares 1	Triangular: 0,794, 1, 1,23 jornal/losa
Preparación de cubierta	Triangular: 0,28, 0,36, 0,43 jornal/losa
Preliminares 2	Triangular: 0,036, 0,056, 0,071 jornal/losa
Colocación del hormigón	Triangular: 0,133, 0,157, 0,184 jornal/losa
Descompostura de la mezcladora de hormigón	Triangular: 0,554, 0,081, 0,1018
Traslado de maquinaria a la bodega	Uniforme: 0,02, 0,05 jornales

Fuente: presentación propia del autor.

Se cotejaron los parámetros obtenidos de manera teórica con los datos reales usando el programa estadístico y se seleccionaron las distribuciones teóricas que más se apegaron a los datos. Los parámetros de cada distribución que se muestran en la Tabla 4 fueron extrapolados usando el paquete estadístico VTFIT© (Cooke, 1993). Con ellos se completaron las diferentes actividades del modelo mostrado en la Tabla 5 y la Figura 4. En la Tabla 5 se muestra el modelo computacional que describe el proceso propuesto, dividido en nueve actividades combinadas.

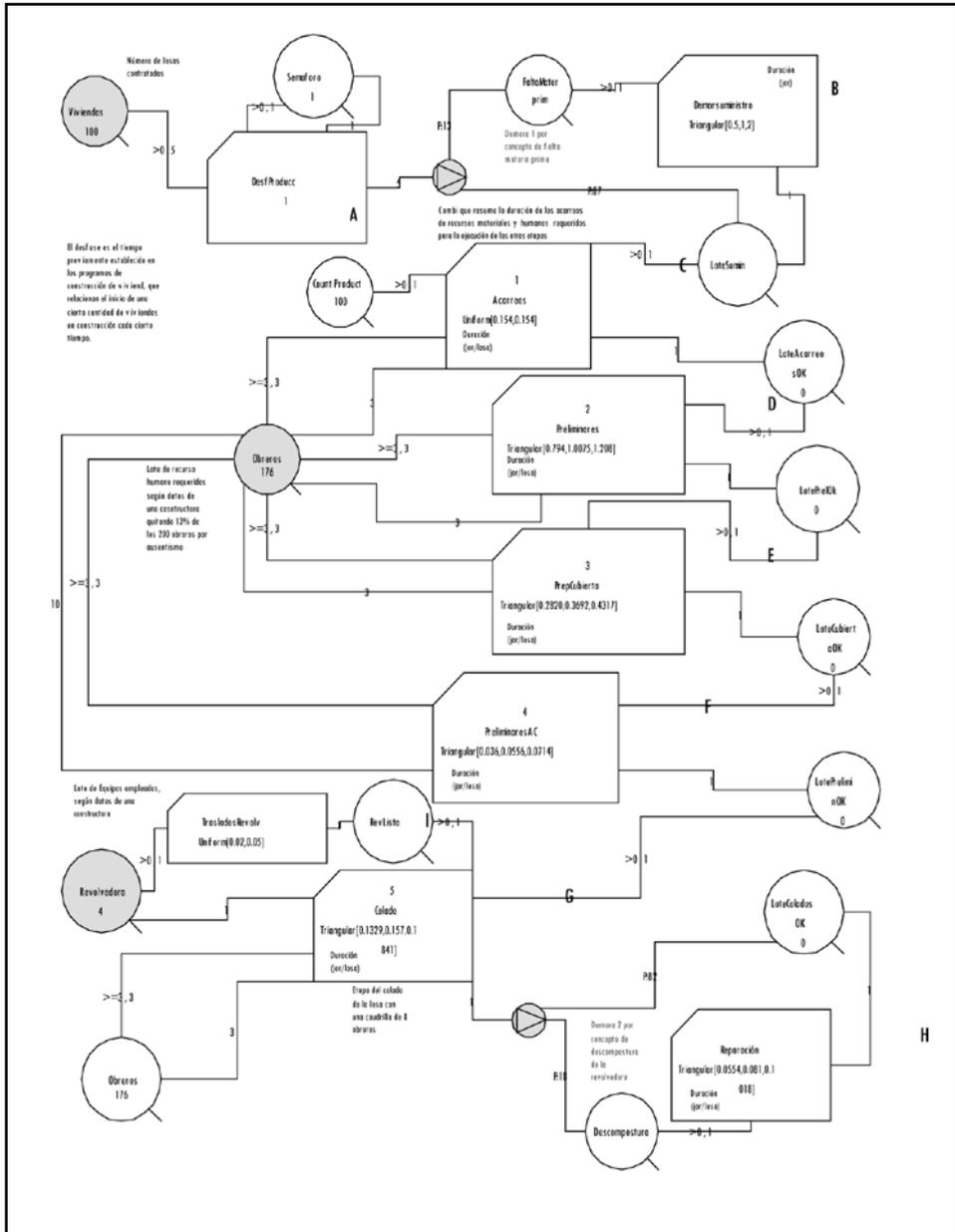
Tabla 5. Modelo computacional del proceso propuesto

A	Desfase en producción	Esta actividad se utiliza para que se divida el trabajo entre las diferentes cuadrillas que componen al modelo y así evitar que todas ellas comiencen a la vez.
B	Demora por suministros	Tiene a su cargo simular la demora en los suministros de mano de obra y materiales, si llegare a ocurrir. Está antecedida por un elemento de decisión con una probabilidad de 13% de ocurrencia.
C	Acarreos	Resume la duración de los acarreos de recursos materiales y humanos requeridos para la ejecución de las demás etapas del proceso.
D	Preliminares 1	Resume la duración que se espera para las actividades la fabricación del acero y la cimbra para la colocación del hormigón de vigas y losa armada por cubierta.
E	Preparación de cubierta	Representa el tiempo total necesario para la preparación de una cubierta, tal como se mencionó en la Tabla 3.
F	Preliminares 2	Es la actividad que corresponde a juntar a la cuadrilla de trabajo, acarrear los elementos cemento, etc. (Tabla 3).
G	Colocación del hormigón	Simula el tiempo para la colocación del hormigón.
H	Descompostura de la mezcladora de hormigón	Simula el tiempo que pasaría si ocurre una descompostura en dicha máquina. Está antecedida por un nodo de decisión que le asigna una probabilidad de 18% de ocurrencia.
I	Traslado de maquinaria a la bodega	Simula el final del ciclo de colocación del hormigón y comienzo de tareas, como limpieza de herramienta, maquinaria, personal, etc.

Fuente: presentación propia del autor.

Los resultados del modelo de simulación de la Figura 4 se muestran en la Tabla 6. El tiempo que arroja construir 120 m² de losa es de aproximadamente 842 minutos, teniendo en cuenta que se fabrican cuatro losas en una sola sesión de catorce horas, que corresponde a una jornada más larga que la asumida, pero común en el trabajo en campo.

Figura 4. Modelo de simulación para la losa tradicional codificado en EzStrobe©



Fuente: Sosa Canto (2005).

Tabla 6. Resultado de la simulación de las actividades usando el modelo de la Figura 2

Recursos	Queue	Res	Cur	Total	AvWait	AvCont	SDCont	MinCont	MaxCont
Bovedillas ezs	0	226	555,23	149,07	102,6	0	226		
CadenasinC ezs	0	0,8	774,95	0,74	0,2	0	0,8		
Camioneta ezs	1	4	189,59	0,9	0,3	0	1		
Concreto ezs	0	1,62	20,3	0,04	0,1	0	0,39		
Cuadrilla ezs	1	57	9,57	0,65	0,48	0	1		
Cuadrilla2 ezs	1	152	3,35	0,6	0,49	0	1		
Cuadrilla3 ezs	1	10	80,19	0,95	0,21	0	1		
Cuadrilla4 ezs	1	3	278,53	0,99	0,09	0	1		
Cuadrilla5 ezs	1	16	48,82	0,93	0,26	0	1		
LosaAColada ezs	0,18	0,18	18,27	0	0,02	0	0,18		
LosaAsinC ezs	0	0,17	821,61	0,17	0,02	0	0,17		
LoteAcero ezs	0	40	0	0	0	0	40		
Maderas ezs	0	1	277,68	0,33	0,47	0	1		
Material ezs	985	1.000	840,67	998,7	3,52	985	1		
Recuperabilita2 ezs	1	1	123,39	0,15	0,35	0	1		
Recursos ezs	0	1	697,63	0,83	0,38	0	1		
Recurxhabilitar ezs	0	1	0	0	0	0	1		
Revolvedora ezs	1	16	48,82	0,93	0,26	0	1		
Supervisor ezs	1	47	17,39	0,97	0,17	0	1		
TirabeSinC ezs	0	0,17	733,42	0,14	0,05	0	0,17		
Viguetas ezs	0	56,4	238,9	16,01	24,48	0	56,4		
Viguetas2 ezs	0	56,4	426,64	28,59	26,34	0	56,4		
cadenaColada ezs	0,81	0,81	65,24	0,06	0,19	0	0,81		
Cuadrilla6 ezs	1	91	8,02	0,87	0,34	0	1		
espacio ezs	0,03	1,65	194,74	0,38	0,13	0	0,43		
kgAceroxHabilit ezs	0	40	191,13	9,08	7,44	0	40		

Continúa

Recursos	Queve	Res	Cur	Total	AvWriti	AvCont	SDCont	MinCont	MaxCont
kgacero1H ezs	28,36			28,36	733,51	24,71	8,45	0	28,36
kgacero1SH ezs	0			26	83,4	2,58	6,75	0	26
kgacero2H ezs	3			3	654,49	2,33	1,22	0	3
kgacero2SH ezs	0			3	173	0,62	1,19	0	3
losaVBC ezs	0,05			0,05	3,45	0	0	0	0,05
losaVBSinC ezs	1,03			1,08	841,53	1,08	0	1,03	1,08
miviguexlevan ezs	0			56,4	426,64	28,59	26,34	0	56,4
miviguexacarr ezs	0			56,4	238,9	16,01	24,48	0	56,4
m ² apuntala2 ezs	37			37	209,84	9,22	15,55	0	37
m ² cimbraC ezs	3			3	507,49	1,81	1,45	0	3
m ² cimbraSC ezs	0			2,5	316,92	0,94	1,19	0	2,5
m ² cimbrapeColo ezs	7			7	163,6	1,36	2,71	0	7
m ² cimbrapeSC ezs	0			6,35	671,35	5,06	2,5	0	6,35
m ² cubierta ezs	27,05			36,05	809,03	34,65	3,17	27,05	36,05
m ² cubiertaPrepaezs	9			9	126,68	1,35	3,12	0	9
m ² cubiertaSuperezs	46			46	110,89	6,06	15,23	0	46
m ² cubiertahumedezs	1			1	118,17	0,14	0,35	0	1
m ² cubiertaxPrezs	27,05			36,05	809,03	34,65	3,17	27,05	36,05
m ² cubiertaxSup ezs	0			45,08	730,11	39,1	14,97	0	45,08
m ² cubiertaxhumeezs	0			1	718,87	0,85	0,35	0	1
m ² maderaxhab ezs	3			50	326,25	19,38	21,87	0	50
m ² xapuntalar ezs	0			36,15	629,89	27,05	15,26	0	36,15
pzaBexcolocar ezs	0			226	555,23	149,07	102,6	0	226
totalmlacarre2 ezs	57			57	601,14	40,71	24,79	0	57
totalmllevan2 ezs	57			57	411,45	27,86	26,6	0	57
totalpzacoloca ezs	231,25			231,2	282,91	77,72	104,55	0	231,25
trabecolada ezs	0,18			0,18	106,84	0,02	0,06	0	0,18

Continúa

Conceptos	Total	IstSt	LstSt	AvDur	SDDur	MinD	MaxD	AvInt	SDInt	Mini	Maxi
Activity											
AcarViguetas	57	201,93	276,47	1,33	0,08	1,16	1,51	1,33	0,08	1,16	1,51
Acararacero	1	0	0	37,54		37,54	37,54				
Acamaderas	1	277,68	277,68	26,56		26,56	26,56				
Acarrecursos	1	697,63	697,63	19,3		19,3	19,3				
Acerolosaam	3	159,09	185,73	14,28	2,42	11,56	16,2	13,32	2,49	11,56	15,08
Acerotrabes	6	37,54	138,48	20,26	0,2	20,05	20,61	20,19	0,12	20,05	20,31
ApuntalosaVyBc	37	604,26	656,09	1,43	0,2	1,06	1,79	1,44	0,2	1,06	1,79
Cimbperimetral	7	657,29	688,95	5,18	0,99	4,01	6,53	5,28	1,05	4,01	6,53
Cimbtrabelosa	3	304,25	335,71	14,22	2,62	11,21	15,95	15,73	0,31	15,51	15,95
ColocBovedillas	37	509	601,48	2,57	0,75	1,36	3,72	2,57	0,76	1,36	3,72
ElabConcreto	15	723,6	837,16	4,04	0,14	3,75	4,25	8,11	3,42	3,75	14,22
Humedosa	1	718,87	718,87	4,73		4,73	4,73				
LevanViguetas	57	346,92	505,79	2,84	0,44	2,18	3,52	2,84	0,44	2,18	3,52
PrelColado	1	716,93	716,93	1,44		1,44	1,44				
Prepacubierta	9	693,55	728,55	4,43	0,58	3,38	5,18	4,37	0,6	3,38	5,18
SupervColado	46	718,37	742,01	0,53	0,1	0,3	0,72	0,53	0,1	0,3	0,71
coladocadena	60	741,47	809,32	1,15	0,03	1,11	1,19	1,15	0,03	1,11	1,19
coladorrabe	13	727,34	740,37	1,09	0,05	1,02	1,18	1,09	0,05	1,02	1,18
losaVB	4	834,54	841,01	1,13	0,29	0,75	1,45	2,16	1,47	1,16	3,85
losarmada	13	810,47	832,74	1,85	0,05	1,77	1,95	1,86	0,05	1,77	1,95

Fuente (Sosa Canto, 2005).

3. Discusión

El modelo propuesto puede ser mejorado, pero representa el primer paso para comparar el sistema tradicional con otros, tal como el estudiado por Sosa *et al.* (2007). El modelo de colocación de cubierta L-18 toma en promedio 299,13 minutos contra 842 minutos del método tradicional, para cubrir un área equivalente a la que se estudia en este trabajo. Sin embargo, el método tradicional es el más empleado en la región, debido a que el costo de la mano de obra es menor para los constructores de vivienda.

Otra ventaja aparente del método tradicional es que requiere menor capacitación que cualquier otro sistema industrializado. Sin embargo, al comparar el modelo presentado en este trabajo con el de Sosa Canto (2005), salta a la vista que se manejan muchas más actividades que en el modelo de losas prefabricadas estudiadas por dicho autor, lo cual incrementa los problemas de logística de las cuadrillas de trabajo. Por otra parte, para poder comparar ambos sistemas, se necesitaría un estudio que presente las mismas condiciones para ambos sistemas, como volumen de obra, modularización de las unidades de vivienda, etc., que son importantes para saber hasta qué punto el sistema tradicional deja de tener sus ventajas aparentes y localizar el punto de equilibrio en volumen de obra (el punto en el que el sistema industrializado comienza a ser rentable).

Con respecto al modelo presentado en este estudio, se puede objetar que tan solo se basa en un ejemplo y que las 40 actividades deberían de ser representadas tal como son en el programa y no agruparlas en partidas. Sin embargo, la dificultad de representar todas y cada una de las actividades aumenta de manera exponencial con la lógica de la secuencia del método. Otro punto débil del método es que se podría hacer un arreglo con una lógica diferente. El modelo para la losa tradicional presentado en este trabajo requeriría ajustes para obras compuestas de dos o más cuadrillas de trabajo, puesto que la logística de los recursos es manejada al arbitrio del jefe de obra. En resumidas cuentas, es preciso profundizar en el estudio de este modelo, con diferentes variables.

4. Conclusiones

El modelo presentado contiene muchas actividades que están sujetas al desempeño de la mano de obra; sin embargo, es el primer paso para poder comparar el desempeño de este sistema en cuestiones de tiempo. También se puede inferir que la metodología empleada en este trabajo puede aplicarse en otros trabajos de simulación. Con esto también se puede decir que se tienen los fundamentos para crear una base de datos de modelos constructivos para la construcción de vivienda económica en forma masiva.

Referencias

- COOKE, R. *VTFIT, A Routine for Fitting Homogeneous Probability Density Functions* [documento en línea]. 1993. VA 24061-0303. [Blacksburg, Virginia]: Department of Agricultural Engineering Virginia Polytechnic Institute Blacksburg, <<http://age-web.age.uiuc.edu/faculty/rac/soft.html>> [Consulta: 30-04-2008].
- KAMAT, V. R. and MARTÍNEZ, J. C. Dynamic 3D Visualization of Articulated Construction Equipment. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE. 2005, vol. 19, núm. 4, pp. 356-368.
- LAW, A. and KELTON, D. *Simulation Modeling and Analysis*. 3rd ed. Boston: McGraw Hill, 2000.
- LEACH, N.; BARRETT, K., and MORGAN, G. *SPSS for Intermediate Statistics. Use and Interpretation*. 3rd ed. Denver: Lawrence Erlbaum, 2007. 288 p. ISBN 978-0805862676.
- MARTÍNEZ, J. C. EZStrobe: General-purpose Simulation System based on Activity Cycle Diagrams. *33rd Conference on Winter Simulation*. Arlington, Va., December 9-12, 2001. Arlington: Inst Elect & Electronic Engineers. ISBN-10: 0-7803-7309-X.
- SOSA CANTO, J. A. *Evaluación técnico-económica entre dos tipos de losa mediante un proceso de simulación* [tesis de Maestría]. Mérida: Universidad Autónoma de Yucatán, 2005.
- SOSA CANTO, J. A.; BAEZA PEREYRA, J. R., y ARCUDIA ABAD, C. E. Modelo para simulación computarizado del proceso constructivo de la losa prefabricada L-18. *Ingeniería y Universidad*. 2007, vol. 11, núm. 1, pp. 71-87.
- TUN T., J. F. *Fallas estructurales típicas de la región yucateca* [monografía]. Mérida: Universidad Autónoma de Yucatán, 1996.

Modelo de medición y evaluación de la usabilidad en sitios web de la banca virtual en Colombia^{*}

A Model for Measuring and Evaluating the Usability of Web Sites in Colombian Virtual Banking Services

Modelo de mediçãõ e avaliaçãõ da usabilidade dos sítios web dos bancos virtuais na Colômbia

*Elkin René Pulido Granados^{**}*
*Víctor Hugo Medina García^{***}*

* Fecha de recepción: 8 de noviembre de 2007. Fecha de aceptación para publicación: 26 de marzo de 2008. El artículo se deriva del trabajo de grado con el mismo título, presentado por el primer autor para optar por el título de Magíster en Teleinformática.

** Ingeniero de Sistemas, Universidad de Boyacá, Tunja, Colombia. Estudiante de Maestría en Teleinformática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: erpulido@gmail.com

*** Ingeniero de Sistemas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Magíster en Informática, Universidad Politécnica de Madrid, España. Doctor en Ingeniería Informática, Universidad Pontificia de Salamanca, España. Director de la Especialización en Teleinformática de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y profesor asociado de la Universidad Pontificia de Salamanca. Correo electrónico: victorhmedina@gmail.com

Resumen

El propósito de este trabajo es desarrollar un modelo para medir y evaluar la usabilidad de los sitios web de banca virtual en Colombia, producto de la metodología de evaluación heurística por expertos y que contemple los objetivos propios del dominio y las necesidades de los navegantes, además de su perfil. Existen varias metodologías para evaluar dicha usabilidad. Las más conocidas son: revisión iterativa, *ClickStream*, cuestionario en línea, evaluación heurística por expertos, test de usuarios, simulación cognitiva, simulación en conjunto, entrevistas a usuarios, pensar en voz alta, técnica de categorización de contenidos, método científico, estudio etnográfico, *SUMI-QUIS*, *ESPRIT MUSiC*, evaluación de la usabilidad intercultural, evaluación de la accesibilidad, estudios de documentación y modelos predictivos del desempeño del sistema. Se seleccionó la evaluación heurística por expertos, ya que se cuenta con la experticia del evaluador sobre el tema; además, es una metodología informal, rápida de aplicar, de bajo costo y de resultados concretos, precisos y veraces sobre lo que ocurre en el sitio web en términos de usabilidad. Luego de obtener los resultados de la evaluación, se pretende realizar un informe que les permita a los bancos conocer qué está pasando con los usuarios que realizan transacciones en su página de internet, si están satisfaciendo de forma fácil y segura sus necesidades y objetivos y si el sitio les provee accesibilidad, confiabilidad y funcionalidad.

Palabras clave

Simulación por computadores, páginas web, métodos heurísticos, instituciones financieras-innovaciones tecnológicas.

Abstract

The work here presented is the development of a model for the measurement and evaluation of the usability of web sites of the Colombian virtual bank; the methodology used was that of a heuristic evaluation by experts, which takes into account the inherent objectives of the domain and the necessities of the navigators, in addition to their profile. There are several methodologies to evaluate the usability of web sites, such as: iterative revision, *ClickStream*, on-line questionnaire, heuristic evaluation by experts, users' test, cognitive walkthrough, pluralistic walkthrough, interviews with users, thinking aloud, card sorting, scientific method, ethnographic study, *SUMI - QUIS*, *ESPRIT MUSIC*, evaluation of the intercultural usability, evaluation of the accessibility, studies of documentation, and predictive system performance models. The heuristic evaluation by experts was selected due to several reasons: it is based on the evaluators' expertise on the subject; it is an informal, easy-to-apply methodology; it has low cost and concrete results; it is accurate and reliable in terms of web site usability. Evaluation results can be used to make a report that allows banks to know what is happening to users who make transactions through their Internet pages, whether the web sites efficiently satisfy their needs and objectives, and also if each site provides them with accessibility, trustworthiness and functionality.

Key words

Computer simulation, web sites, heuristic methods, financial institutions – technological innovations.

Resumo

O propósito deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo que seja utilizado para a medição e avaliação da usabilidade dos sítios web dos bancos virtuais na Colômbia, produto do uso da metodologia de avaliação heurística por especialistas, que contemple os objetivos próprios do domínio e as necessidades dos navegantes, além do seu perfil. Existem varias metodologias para avaliar essa usabilidade; as mais conhecidas são: revisão iterativa, *ClickStream*, questionários online, avaliação heurística por especialistas, teste de usuários, simulação cognitiva, simulação em conjunto, entrevistas a usuários, pensar em voz alta, técnica de categorização do conteúdo, método científico, estudo etnográfico, *SUMI - QUIS*, *ESPRIT MUSiC*, avaliação da usabilidade intercultural, avaliação da acessibilidade, estudos de documentação e modelos predictivos do desempenho do sistema. Foi selecionada a avaliação heurística por especialistas, já que conta-se com a proficiência do avaliador com o tema. É uma metodologia informal, rápida de aplicar, de baixo custo e de resultados concretos, precisos e verazes sobre o que acontece no sitio web em termos de usabilidade. Ao obter os resultados da avaliação, pretende-se realizar um informe que permita os bancos conhecer o que esta acontecendo com os seus usuários que realizam transações pela pagina web, se está satisfazendo, de forma fácil e segura, as suas necessidades e objetivos e se o site oferece acessibilidade, confiabilidade e funcionalidade.

Palavras chaves

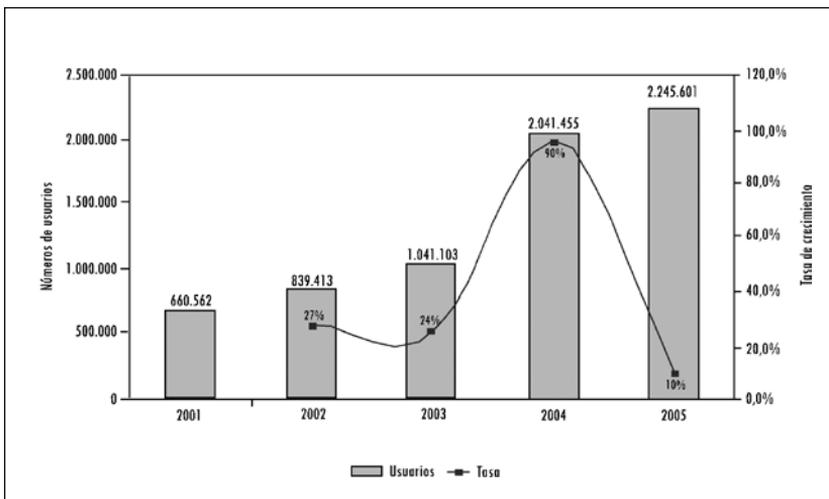
Avaliação heurística, acessibilidade, confiabilidade, funcionalidade, sítios web de bancos.

Introducción

Los sitios web de la banca en Colombia han adquirido especial relevancia en los últimos años para los clientes de las entidades financieras. Beneficios como el ahorro de tiempo, el evitar el desplazamiento, la seguridad y la reducción de riesgos que la red ofrece a los usuarios, han hecho que actualmente la totalidad de las entidades bancarias ofrezcan el servicio de banca virtual, como lo indican los resultados de la encuesta de banca por internet realizada por la Asobancaria (Nieto y Duarte, 2006).

Los usuarios de banca por internet correspondían al 58% de los navegantes en el país en 2006 (Figura 1). De este porcentaje, 2'245.600 son cuentahabientes de las diferentes entidades, que realizan algún tipo de transacción monetaria o no monetaria en el sitio web. Este número representa un aumento del 10% con respecto al año 2005 (Arbeláez *et al.*, 2006).

Figura 1. Evolución de los usuarios de la banca virtual, 2001-2005



Fuente: Arbeláez *et al.* (2006).

En cuanto a los costos, una transacción realizada por internet le costaría a la entidad financiera en promedio \$824, mientras una transacción realizada directamente en las oficinas tendría un costo promedio de \$2.083. De acuerdo con las cifras reportadas por la Comisión de Regulación de Telecomunicaciones (CRT, 2006), se estima que un 10,6% de los usuarios de internet en 2005 ingresaron a la banca virtual y, por alguna razón, desistieron de realizar alguna transacción. Por otra parte, se calcula que un 81,7% de los cuentahabientes, potenciales usuarios de los servicios de banca virtual, no ingresan a este servicio a pesar de estar habilitados (Superintendencia Financiera de Colombia, 2005).

Con la evaluación heurística como método para medir la usabilidad de diversos sitios web, las normas existentes del diseño centrado en el usuario, la interacción persona-computador (Nielsen y Loranger, 2006), para este caso sitio web, y los estándares de arquitectura de información, además del conocimiento adquirido a lo largo del trabajo en cuanto al desarrollo e implementación de sitios web (Segovia, 2007), se obtienen los fundamentos para elaborar un modelo que permita medir y evaluar la usabilidad de los sitios web de banca virtual en Colombia. El modelo resultante no tiene antecedentes en Colombia; en otros países como España, Chile y México se han diseñado modelos similares, pero ninguno que tome en cuenta los criterios de usabilidad, accesibilidad, funcionalidad, contenido, confiabilidad y eficiencia. Los anteriores criterios se definen de la siguiente manera para su evaluación en el modelo:

- Usabilidad: mide la facilidad de uso del sitio, de cómo se siente el usuario navegando por el sitio y las facilidades que el sitio provee para que el usuario se sienta cómodo navegando por él.
- Accesibilidad: mide las facilidades que provee el sitio a personas con alguna discapacidad, tanto auditiva como visual.
- Funcionalidad: mide el comportamiento del sitio en diferentes navegadores, la permanencia de las imágenes institucionales y otros controles durante la navegación.
- Contenidos: la medición de esta variable está dada por el contenido de los sitios web de banca virtual, los productos y servicios que cada una de las entidades financieras ofrecen por su página.
- Confiabilidad: mide la seguridad y las posibles deficiencias que hacen que el sitio web le brinde al usuario la suficiente confiabilidad para hacer sus transacciones.
- Eficiencia: hace referencia al rendimiento y al tiempo que se demora una página en ser cargada dentro del sitio web y al tiempo que tarda en hacer una transacción.

1. Materiales y métodos

Se han desarrollado muchas herramientas basadas en una misma técnica de soporte para aplicar determinados métodos de evaluación de usabilidad, pero no se ha logrado establecer un acuerdo respecto a los verdaderos criterios de evaluación, ni a los estándares de la técnica seleccionada (Martín, s. f.). La metodología escogida en este trabajo es la de evaluación heurística por expertos. En la Tabla 1 se describen las principales características de la metodología seleccionada.

Tabla 1. Características de la evaluación heurística por expertos

Definición	La evaluación heurística o por criterios es realizada por evaluadores especializados en los principios establecidos por la disciplina de la <i>interacción persona-computador</i> (IPO/HCI), para este caso de estudio con páginas web.
Modo de aplicación	<p>Evaluadores expertos en los principios de la usabilidad evalúan el sitio y elaboran un informe siguiendo los principios de la IPO/HCI. Los evaluadores inspeccionan los sitios web en forma individual y sólo después de la evaluación pueden comunicar sus hallazgos.</p> <p>Los evaluadores rinden sus informes por escrito. Una recomendación general es que los evaluadores naveguen a través de todo el sitio web al menos dos veces para familiarizarse con su estructura y antes de comenzar con la evaluación propiamente dicha. Las sesiones de evaluación duran aproximadamente una o dos horas por sitio. Los evaluadores emplean una lista de criterios que se van a revisar y, cuando sea necesario, incorporan nuevos principios a los criterios definidos.</p> <p>Los evaluadores no sólo elaboran una lista de problemas de usabilidad en el sitio, sino que explican los problemas de acuerdo con los principios de la usabilidad.</p>
Ventajas	<p>La principal ventaja es su excelente relación calidad-costos. Un número mínimo de tres evaluadores permite realizar una evaluación por criterios.</p> <p>En comparación con otras técnicas de evaluación, donde el observador debe interpretar las acciones del usuario en la evaluación heurística, no es necesaria la interpretación externa, porque las ideas, los comentarios y la información de los evaluadores están contenidos en sus informes. Otra ventaja es que en la evaluación por criterios es posible interrogar a los evaluadores, profundizar en determinadas cuestiones de interés y ayudarlos cuando tienen problemas.</p>

Continúa

Desventajas	Una limitante es que este análisis sólo ofrece un reconocimiento parcial de los problemas de usabilidad, puesto que a medida que aumenta la cantidad de evaluadores, aumentan los puntos de vista y la detección de nuevos problemas.
Requisitos	En la mayoría de los casos se debe realizar esta evaluación antes del test de usuarios. Un número entre tres y cinco evaluadores es suficiente para la evaluación por criterios de un sitio web. Este número puede ser incrementado en caso de que la usabilidad sea definida como un criterio prioritario dentro del sitio web.

Fuente: Manchón (2003a y 2003b), Hom (2003), Márquez (2005) y Nielsen (1994 y 1999a).

A fin de poner en práctica la metodología, se empleó una lista de verificación en cada una de las páginas evaluadas. Se definió una escala de 0 a 10 para medir las variables referidas a usabilidad, accesibilidad, funcionalidad, contenido, confiabilidad y eficiencia. En la Tabla 2 se relacionan las variables definidas y los porcentajes correspondientes.

Tabla 2. Variables por evaluar y sus porcentajes

40%		1. Usabilidad
	40%	1.1 Comprensibilidad global del sitio
	10%	1.2 Mecanismos de ayuda y retroalimentación en línea
	10%	1.3 Aspectos de interfaces y estéticos
	10%	1.4 Misceláneas
	15%	1.5 Usabilidad de los textos
	15%	1.6 Clasificación de la información
5%		2. Accesibilidad
	70%	2.1 Accesibilidad para usuarios con discapacidades
	10%	2.2 Acceso a navegadores no gráficos
	10%	2.3 Acceso con anchos de banda baja o módem
	10%	2.4 Acceso multidispositivo
5%		3. Funcionalidad
	50%	3.1 Aspectos de búsqueda
	50%	3.2 Aspectos de navegación y exploración
10%		4. Contenidos
	10%	4.1 Información de productos
	20%	4.2 Solicitud o apertura de productos

Continúa

	20%	4.3 Ejecución de transacciones
	10%	4.4 Simuladores en línea
	10%	4.5 Información económica
	10%	4.6 Información de contacto del banco
	10%	4.7 Información para clientes nuevos
	10%	4.8 Información para clientes potenciales
25%		5. Confiabilidad
	30%	5.1 Ausencia de deficiencias y errores
	15%	5.2 Utilización de estándares del W3C
	35%	5.3 Seguridad del sitio
	20%	5.4 Actualización periódica de la información
15%		6. Eficiencia
	60%	6.1 Accesibilidad de información
	20%	6.2 Rendimiento
	20%	6.3 Tiempo de descarga

Fuente: presentación propia de los autores.

Los bancos que se tuvieron en cuenta para la evaluación heurística por expertos se listan en la Tabla 3.

Tabla 3. Bancos y direcciones de sus sitios web

Banco	Dirección para el usuario
Banco GNB SUDAMERIS	www.gnbsudameris.com.co
Banco Santander	www.bancosantander.com.co
Banco de Colombia-Conavi	www.bancolombia.com.co
Citibank	www.citibank.com.co
Banco Davivienda	www.davivienda.com.co
Banco Agrario de Colombia	www.banagrario.gov.co
Banco de Bogotá	www.bancodebogota.com.co
Banco AV Villas	www.avvillas.com.co
Banco de Occidente	www.bancodeoccidente.com.co
BBVA	www.bbva.com.co
Granbanco-Bancafé	www.bancafe.com.co
Banistmo	www.banistmo.com.co
Banco Popular	www.bancopopular.com.co
Standard Chartered Colombia	www.standardchartered.com/co/espanol/

Continúa

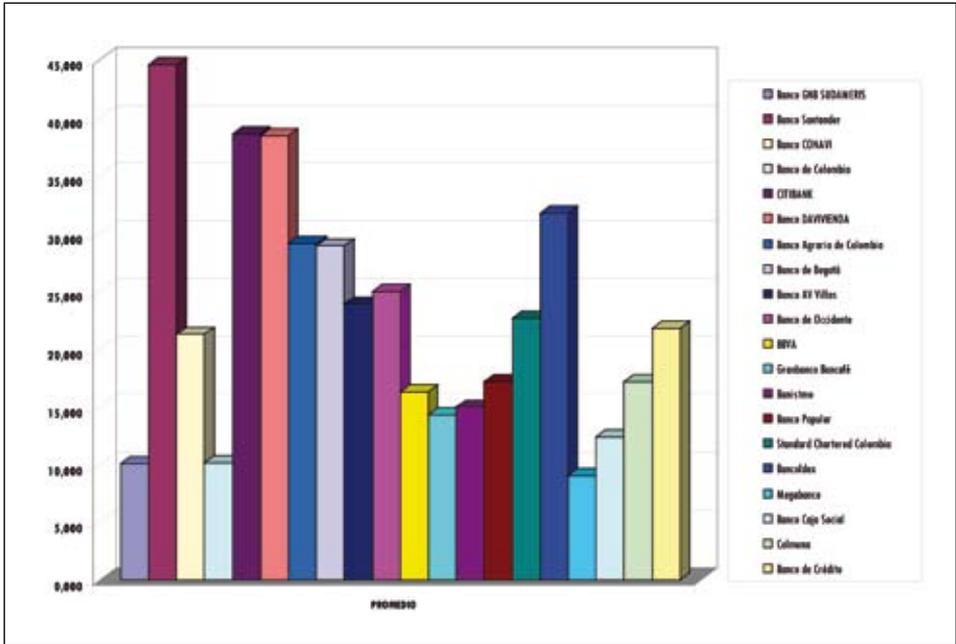
Banco	Dirección para el usuario
Bancoldex	www.bancoldex.com
Megabanco	www.megabanco.com.co
Banco Caja Social	www.bancocajasocial.com.co
Banco Colmena	www.colmena.com.co
Banco de Crédito	www.bancodecredito.com.co

Fuente: presentación propia de los autores.

Los tres evaluadores seleccionados tenían que otorgar una calificación a cada una de las variables presentadas. No obstante, los criterios que se relacionan a continuación no fueron objeto de evaluación y tenían previamente asignada la calificación correspondiente:

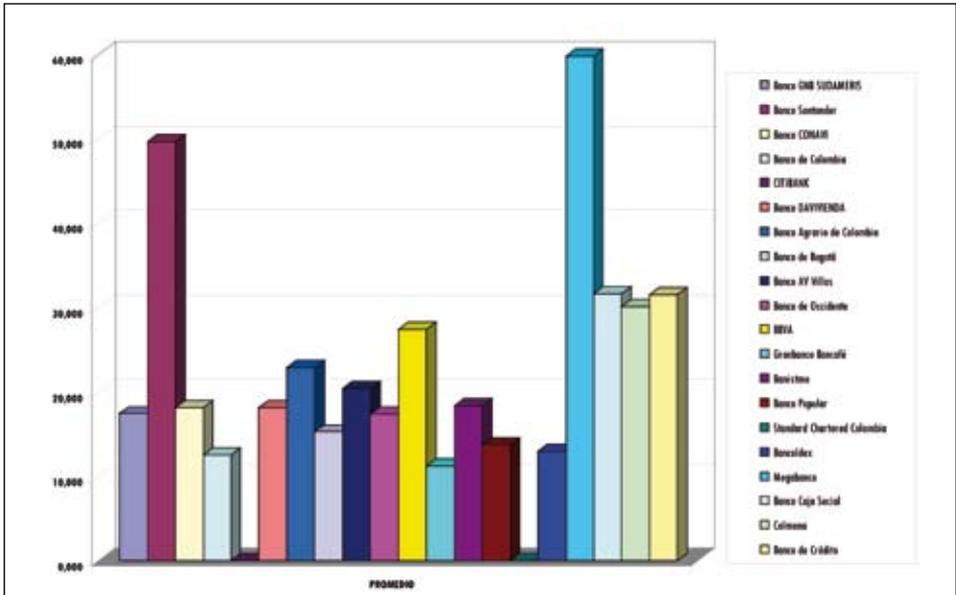
- Variable 5.2. Utilización de estándares del W3C: la calificación se obtuvo sometiendo cada página al verificador de accesibilidad de los sitios web, usando las pautas de accesibilidad del contenido web (WCAG 1.0) del W3C, llamado *Test Accesibilidad Web* (TAW). Dentro de ello se analizaron la aplicación de HTML 4.01 y la aplicación de hojas de estilo CSS.
- Variable 6.3. Tiempos de descarga: en esta variable se asignó una calificación fija al tiempo de descarga de la página de inicio (Figura 2) y al tiempo transcurrido hasta la carga de la página de solicitud de datos del usuario y de la clave para el ingreso a la página transaccional del sitio web (Figura 3). La toma de tiempo en segundos se realizó desde octubre de 2006 hasta marzo de 2007 en cada uno de los sitios web de los bancos relacionados en la Tabla 3. Para ello se utilizó el navegador Mozilla Firefox 2.0 y el complemento Fasterfox 2.0.0, el cual arroja el tiempo transcurrido entre el inicio de la carga de la página hasta haberse completado totalmente su descarga, incluyendo la carga total de imágenes, iconos o textos.

Figura 2. Velocidad de carga promedio en seis meses de la página de inicio



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 3. Velocidad de carga promedio en seis meses de la solicitud de datos de ingreso



Fuente: presentación propia de los autores.

Después de aplicar la lista de verificación de la Tabla 1 a cada una de las páginas de los bancos, se tabularon los resultados de la evaluación de los tres evaluadores. Además, se priorizaron cada una de las variables y se eliminaron redundancias y aquellas variables no relevantes para el análisis. De esta manera se obtuvo una lista de características fundamentales para el diseño del modelo de medición y evaluación de los sitios web de banca virtual en Colombia.

2. Resultados y discusión

Después de la evaluación heurística por expertos utilizando la lista de verificación, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 4.

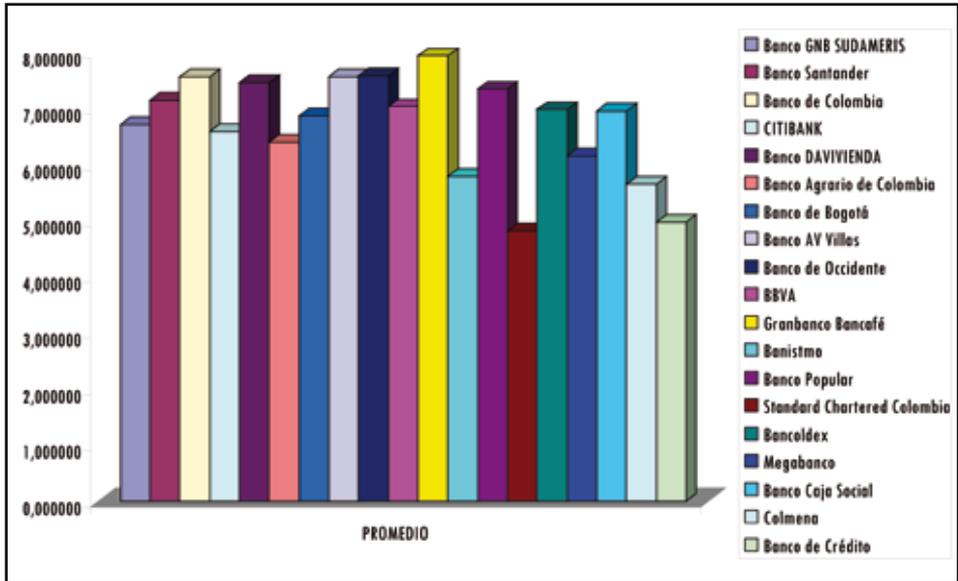
Tabla 4. Resultados generales de la evaluación heurística por parte de los evaluadores

Banco	Calificación Evaluador 1	Calificación Evaluador 2	Calificación Evaluador 3
Banco GNB SUDAMERIS	6,282786	7,465822	6,389773
Banco Santander	7,392706	7,254659	6,807478
Banco de Colombia	7,798472	7,689534	7,198172
Citibank	6,501062	6,985721	6,268088
Banco Davivienda	7,602125	7,685279	7,104941
Banco Agrario de Colombia	6,493276	6,624927	6,096788
Banco de Bogotá	7,082300	6,982345	6,536654
Banco AV Villas	7,702560	7,800568	7,20524
Banco de Occidente	7,993101	7,529218	7,21412
BBVA	7,183304	7,222954	6,695421
Granbanco-Bancafé	8,254321	8,001287	7,554922
Banistmo	5,999387	5,865249	5,514182
Banco Popular	7,453613	7,589247	6,991287
Standard Chartered Colombia	4,449482	5,41273	4,583541
Bancoldex	7,449863	6,846275	6,644242
Megabanco	6,111266	6,492481	5,857699
Banco Caja Social	7,003444	7,254132	6,626327
Colmena	5,878016	5,711254	5,386204
Banco de Crédito	4,765518	5,411651	4,729919

Fuente: presentación propia de los autores.

Al promediar los valores de la Tabla 4 se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 4.

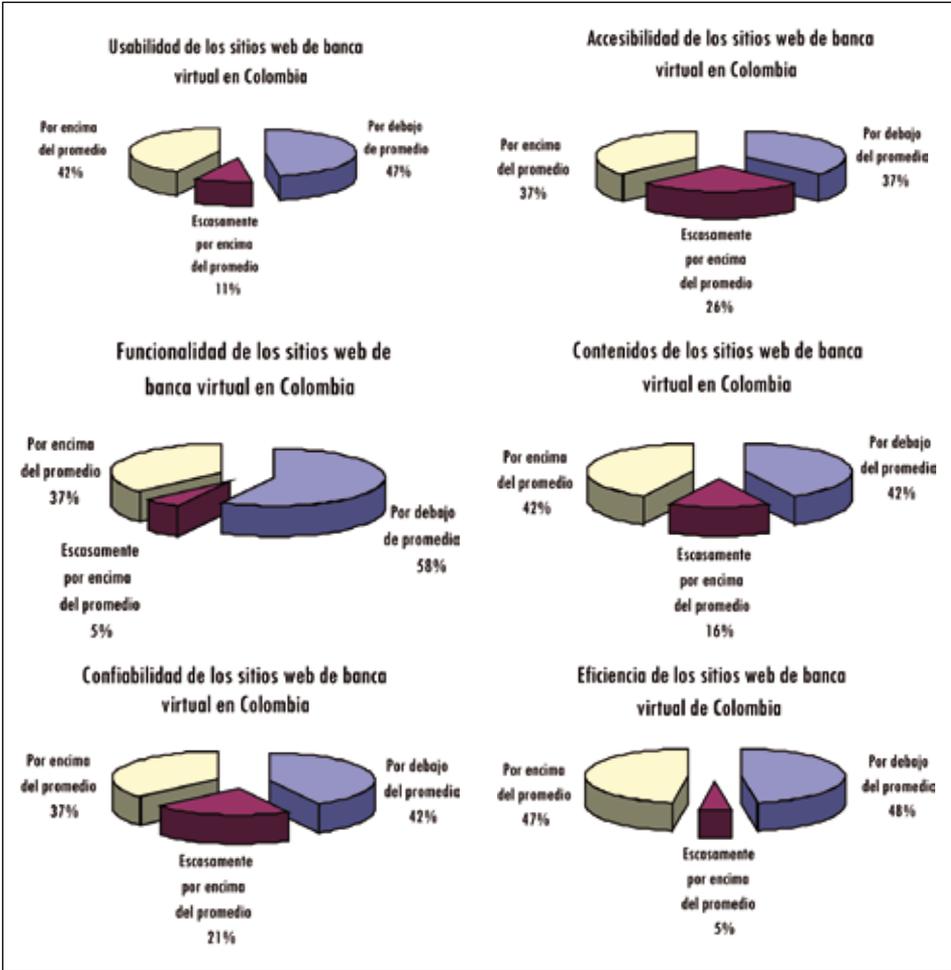
Figura 4. Evaluación promedio para cada uno de los sitios web evaluados



Fuente: presentación propia de los autores.

La calificación promedio de las variables medidas con la evaluación heurística por expertos en los 19 sitios web de banca virtual en Colombia es de 6,71 en la escala de cero a diez. Además, el 36,84% de los sitios web de banca virtual obtienen una calificación que se encuentra por debajo del promedio general. Los resultados de las variables de usabilidad, accesibilidad, funcionalidad, de contenidos, de confiabilidad y eficiencia se muestran en la Figura 5.

Figura 5. Resultados del test de expertos para cada una de las variables



Fuente: presentación propia de los autores.

3. Conclusiones

- Aunque en Colombia la totalidad de los bancos cuenta con sitios de banca virtual, en su afán de competir han descuidado aspectos relevantes como los estándares de interacción persona-computador, para el caso en estudio la interacción persona-página web, estándares asociados con la usabilidad y la accesibilidad de un sitio web.
- Muy pocos de los sitios web evaluados tienen etiquetado textual o etiquetado con íconos. Algunos tienen la opción de búsqueda global, pero en algunos

casos no funciona correctamente. La mayoría cuenta con una demostración para enseñar a navegar en la página transaccional del sitio, pero no en las demás páginas, lo que ocasiona que nuevos usuarios no entiendan la lógica de uso del sitio.

- En algunos de los sitios web de banca virtual evaluados, la página inicial no refleja la idea del sitio y, mucho menos, deja claro qué se puede hacer en este. Tal situación lleva a que nuevos usuarios con deseos de obtener los productos o servicios del banco simplemente desistan, por el hecho de no transmitírsele de manera correcta la información.
- Dentro de las reglas de accesibilidad que se deben cumplir está el soporte que el sitio debe proveer a personas con alguna discapacidad. La banca virtual de Colombia no permite que una persona con discapacidad visual total pueda acceder al sitio web. No obstante, personas con discapacidad visual parcial (ceguera al color) o aquellas que necesiten el texto de diferentes tamaños sí lo pueden hacer.
- Son pocas las deficiencias encontradas al evaluar las páginas de los bancos en diferentes navegadores, ya que la mayoría de los sitios web se comporta de manera estable en navegadores no comunes como Mozilla Firefox, Netscape, Avant, NetCaptor y Opera.
- En cuanto a los contenidos, se encontró en la evaluación que se mantiene un estándar y que los bancos con productos similares tratan de mostrar en su sitio web las ventajas con respecto a la competencia y, de esta forma, acrecentar la vinculación de clientes a sus productos y servicios.
- Con respecto a la información institucional del banco que debe suministrárseles a los clientes nuevos y a los clientes potenciales, son pocos los sitios web de banca virtual que lo tienen. Información relevante como la misión, la visión, la historia del banco, la información geográfica y de contacto y los reglamentos se ha omitido en algunos de ellos.
- En la evaluación de seguridad del sitio, todos cuentan con un certificado digital en su página de ingreso de datos del cliente, por lo general *Verisign* y protocolo HTTPS. Sin embargo, muy pocos bancos cuentan con un teclado virtual y que sea aleatorio, algo de suma importancia al ingresar a estos sitios web en lugares públicos.
- Al medir la eficiencia de los sitios web de banca virtual en Colombia se encontró que algunas páginas se demoran mucho en el tiempo de descarga; esta es una variable determinante del servicio del sitio web.

- En lo que respecta a la usabilidad, el 53% de los sitios web evaluados son fáciles de usar; su navegabilidad es aceptable, su página principal refleja la idea del sitio y lo que se puede hacer en él. Además, presentan alta uniformidad y permanencia de controles.
- De los puntos anteriores puede deducirse que, a partir de la lista de verificación utilizada en la evaluación heurística por expertos, se puede desarrollar un modelo genérico que permita medir y evaluar la usabilidad de mencionados sitios web. El modelo propuesto por los autores se presenta en forma detallada en la Tabla 5.

Tabla 5. Modelo de medición y evaluación de usabilidad de sitios web de banca virtual en Colombia

Institución:		
URL:		
Evaluador:		
Fecha:		
Resultado final:		
		Criterios de evaluación
40%		1. Usabilidad
	40%	1.1 Comprensibilidad global del sitio
		1.1.1 Esquema de organización global
		1.1.1.1 Mapa del sitio
		1.1.1.2 Índice global (por temas, etc.)
		1.1.1.3 Tabla de contenidos
		1.1.2 Calidad en el sistema de etiquetado
		1.1.2.1 Etiquetado textual
		1.1.2.2 Etiquetado con íconos
		1.1.3 Visita guiada
		1.1.3.1 Visita convencional
		1.1.3.2 Visita virtual (con tecnología VR)
		1.1.4 Página principal
		1.1.4.1 Navegabilidad de la página principal
		1.1.4.2 Impacto de la página principal
		1.1.4.2.1 ¿La página principal refleja la idea del sitio?
		1.1.4.2.2 ¿La página principal deja claro qué puedo hacer en el sitio?
		1.1.4.2.3 ¿La página principal se ve bien al deshabilitar las imágenes?
		1.1.5 Consistencia de la navegación
	10%	1.2 Mecanismos de ayuda y retroalimentación en línea
		1.2.1 Calidad de la ayuda

Continúa

		1.2.1.1 Ayuda explicatoria acerca del sitio
		1.2.1.2 Ayuda de la búsqueda
		1.2.2 Indicador de última actualización
		1.2.2.1 Global (de todo el sitio web)
		1.2.2.2 Restringido (subsito o página)
		1.2.2.3 Por noticias (sólo últimas noticias)
		1.2.3 Directorio de enlaces
		1.2.3.1 Enlaces a sitios de interés
		1.2.3.2 Enlaces a asociaciones de interés
		1.2.4 Facilidad FAQ
	10%	1.3 Aspectos de interfaces y estéticos
		1.3.1 Cohesión al agrupar los objetos de control principales
		1.3.2 Permanencia y estabilidad en la presentación de los controles principales
		1.3.2.1 Permanencia de controles directos
		1.3.2.2 Permanencia de controles indirectos
		1.3.2.3 Estabilidad
		1.3.3 Preferencia estética
		1.3.4 Uniformidad en el estilo del sitio
	10%	1.4 Misceláneas
		1.4.1 Soporte a lenguaje extranjero
		1.4.2 Descarga de contenidos
		1.4.2.1 Descarga de contenidos a multidispositivo
		1.4.2.2 Descarga de contenidos
		1.4.3 Intrusión publicitaria
	15%	1.5 Usabilidad de los textos
		1.5.1 Textos adaptados para la web
		1.5.1.1 Textos breves
		1.5.1.2 Textos escaneables
		1.5.1.3 Estilo de escritura conciso
	15%	1.6 Clasificación de la información
		1.6.1 Categorías
		1.6.1.1 Claridad de las categorías
		1.6.1.2 Cohesión de las categorías
	5%	2. Accesibilidad
	70%	2.1 Accesibilidad para usuarios con discapacidades
		2.1.1 Discapacidades visuales
		2.1.1.1 Posibilidad de modificar el tamaño de las fuentes
		2.1.1.2 Combinaciones de color (para usuarios con ceguera al color)

Continúa

		2.1.1.3 <i>Markup</i> claro para poder ser leído por un lector de pantalla
		2.1.1.4 Etiquetas ALT en todas las imágenes
		2.1.2 Discapacidades auditivas
	10%	2.2 Acceso a navegadores no gráficos
	10%	2.3 Acceso con anchos de banda baja o módem
	10%	2.4 Acceso multidispositivo
5%		3. Funcionalidad
	50%	3.1 Aspectos de búsqueda
		3.1.1 Mecanismo de búsqueda en el sitio
		3.1.1.1 Búsqueda restringida (por secciones)
		3.1.1.2 Búsqueda global
		3.1.2 Búsqueda siempre disponible
	50%	3.2 Aspectos de navegación y exploración
		3.2.1 Navegabilidad local (de subsitio)
		3.2.1.1 Nivel de interconexión
		3.2.1.2 Orientación
		3.2.1.2.1 Indicador del camino
		3.2.1.2.2 Etiqueta de la posición actual
		3.2.2 Navegabilidad global
		3.2.2.1 Acoplamiento entre subsitios
		3.2.3 Objetos de control navegacional
		3.2.3.1 Permanencia y estabilidad en la presentación de los controles contextuales
		3.2.3.1.1 Permanencia de los controles contextuales
		3.2.3.1.2 Estabilidad
		3.2.3.2 Nivel de desplazamiento
		3.2.3.2.1 Desplazamiento vertical
		3.2.3.2.2 Desplazamiento horizontal
		3.2.4 Predicción navegacional
		3.2.4.1 Enlace con título (enlace con texto explicatorio)
		3.2.4.2 Calidad de la frase del enlace
		3.2.5 Visualización y soporte en diferentes navegadores
		3.2.5.1 <i>Internet Explorer 7.0</i>
		3.2.5.2 <i>Mozilla Firefox 2.0</i>
		3.2.5.3 <i>Nestcape Browser 8.1.2</i>
		3.2.5.4 <i>Avant Browser 11.0 Build 46</i>
		3.2.5.5 <i>NetCaptor Pro 7.5.4</i>
		3.2.5.6 <i>Opera 9.10</i>
		3.2.6 Funciones misceláneas y específicas del dominio

Continúa

10%		4. Contenidos
	10%	4.1 Información de productos
		4.1.1 Portafolio electrónico de servicios
		4.1.2 Cuentas corrientes
		4.1.2.1 Clases o tipo de cuentas
		4.1.2.2 Beneficios al cliente
		4.1.2.3 Consulta de saldos (extracto por fechas)
		4.1.2.4 Costos y comisiones
		4.1.3 Cuentas de ahorro
		4.1.3.1 Clases o tipo de cuentas
		4.1.3.2 Beneficios al cliente
		4.1.3.3 Consulta de saldos (extracto por fechas)
		4.1.3.4 Costos y comisiones
		4.1.4 Préstamos
		4.1.4.1 Clases y tipos de préstamos
		4.1.4.2 Beneficios al cliente
		4.1.4.3 Reglamentos
		4.1.4.4 Consulta de saldos (extracto por fechas)
		4.1.4.5 Costos y comisiones
		4.1.5 Depósitos a término fijo (CDT)
		4.1.5.1 Clases y tipos de CDT
		4.1.5.2 Beneficios al cliente
		4.1.5.3 Reglamentos
		4.1.5.4 Consulta de saldos (extracto por fechas)
		4.1.5.5 Costos y comisiones
		4.1.6 Comercio exterior
		4.1.6.1 Compra y venta de divisas
		4.1.6.2 Traslados de dinero al exterior
		4.1.6.3 Reglamentos
		4.1.6.4 Costos y comisiones
		4.1.7 Otros servicios
		4.1.7.1 Pagos de tarjeta de crédito
		4.1.7.2 Pagos de cartera
		4.1.7.3 Pagos de servicios públicos e impuestos
		4.1.7.4 Compra de cartera
		4.1.7.5 Compra de tarjeta de crédito
	20%	4.2 Solicitud o apertura de productos
		4.2.1 Cuentas corrientes

Continúa

		4.2.2 Cuentas de ahorro
		4.2.3 Préstamos
		4.2.4 Depósitos a término fijo
		4.2.5 Banca virtual
		4.2.6 Transacciones entre bancos (ACH)
		4.2.7 Transacciones PSE (pago de servicios electrónicos)
		4.2.8 Transacciones entre cuentas del mismo banco
		4.2.9 Compra en línea de chequeras
		4.2.10 Inscripción de pago de servicios
	20%	4.3 Ejecución de transacciones
		4.3.1 Transferencias entre cuentas del mismo banco
		4.3.2 Transferencias a cuentas de otros bancos (ACH)
		4.3.3 Pagos PSE
		4.3.4 Consulta detallada y pagos de tarjeta de crédito
		4.3.5 Avances de tarjeta de crédito a una cuenta corriente o de ahorros
		4.3.6 Pagos de créditos con débito a cuenta
		4.3.7 Pagos de las principales facturas de servicios públicos
		4.3.8 Pago de impuestos (predial, aduaneros o nacionales)
		4.3.9 Actualización en línea de datos del cliente
		4.3.10 Bloqueo de tarjetas (crédito y débito)
	10%	4.4 Simuladores en línea
		4.4.1 Simulador de créditos
		4.4.1.1 Créditos de libre destinación u ordinarios
		4.4.1.2 Créditos por libranza
		4.4.2 Simulador de depósitos a término fijo
		4.4.3 Otros simuladores
	10%	4.5 Información económica
		4.5.1 Información diaria de TRM (actual y día anterior), DTF, UVR (actual y día anterior)
		4.5.2 Tasas de compra de tarjeta de crédito
		4.5.3 Porcentajes de rendimiento
		4.5.3.1 Cuenta corriente remunerada
		4.5.3.2 Cuenta de ahorros
		4.5.3.3 Depósitos a término fijo
		4.5.4 Tasas de créditos de préstamos o tarjeta de crédito
	10%	4.6 Información de contacto del banco
		4.6.1 Ubicación de oficinas
		4.6.1.1 Cómo llegar (transportes, distancias, etc.)

Continúa

		4.6.1.2 Mapa geográfico
		4.6.1.3 Mapa interno
		4.6.2 Contacto con responsables/asesores
		4.6.2.1 Nombre
		4.6.2.2 Correo
		4.6.2.3 Teléfono
		4.6.2.4 Fax
		4.6.2.5 Chat
10%		4.7 Información para clientes nuevos
		4.7.1 Claridad de misión y visión
		4.7.2 Historia
		4.7.3 Reglamento
10%		4.8 Información para clientes potenciales
		4.8.1 ¿Por qué deben elegir este banco?
		4.8.2 Claridad de misión y visión
		4.8.3 Información geográfica
		4.8.4 Información de contacto para obtener mas información
		4.8.5 Historia
		4.8.6 Reglamento
		4.8.7 Organización
25%		5. Confiabilidad
	30%	5.1 Ausencia de deficiencias y errores
		5.1.1 Errores de enlaces
		5.1.1.1 Enlaces rotos
		5.1.1.2 Enlaces inválidos
		5.1.1.3 Enlaces no implementados
		5.1.2 Errores o deficiencias varias
		5.1.2.1 Deficiencias o cualidades ausentes debido a diferentes navegadores
		5.1.2.2 Nodos web muertos (sin enlaces de retorno)
		5.1.2.3 Nodos destinos (inesperadamente) en construcción
		5.1.3 Enlaces externos a instituciones afines o del mismo grupo
15%		5.2 Utilización de estándares del W3C
		5.2.1 HTML
		5.2.2 CSS
35%		5.3 Seguridad del sitio
		5.3.1 Ingreso
		5.3.1.2 Por número de tarjeta, cuenta o identificación
		5.3.1.3 Clave secreta

Continúa

		5.3.1.3.1 Alfanumérica
		5.3.1.3.2 Numérica
		5.3.1.3.2.1 Con teclado virtual no aleatorio
		5.3.1.3.2.2 Con teclado virtual aleatorio
		5.3.1.3.2.3 Sin teclado virtual
		5.3.1.4 Obligatoriedad de los datos de ingreso
		5.3.2 ¿Promueve e informa sobre la utilización de certificados digitales?
		5.3.3 ¿Utiliza algún estándar de comunicaciones seguras (SSL, HTTPS,)?
		5.3.4 ¿Informa o muestra recomendaciones de seguridad?
		5.3.5 Utilización de segunda clave para aseguramiento de transacciones
		5.3.6 ¿Desconexión automática por detección de inactividad?
		5.3.7 Opciones de salida segura
	20%	5.4 Actualización periódica de la información
15%		6. Eficiencia
	60%	6.1 Accesibilidad de información
		6.1.1 Soporte a versión sólo texto
		6.1.2 Legibilidad al desactivar la propiedad imagen del navegador
		6.1.2.1 Imagen con título
		6.1.2.2 Legibilidad global
	20%	6.2 Rendimiento
		6.2.1 En la navegación entre páginas
		6.2.2 En la ejecución de transacciones monetarias
		6.2.3 En la ejecución de transacciones no monetarias
		6.2.4 En el ingreso al transaccional
		6.2.5 En la salida del transaccional
	20%	6.3 Tiempo de descarga
		6.3.1 Página de inicio
		6.3.2 Carga de la página de solicitud de usuario y clave, transaccional
		6.3.3 Generación por pantalla de movimientos diarios por producto
		6.3.4 Generación por pantalla de movimientos por rango de fechas por producto
		6.3.5 Descarga de extractos por producto
		6.3.6 Generación y descarga de comprobantes de pago
		6.3.7 Archivos disponibles en el sitio

Fuente: presentación propia de los autores.

4. Recomendaciones

- Realizar un informe producto de los resultados obtenidos en la presente medición y evaluación de usabilidad, con destino a los gerentes de tecnología de cada una de las entidades bancarias evaluadas, a fin de que se utilice para un mejor diseño del sitio web correspondiente.
- Mejorar la mayoría de los sitios web de banca virtual en Colombia, en cuanto a la utilización de los estándares del W3C y a los estándares para la interacción persona-página web, en cuanto a facilidad de uso y accesibilidad se refiere. Así mismo, es importante mejorar los tiempos de descarga de las páginas del sitio web e incluir en dichos sitios ayudas explicatorias del sitio y visitas guiadas para los clientes nuevos y potenciales de la entidad.
- Para complementar esta investigación, evaluar algunos de los sitios web presentados en esta investigación, utilizando el test de usuarios, aplicado a una muestra de clientes y no clientes de esas entidades bancarias. De esta forma se podrían evidenciar aspectos no tenidos en cuenta en el modelo propuesto.
- Evaluar todos los sitios web aquí señalados con un navegador tipo texto como *Lynx*, *Links*, *BobCat* o *W3m*, que no pudieron instalarse en las máquinas desde donde se realizó el análisis. Esta nueva evaluación permitiría verificar cómo se despliegan las páginas de los sitios evaluados en un navegador que no muestra imágenes, sino sólo texto, y de esta forma complementar el modelo de medición.

Referencias

- ARBELÁEZ, María Angélica *et al.* *Medios de pago electrónicos en Colombia. Evolución y perspectivas* [documento en línea]. 2006. <<http://www.fedesarrollo.org.co>> [Consulta: 28-02-2007].
- COMISIÓN DE REGULACIÓN DE TELECOMUNICACIONES (CRT). Internet. En *Informe semestral de internet-2005* [documento en línea]. 2006, núm. 7, <http://www.crt.gov.co/Documentos/BibliotecaVirtual/InformeInternet/Informe_Internet_diciembre_2005.pdf>. [Consulta: 27-09-2006].
- HOM, James. *Heuristic Evaluation. The Usability Methods Toolbox-Usability Methods Toolbox Contextual Design Heuristic Evaluation Inspection Inquiry usable engineering* [documento en línea]. 2003. <<http://jthom.best.vwh.net/usability>> [Consulta: 28-02-2007].
- MANCHÓN, Eduardo. *Evaluación heurística por expertos* [documento en línea]. 2003a. <<http://www.webestilo.com/guia/articulo.phtml?art=40>>. [Consulta: 25-02-2007].
- . *Tipos de evaluación* [documento en línea]. 2003b. <<http://www.webestilo.com/guia/articulo.phtml?art=39>>. [Consulta: 25-02-2007].

- MARTÍN, César. *Manual de usabilidad. Área directivos*. Alicante: Grupo DIGISOFT, s. f. 113 p.
- MÁRQUEZ, Joaquín. *Guía para evaluación experta* [documento en línea]. 2005. <http://www.jmarquez.com/documentos/jm_checklist.pdf> [Consulta: 30-04-2008].
- NIELSEN, Jakob. *How to Conduct a Heuristics Evaluation* [documento en Línea]. 1994. <http://www.useit.com/papers/heuristic/heuristic_evaluation.html> [Consulta: 28-02-2007].
- . *Designing Web Usability. The Practice of Simplicity*. Indianapolis: Peachpit Press, 1999a. 432 p. ISBN: 156205810X.
- NIELSEN, Jakob. *How to Conduct a Heuristics Evaluation* [documento en línea]. 1999b. <http://www.useit.com/papers/heuristic/heuristic_evaluation.html> [Consulta: 28-02-2007].
- y LORANGER, Hoa. *Prioritizing Web Usability*. Berkeley: New Riders Press, 2006, 432 p. ISBN 0321350316.
- NIETO, Ricardo y DUARTE, Patricia (eds.). Internet, un canal indispensable. *La Semana Económica* [documento en línea]. 2006, núm. 540, <http://www.asobancaria.com/upload/docs/docPub2941_3.pdf>. [Consulta: 28-2-2007]. ISBN 0122-6657.
- SEGOVIA, Claudio. *Accesibilidad e internet... , para que todas las personas, con distintas capacidades o recursos, puedan acceder a internet* [libro en línea]. 2007 [Argentina]: Creative Commons. <<http://www.inclusiondigital.net/albergue/accesibilidad.pdf>>. 220 p. [No disponible actualmente].
- SUPERINTENDENCIA FINANCIERA DE COLOMBIA. *Distribución de las captaciones por rango e instrumentos financieros. Consolidado a diciembre de 2005* [documento en línea]. <<http://www.superfinanciera.gov.co/Cifras/informacion/mensual/captaciones/cxr122005.xls>>. [Consulta 28-02-2007. No disponible actualmente].