

Algoritmos de Optimización en Sistemas de Transporte Vertical*

Pablo Cortés¹, Juan Larrañeta², Luis Onieva³, Jesús Muñozuri⁴, Ignacio Fernández de Cabo⁵

¹ Doctor Ingeniero Industrial, Ingeniería de Organización, Escuela Superior de Ingenieros, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla. pca@esi.us.es

² Doctor Ingeniero Industrial, Ingeniería de Organización, Escuela Superior de Ingenieros, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla. astola@us.es

³ Doctor Ingeniero Industrial, Ingeniería de Organización, Escuela Superior de Ingenieros, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla. onieva@us.es

⁴ Ingeniero Industrial, Ingeniería de Organización, Escuela Superior de Ingenieros, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla. munuzuri@esi.us.es

⁵ Ingeniero Industrial, Ingeniería de Organización, Escuela Superior de Ingenieros, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla. ignaciofdezcabo@hotmail.com

RESUMEN

El encarecimiento del suelo, especialmente en los centros de las grandes ciudades conduce a su mayor aprovechamiento mediante la construcción de elevados edificios. En estas situaciones el análisis de los sistemas de transporte vertical se convierte en una necesidad, especialmente en los grandes edificios destinados a oficinas de profesionales.

En los sistemas de transporte vertical concurren diferentes objetivos, desde el nivel de servicio ofrecido al usuario, hasta la optimización del consumo energético o la capacidad manejada por el sistema. Así son necesarias técnicas flexibles que satisfagan la mayor parte de los requerimientos deseados en función de cada tipo de edificio.

1. Introducción

El análisis sistemático del transporte vertical viene constituyéndose en los últimos años como un ámbito de investigación relevante debido al progresivo encarecimiento del suelo, especialmente en los centros de los principales núcleos urbanos, lo que hace el necesario aprovechamiento del mismo mediante la construcción de elevados edificios (la figura 1 muestra un moderno ascensor de tipo hidráulico). Hoy en día es habitual disponer varios grupos sincronizados de ascensores en los edificios destinados a usos profesionales (ya sean oficinas, hospitales, hoteles, etc.). El ensayo de modelos conducentes a lograr un funcionamiento eficiente de éstos [1] y [2], se viene mostrando como clave de investigación por parte de diversos grupos y centros de investigación tanto nacionales como internacionales.

La investigación para la incorporación de complejos algoritmos en el funcionamiento de los sistemas de ascensores es relativamente reciente en nuestro país, si bien en países en los que el coste del suelo era más elevado (como las principales ciudades de EE.UU. o Japón) se venía desarrollando desde hacía varios años, muestra de ello es la existencia de patentes en EE.UU. desde finales de los años ochenta y principios de los noventa [3], [4] y [5]. El avance de la investigación aplicada recibió desde entonces y posteriormente el impulso de las grandes compañías multinacionales [6], [7], [8] y [9]. A finales de los noventa la investigación en transporte vertical era ya una realidad y a partir de entonces se reforzaron las colaboraciones entre los centros de investigación y las compañías privadas. Así se encuentran diferentes

* Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en un proyecto de investigación en curso, financiado por la empresa MAC PUAR, S.A., titulado "Optimización Dinámica en Sistemas de Tráfico Vertical".

ámbitos de colaboración, siendo ejemplo de ello el *Systems Analysis Laboratory* de la Universidad Tecnológica de Helsinki con la KONE Corporation [10], o también el *Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik* de Berlín con Schindler [11]. En España también se comenzaba a realizar investigación orientada al mejor funcionamiento de estos sistemas, muestra de ello son el *Grupo de Transporte Vertical* de la Universidad de Zaragoza, o la colaboración que el grupo Ingeniería de Organización de la Universidad de Sevilla viene manteniendo con MAC PUAR S.A. recientemente [12].

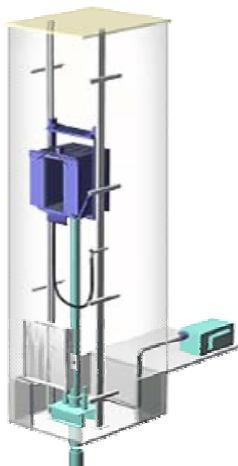


Figura 1: Ascensor hidráulico

2. Caracterización del tráfico

Al abordar un estudio sobre transporte vertical es necesario establecer una primera caracterización del problema para identificar la fase a abordar. Así es necesario determinar la familia de edificios a la que se dirige el estudio (edificios altos o bajos, y de uso profesional o vivienda, y a las subclases de estos). También hay que conocer los datos de que se dispone relativos a la identificación del patrón de tráfico en el edificio, y si este es conocido o es necesario establecerlo. Tradicionalmente se diferencia en cuatro patrones de tráfico, de especial interés, según el instante del día que caractericen:

- *Uppeak*: se refiere al tramo horario coincidente con el acceso al edificio, y por tanto se producen viajes de subida desde la planta baja.
- *Downpeak*: se refiere al tramo horario coincidente con el abandono del edificio, y por tanto se producen viajes de bajada desde las diferentes plantas a la baja.
- *Lunchpeak*: se refiere al tramo horario en el que el edificio se abandona par ir a comer, pero también se accede a él tras venir de comer, dándose una mezcla de los patrones *uppeak* y *downpeak*.
- *Interfloor*: se refiere al resto de tramos horarios donde existe la probabilidad de viajes entre plantas (este patrón sólo se produciría en edificios destinados a uso profesional y en ese tramo horario específico)

A modo de ilustración, la figura 2 representa una evolución típica del patrón de tráfico *uppeak* para un edificio destinado a uso profesional.

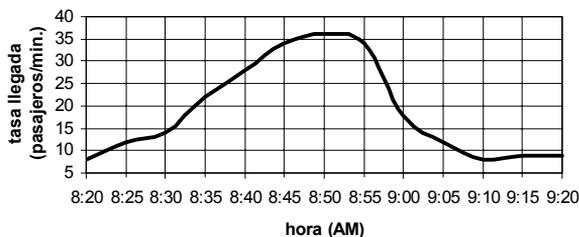


Figura 2: Tasa típica de llegadas en periodo *uppeak*

La determinación de los patrones de tráfico resulta un problema de elevada dificultad en sí mismo. Tradicionalmente se han empleado, bien los datos procedentes de macro-encuestas realizadas por centros de investigación de reconocido prestigio como los realizados por el CIBSE (*The Chartered Institution of Building Services Engineers*) y por el BRE (*Building Research Establishment*), bien estimaciones de tráfico mediante métodos de diferente grado de sofisticación.

Entre estos métodos se puede citar como más representativos el *Método manual usando observadores* de fácil implementación pero que se hace impracticable en el momento en el que el tráfico es denso y se convierte en imposible para un observador humano. El *Método S-P Inverso* que estima el número de pasajeros que usan el ascensor, basándose en el número de llamadas y en los movimientos del mismo (este método demuestra efectividad durante los periodos *uppeak* y *downpeak*). Otro método alternativo es el de la *Estimación del flujo de tráfico completo de Peters* [13], que proporciona los datos de tráfico mediante procedimientos basados en cálculos estadísticos, mediante el establecimiento de los intervalos de tiempo en los que el tráfico es más intenso. Como más avanzado en cuanto a grado de sofisticación se puede citar el *Modelo de reconocimiento del patrón de tráfico mediante reglas de lógica difusa* que se basa en ocho patrones de tráfico y se aplica en el *Fuzzy Elevator Group Control System*. También, el *Modelo de predicción del patrón de tráfico mediante redes neuronales* [14] trata de acoplar una red neuronal en el sistema de control de un grupo de ascensores para mejorar la actuación del controlador del grupo. Así, se trata de que la red neuronal proporcione un mecanismo de aprendizaje dinámico del comportamiento del edificio y realice la predicción de futuros eventos basándose en lo que ha aprendido a lo largo del tiempo.

También es importante señalar y establecer los dispositivos tecnológicos de que dispondrá el sistema de transporte vertical. Así hoy en día es factible tecnológicamente y habitual la instalación de infrarrojos y básculas digitales de peso que aportan datos adicionales que pueden ser usados por el algoritmo de funcionamiento de la maniobra del ascensor. También se viene trabajando, a nivel de investigación, en la instalación de radares detectores de personas (como por ejemplo el dispositivo PIR 30) y en menor grado de desarrollo cámaras de visión por computador, los cuales aportarían datos muy interesantes para el desarrollo de algoritmos. La figura 3 muestra un radar para la detección de pasajeros, y en la figura 4 un pesacargas electrónico.

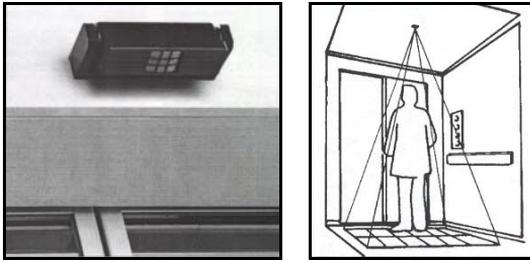


Figura 3: Radar detector de movimiento.



Figura 4: Pesacargas electrónico.

Una vez se ha establecido el patrón de tráfico así como los dispositivos tecnológicos a instalar en el sistema, estos se convierten en datos que alimentan tanto a los modelos de optimización como de simulación.

3. Restricciones del problema

Para los modelos de optimización es necesario definir tanto el conjunto de restricciones asociado al problema, como la función o funciones objetivo a considerar. Dentro del apartado de las restricciones, éstas se pueden dividir en dos grandes grupos: restricciones generales y restricciones particulares, y el primero de ellos a su vez en restricciones explícitas y restricciones implícitas.

En cuanto a las restricciones generales explícitas es habitual considerar las siguientes:

- Una cabina sólo puede servir una llamada en cada instante.
- El número máximo de pasajeros que se pueden servir es la capacidad de la cabina.
- Un ascensor no puede parar en una planta a menos que un pasajero quiera subir o bajar del mismo
- Un ascensor no puede parar en una planta a recoger pasajeros si ya hay otro ascensor parado en esa planta

En cuanto a las restricciones generales implícitas se suelen considerar:

- Las llamadas realizadas dentro de un ascensor siempre se sirven secuencialmente en la dirección del mismo, es decir, éste no podrá saltarse ninguna planta de destino de un pasajero.
- Un ascensor no cambia de dirección mientras lleve pasajeros a bordo, es decir, hasta que no haya servido a todos los pasajeros.

- Los ascensores no aceptan llamadas desde el ascensor en la dirección contraria a la de viaje, es decir, los pasajeros no deberían poder acceder a un ascensor que viaje en dirección contraria a su planta destino.
- Teniendo la posibilidad de subir o bajar, el ascensor siempre preferirá subir

Finalmente las restricciones particulares dependen de las condiciones específicas del edificio. Aquí se puede incorporar un gran número de restricciones entre las que se encuentran habitualmente:

- Servir con una cabina vacía o con pocos pasajeros a algunas plantas específicas
- Reducir los tiempos de espera en determinadas plantas con preferencia
- Opción de sacar un ascensor fuera del grupo para viajes especiales
- Disponer de, al menos, un ascensor para el transporte de mercancías, o para el servicio a minusválidos

La consideración de unas u otras restricciones condicionará la definición de los algoritmos de optimización, y por tanto de las soluciones obtenidas de estos.

4. Criterios de Optimización

Por último el problema de optimización se cierra fijando los criterios de optimización, así estos se formalizan atendiendo al funcionamiento global del sistema o el nivel de servicio al usuario.

En cuanto al funcionamiento global del sistema se citan como criterios:

- Minimizar el consumo energético del sistema. El cual se produce principalmente en el arranque del ascensor.
- Maximizar la capacidad manejada global del grupo de ascensores (volumen de viajeros transportados).

En cuanto al nivel de servicio ofrecido al usuario:

- Minimizar el tiempo medio de espera de los pasajeros (recogiéndose el tiempo de espera en cola). No necesariamente tiene porque ser una función lineal.
- Minimizar el porcentaje de largas esperas en planta (por ejemplo penalizando aquellas esperas superiores a un minuto).
- Minimizar el tiempo medio de viaje de todos los pasajeros (recogiéndose el tiempo de viaje del pasajero).
- Minimizar el tiempo medio de sistema de los usuarios (que incluye la suma de tiempo medio de espera y tiempo medio de viaje).

5. Algoritmos de optimización

Tradicionalmente como algoritmos de optimización se han implementado reglas de despacho en la maniobra, que son un conjunto de secuencias lógicas gobernadas por comandos del tipo IF-ELSE. Así de entre las reglas despacho clásicas se encuentran, para el caso de un ascensor, el método simple o universal que sólo responde cuando el ascensor se encuentra libre y es el más antiguo; o los métodos colectivos/selectivos en bajada y/o subida que recogen pasajeros en la dirección de viaje. Cuando se instalan grupos de dos o tres ascensores (simplex/duplex) se acude a sistemas basados en el algoritmo THV el cual envía a la llamada de planta a aquel ascensor más cercano a la planta que se encuentre en la dirección adecuada.

En este sentido es importante señalar que el tipo de botoneras a instalar en cada planta depende de si en el registro de llamadas se tiene en cuenta la dirección de viaje de la llamada o no. Por tanto, las necesidades de botoneras son (ver figura 5):

- de subida y bajada.
- de un solo botón.

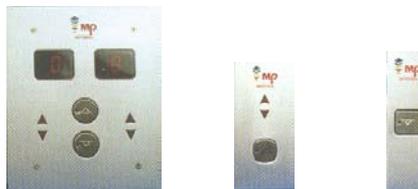


Figura 5: Tipo de botoneras

La consideración de métodos más avanzados permite alcanzar soluciones con mejores rendimientos. La Programación Dinámica [15] es la primera opción. El algoritmo *Optimal Routing* de Programación Dinámica determina el mejor ascensor para la llamada comenzando por la llamada más lejana en la dirección de viaje. Así la asignación empieza por la llamada más baja y continua hasta la más alta, asignándose todas las peticiones a los mejores ascensores. Una versión mejorada es el algoritmo de asignación dinámica de llamadas adaptativo *Dynamically Adaptive Call Allocation* (DACA), en éste el registro de una nueva llamada hace comenzar el proceso de asignación, siendo este el momento de la decisión. El tráfico de pasajeros se simula durante algunos minutos tras el momento en que la llamada ha sido servida. Se utiliza junto a un algoritmo de control adaptativo, *Adaptive Call Allocation* (ACA) que se utiliza en la asignación de las futuras llamadas para reducir el número de alternativas de decisión, reservándose la llamada existente para el ascensor con el mínimo coste acumulado.

Recientemente se viene considerando la incorporación de elementos de Inteligente Artificial y/o metaheurísticas en los micro-controladores de la maniobra del ascensor. La Lógica Difusa se muestra como una valiosa herramienta cuando se quieren evaluar de modo flexible gran número de criterios. Así, el *Sistema de Control de Grupo de Ascensores Difuso* [16], en la parte que dedica a la estrategia de asignación de llamadas, utiliza diferentes criterios de optimización como son: el tiempo de espera hasta que el i -ésimo ascensor llega a la planta donde se produce la llamada desde su posición actual, $HCWT_i$ (*Hall Call Waiting Time*); el máximo de los $HCWT_i$ para las llamadas asignadas al i -ésimo ascensor, $maxHCWT_i$ (*maximum Hall Call Waiting Time*); la capacidad de cobertura de futuras llamadas por parte del i -ésimo ascensor, CV_i (*Coverability*); y la mínima distancia desde una nueva llamada a las llamadas asignadas al i -ésimo ascensor, GD_i (*Gathering Degree*). Por otro lado el *Controlador de Grupo de Ascensores Difuso con Adaptación Lineal al Contexto* [17] funciona igualmente con metarreglas de Lógica Difusa, pero realiza una continua adaptación del controlador a los cambios en el tráfico de pasajeros.

Dentro de los sistemas Bio-inspirados, los Algoritmos Genéticos [18] y [19] también se han ensayado con éxito. Identificando el tiempo como un sistema de eventos discretos, se pueden desarrollar dos estrategias para la asignación de llamadas de planta a ascensores: la estrategia de asignación de llamada y la estrategia de asignación de cabina. De igual forma, se pueden identificar atributos asociados a las plantas o las cabinas para la caracterización de los cromosomas de los individuos de la población genética.

También vienen desarrollándose con éxito algoritmos basados en el aprendizaje. *Neuros-I* [20] es un controlador de la firma Fujitec y comercializado en Japón, que implementa una red neuronal. El estado del grupo de ascensores y el de cada uno por separado se convierten en valores numéricos para ser usados como *inputs* de la red neuronal. El aprendizaje de la red consta de dos pasos: un aprendizaje inicial donde se crea la red y un aprendizaje adaptativo *online*. En esta última fase los pesos de las interconexiones entre neuronas se ajustan automáticamente. Para ello, se utiliza un coeficiente global de funcionamiento (tiempo medio de espera como coeficiente de evaluación), mientras se van asignando las llamadas.

Se han ensayado, también con éxito, modelos basados en *Aprendizaje Reforzado* [21]. En este caso, el sistema se modela como un sistema de eventos discretos, donde eventos significativos (como llegadas de pasajeros), suceden en tiempo discreto. Cuando un problema de decisión en tiempo continuo se trata como un sistema de eventos discretos se le denomina proceso de decisión semi-Markoviano. Con ello, se utiliza un equipo de agentes donde cada agente es responsable del control de un ascensor. Así, se disponen dos arquitecturas distintas: Una Arquitectura Paralela, donde los agentes comparten una red (RL_p , *Parallel Reinforcement Learning*), y una Arquitectura Descentralizada, donde cada agente dispone de su propia red (RL_d , *Decentralized Reinforcement Learning*)

En todo caso siempre es necesario realizar la valoración y validez de los algoritmos previamente a su implementación física real. De ahí que haya que considerar el ensayo de estos en entornos de simulación [22]. Tras la fase de simulación se pueden establecer juicios fundamentados que permitan, de acuerdo con las restricciones y limitaciones físicas del micro-controlador, el desarrollo de prototipos a partir de los cuales definir adecuados controladores de la maniobra de los ascensores.

6. Conclusión

La incorporación de reglas de despacho tradicionales puede entenderse como una buena solución para la mayoría de los ascensores de uso cotidiano. Sin embargo, conforme se incrementa la complejidad y tamaño de los edificios o de sus patrones de tráfico, estas reglas tradicionales pueden ofrecer rendimientos deficientes de funcionamiento. Para estos casos está justificada la inversión, tanto a nivel de investigación como de desarrollo, en algoritmos de control más sofisticados y eficientes en la maniobra del ascensor.

Referencias

- [1] Barney, G.C. y dos Santos, S.M. (1985) *Elevator Traffic Analysis, Design and Control*, Peter Peregrinus Ltd, 2ª edición, Londres.
- [2] Miravete, A. y Larrode, E. (1996) *El libro del Transporte Vertical*, Universidad de Zaragoza.
- [3] MacDonald, C. Robert y Abrego, E. (1988) *Coincident call optimization in a elevator dispatching system*, Westinghouse Electric Corp. U.S. Patent No. 4 782 921.
- [4] Thangavelu y Kandasamy. (1989) *Queue based elevator dispatching system using peak period traffic prediction*, Otis Elevator Company. U.S. Patent No. 4 838 384.
- [5] Thangavelu y Kandasamy. (1993) *"Artificial intelligence", based learning system predicting "peak-period" times for elevator dispatching*, Otis Elevator Company, U.S. Patent No. 5 241 142.
- [6] Kameli, N. y Nader. *Floor population detection for an elevator system*, Otis Elevator Company. U.S. Patent No. 5 511 635, 1996.

- [7] Kameli, N., Nader, Collins y James, M. (1996). *Elevator downpeak sectoring*, Otis Elevator Company. U.S. Patent No. 5 480 006.
- [8] Kim, C. y Jeong, O. (1997) *Group management control method for elevator system employing traffic flow estimation by fuzzy logic using variable value preferences and decisional priorities*, LG Industrial Systems Co., Ltd. U.S. Patent No. 5 679 932.
- [9] Bahjat, S. Zuhair y Bittar, J. (1992) *Automated selection of high traffic intensity algorithms for up-peak period*, Otis Elevator Company. U.S. Patent No. 5 168 133.
- [10] Siikonen, M-L. (1997) *Elevator group control with artificial intelligence*, Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory, Research Reports A67.
- [11] Hauptmeier, D., Krumke, S.O. y Rambau, J. (1999) *The online dial-a-ride problem under reasonable load*, Preprint SC 99-08, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (1999).
- [12] Larrañeta, J. y Cortés, P. (2001) *Optimización Dinámica en Sistemas de Tráfico Vertical*. AICIA Technical Report IO-01MP
- [13] Peters, R., Mehta, P. y Haddon, J. (2000) "Lift Passenger Traffic Patterns: Applications, Current Knowledge and Measurement", *Elevator World*, Septiembre, pp. 87-94.
- [14] Imrak, E. y Barney, G.C. (2000) "Application of neural networks on traffic control", *Lift Report*, Vol. 2000, pp. 34-37.
- [15] Siikonen, M-L. (1997) *Planning and control models for elevators in high-rise buildings*, Ph.D. Thesis, Helsinki University of Technology.
- [16] Kim, C., Seong, K.A. y Lee-Kwang, H. (1998) "Design and implementation of a fuzzy elevator group control system" en *Proceedings of the IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 28, No. 3, pp. 277-287.
- [17] Gudwin, R., Gomide, F. y Netto, M.A. (1998) "A Fuzzy Elevator Group Controller with Linear Context Adaptation" en *Proceedings of FUZZ-IEEE98, WCCI'98 - IEEE World Congress on Computational Intelligence*, Anchorage, Alaska, USA, pp. 481-486.
- [18] Gudwin, R. y Gomide, F. (1994) "Genetic Algorithms and Discrete Event Systems: An Application" en *Proceedings of The First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence*, Vol II, pp. 742-745.
- [19] Alander, J.T., Ylinen, J. y Tyni, T. (1995) "Elevator Group Control Using Distributed Genetic Algorithm" en *Proceedings of the Elevator International Conference*. Springer-Verlag, Vienna, Austria, pp. 400-403.
- [20] Sasaki, K., Markon, S. y Makagawa, M. (1996) "Elevator Group Supervisory Control System Using Neural Networks", *Elevator World*, Marzo, pp. 23-29.
- [21] Crites, R.H. y Barto, A.G. (1996) "Improving elevator Performance Using Reinforcement Learning" en *Advances in Neural Information Processing Systems 8*. MIT Press.
- [22] Siikonen, M-L. (1993) "Elevator traffic simulation", *Simulation*, Vol. 61, No. 4, pp. 257-267.