

## Algoritmos para la Asignación de Llamadas en Sistemas de Tráfico Vertical Selectivo en Bajada\*

Pablo Cortés<sup>1</sup>, Juan Larrañeta<sup>2</sup>, Luis Onieva<sup>3</sup>, Jesús Muñozuri<sup>4</sup> y José Guadix<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Doctor Ingeniero Industrial, Ingeniería de Organización, Escuela Superior de Ingenieros, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla. [pca@esi.us.es](mailto:pca@esi.us.es)

<sup>2</sup> Doctor Ingeniero Industrial, Ingeniería de Organización, Escuela Superior de Ingenieros, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla. [astola@us.es](mailto:astola@us.es)

<sup>3</sup> Doctor Ingeniero Industrial, Ingeniería de Organización, Escuela Superior de Ingenieros, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla. [onieva@esi.us.es](mailto:onieva@esi.us.es)

<sup>4</sup> Doctor Ingeniero Industrial, Ingeniería de Organización, Escuela Superior de Ingenieros, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla. [munuzuri@esi.us.es](mailto:munuzuri@esi.us.es)

<sup>5</sup> Ingeniero Industrial, Ingeniería de Organización, Escuela Superior de Ingenieros, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla. [guadix@esi.us.es](mailto:guadix@esi.us.es)

### RESUMEN

*El transporte vertical viene configurándose como un ámbito de investigación relevante debido al progresivo encarecimiento del suelo, así como a la búsqueda de eficiencia energética en el funcionamiento de los sistemas de ascensores. En este trabajo se analiza la casuística de un sistema de tráfico vertical selectivo en bajada en un edificio de uso residencial. Se presenta un algoritmo que evalúa el historial del sistema así como la próxima evolución prevista, el cual permite obtener ventajas comparativas frente a reglas de despacho tradicionales tales como el THV-Duplex.*

**Palabras clave:** Tráfico vertical, ascensor, algoritmo, selectivo en bajada.

### 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. Hoy en día es habitual disponer varios grupos sincronizados de ascensores en los edificios destinados a usos profesionales (ya sean oficinas, hospitales, hoteles, etc.). De igual forma para edificios destinados a usos residenciales se viene instalando, cada vez más, este tipo de sistemas. 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 hace varios años, muestra de ello es la existencia de patentes en EE.UU.

---

\* Este trabajo forma parte del proyecto de investigación ref. DPI2002-01264 dentro del Plan Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

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 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, y también la colaboración que el grupo Ingeniería de Organización de la Universidad de Sevilla viene manteniendo con MAC PUAR S.A. recientemente [12].

En el trabajo que aquí se presenta, se analiza la casuística de un sistema de tráfico vertical selectivo en bajada en un edificio de uso residencial. Los sistemas de tráfico vertical selectivo en bajada responden a botoneras que registran las llamadas desde planta asumiendo que estas son llamadas de pasajeros que pretenden bajar. En este caso es habitual instalar cuadros de llamada de un solo botón (ver Figura 1).



Figura 1: Botonera de sistema selectivo en bajada

La estructura del trabajo sigue con la presentación de las características principales de este tipo de sistema de Tráfico Vertical en el apartado segundo. Posteriormente se discuten los algoritmos ensayados para sistemas de tráfico vertical selectivo en bajada en el apartado tercero. En la sección cuarta se hace mención a la incorporación de elementos de control adicionales en los cuadros de maniobra de los sistemas de ascensores que permitan una mejor gestión del sistema. La sección quinta expone la arquitectura del sistema. Finalmente en la última sección se extraen las principales conclusiones y se muestran futuras extensiones de este trabajo.

## **2. Sistema de Tráfico Vertical**

Para modelar el sistema de tráfico vertical es preciso definir tanto el conjunto de restricciones asociado al problema, así como la función o funciones objetivo a considerar.

### **2.1 Restricciones del sistema**

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.

## **2.2 Criterios de gestión**

Los criterios de gestión de los algoritmos ensayados deben responder a un amplio espectro de criterios. Entre estos hay que considerar los que atienden al funcionamiento global del sistema o al 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 que 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).

### **3. Algoritmos de Optimización: THV y PDCU**

Tradicionalmente como algoritmos de optimización se han implementado reglas de despacho en la maniobra. Éstas 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 (duplex/triplex) 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. Concretamente en este trabajo, se discute acerca del sistema de funcionamiento de un cuadro de maniobra selectivo en bajada (el cual se caracteriza, entre otras cosas, por una botonera externa de planta como la que se señalo en la Figura 1).

El algoritmo PDCU permite obtener resultados que mejoran implementaciones tradicionales como el citado algoritmo THV. El algoritmo PDCU recoge la información tanto pasada como presente, procedente de las llamadas de planta y cabina, para realizar una estimación futura con el objetivo de minimizar los tiempos de espera en las llamadas en planta, así como los tiempos de viaje de los pasajeros en la cabina. Se ha denominado al algoritmo con el nombre de PDCU (Programa Dinámico de Calidad de Usuario) por cuanto persigue la satisfacción del usuario minimizando los tiempos de espera tanto en el interior de la cabina como en la planta a la espera de la llegada del ascensor.

Así, el Programa Dinámico Calidad de Usuario escoge aquella opción que incluya una duración estimada de viaje menor tanto para los pasajeros en cabina (pero atendiendo también al tiempo acumulado que llevan de viaje en la cabina) como a los pasajeros que esperan al ascensor en el exterior. Por tanto ofrece la alternativa adicional del análisis del pasajero en trayecto que era olvidada por la mayoría de las reglas tradicionales de despacho. La franja temporal considerada se describe gráficamente en la Figura 2.

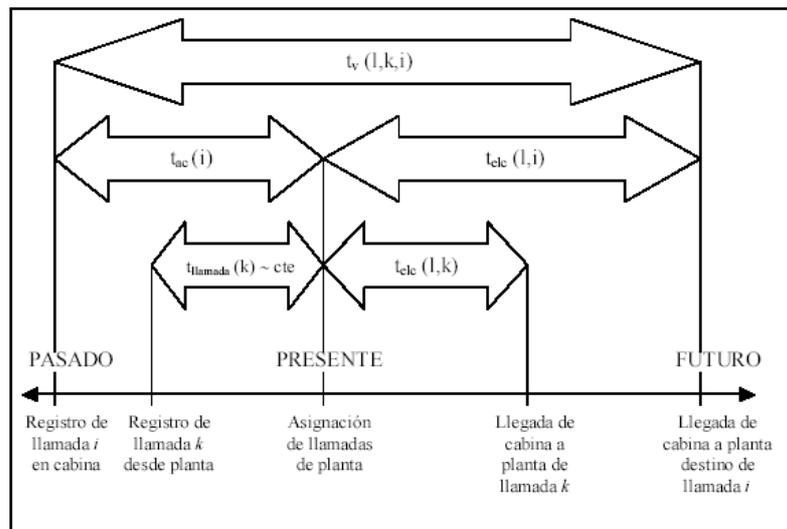


Figura 2. Estrategia de optimización del algoritmo PDCU

La incorporación de esta perspectiva es una ventaja comparativa evidente frente a algoritmos tradicionales del tipo THV-Duplex, [1] y [13], que realizan la asignación del ascensor del grupo mediante el criterio de ascensor más cercano (en términos de distancia) en la dirección del viaje.

### 3.3 Ilustración de asignación

En la Figura 3 se muestra, a modo de ilustración, un ejemplo de asignación de las llamadas de planta siguiendo los algoritmos THV y PDCU. En el sistema hay dos cabinas, teniendo la primera de ellas llamadas desde dentro de cabina a las plantas octava, segunda y sótano. La cabina viaja en dirección ascendente. La segunda cabina viaja en dirección descendente y en ella hay llamadas internas a las plantas duodécima, octava y baja. Además, hay llamadas desde los hall de las plantas séptima, quinta y baja.

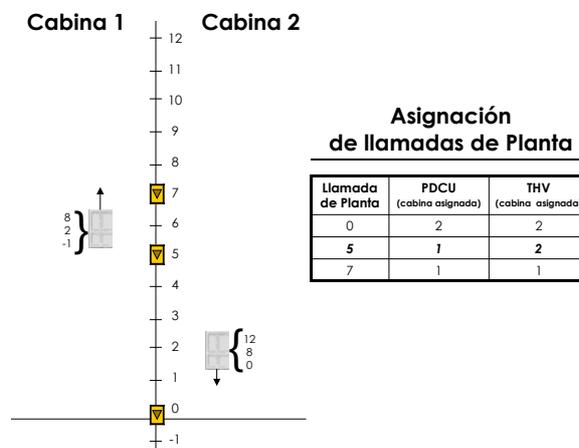


Figura 3. Ejemplo de asignación de llamadas

Según se puede observar, la diferencia se produce en la asignación de la planta quinta. El algoritmo PDCU asigna la cabina 1, mientras que el THV asigna la cabina 2. Evidentemente resulta más adecuada la asignación del algoritmo PDCU. Así, en este caso, tras dejar al pasajero de cabina que viaja hasta la planta octava y recoger al de la séptima podrá recoger en la dirección adecuada de viaje al pasajero de la planta quinta. Por el contrario, atendiendo al algoritmo THV, la cabina 2 dejaría al pasajero de cabina que viajaba a planta baja, recogería al que aguarda en esta planta, posteriormente subiría hasta la planta duodécima y bajaría hasta la octava a dejar los pasajeros de cabina, y, sólo tras todo ello, recogería al que esperaba en la planta quinta. Sin duda es una asignación más ineficiente.

### **3.2 Discusión comparativa entre los algoritmos PDCU y THV**

El algoritmo THV no resulta apropiado para administrar situaciones críticas de tráfico como los intervalos downpeak o uppeak. Así por ejemplo, durante el downpeak, el procedimiento de asignación daría lugar a que las cabinas hicieran viajes a plantas demasiado altas del edificio, en perjuicio de las llamadas desde los niveles más bajos, dándose en este caso el mejor servicio a los niveles más altos. En un edificio de baja altura, y asumiendo que los usuarios de las plantas mas bajas utilizan más las escaleras que los ascensores, el sistema THV sería aceptable.

Para casos con solo dos cabinas, un número elevado de pisos y en los que además exista un fuerte tráfico descendente en situaciones de downpeak y lunchpeak, THV y los algoritmos Duplex tradicionales pueden ser fuertemente ineficientes. En este caso el algoritmo PDCU permite mejoras significativas en la asignación de los posibles destinos de las cabinas, al tener en cuenta todas las situaciones que se pueden dar en el tráfico del sistema, y decidir en función de los tiempos acumulados y esperados de viaje.

## **4. Elementos adicionales de control**

Con el fin de poder dar respuesta al conjunto de criterios antes señalados en la subsección 2.2, el sistema lleva a cabo la gestión mediante un conjunto de reglas IF-ELSE selectivo en bajada, incorporando adicionalmente una estrategia de control cuádruple.

Los elementos de control están especialmente diseñados para colaborar con el algoritmo de optimización de la maniobra en la gestión eficiente tanto de la calidad de servicio ofrecida al usuario (a través del tiempo de espera principalmente), como en el ahorro energético del sistema. Todos los elementos de control deben ser elementos parametrizables.

### **4.1. Control de la ocupación de la cabina**

Se lleva a cabo mediante la utilización de la información procedente de la báscula pesacargas incorporada al sistema. La Figura 4 ilustra diferentes tipos de pesacargas en la Industria.

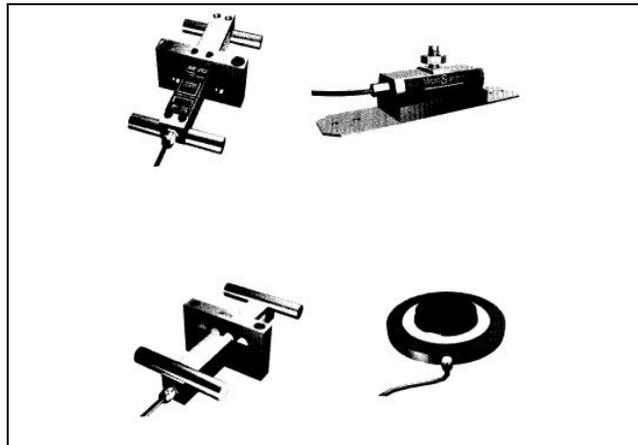


Figura 4. Modelos de pesacargas

#### 4.2. Control del tráfico del tipo de tráfico

Se lleva a cabo mediante la utilización del reloj del sistema. El tipo de tráfico se ajusta mediante el fichero de datos históricos procedentes de la báscula pesacargas. Se consideran tres tipos de tráfico [14]: *downpeak*, cuando el tráfico dominante es en la dirección descendente; *uppeak*, cuando el tráfico dominante es en la dirección ascendente; y *lunchpeak*, cuando existe fuerte tráfico tanto en dirección ascendente como descendente. La Figura 5 ilustra lo descrito.

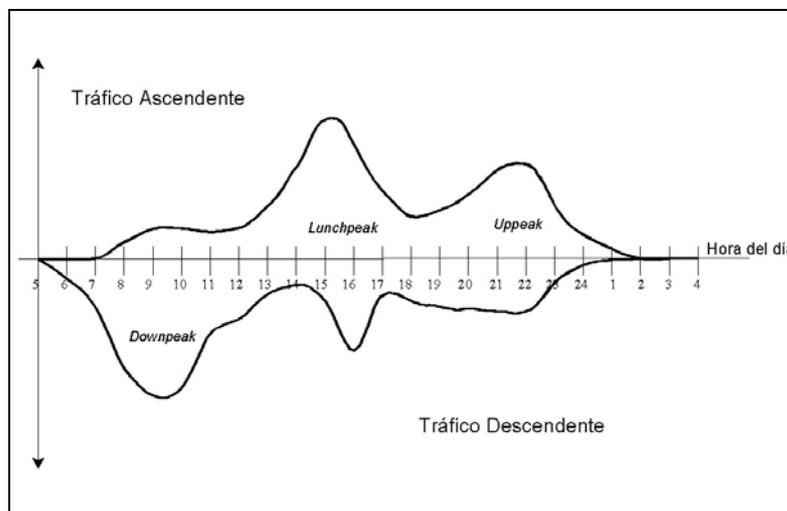


Figura 5. Factor de forma del tráfico en un edificio de viviendas

En estas situaciones se considera que la fase *uppeak* se dividen en dos grados:

- *Uppeak suave* (incluyendo *lunchpeak*). Se envía un ascensor a planta baja a recoger pasajeros.
- *Uppeak fuerte*. Se envían los dos ascensores a planta baja a recoger pasajeros.
- *Downpeak*. No se actúa, manteniendo el ascensor en puntos intermedios del edificio.

### 4.3 Ahorro energía

Adicionalmente es aconsejable la incorporación de un sistema de control de ahorro energético (si bien este sistema puede repercutir negativamente en los tiempos de viaje del sistema). El principal consumo energético se produce en el arranque de las cabinas. Por ello, el control de ahorro energético se activa cuando una de las cabinas se encuentra parada. De esta forma habrá que contemplar la opción de arrancar la cabina parada (con el consiguiente gasto energético, pero el posible aumento de los tiempos de espera), con la opción de que sirva la llamada la cabina en movimiento (con efectos contrarios).

Para ello se tiene en cuenta la evolución del grado de irritación frente al tiempo esperado que adquiere una forma de tipo fuertemente creciente. Este efecto se contempla mediante la evaluación de una función de *spiess* (ver Figura 6). En esta situación se realiza un control del tiempo de espera absoluto y un control de tiempo de espera relativo (como el cociente entre la espera a la cabina parada y a la cabina en movimiento).

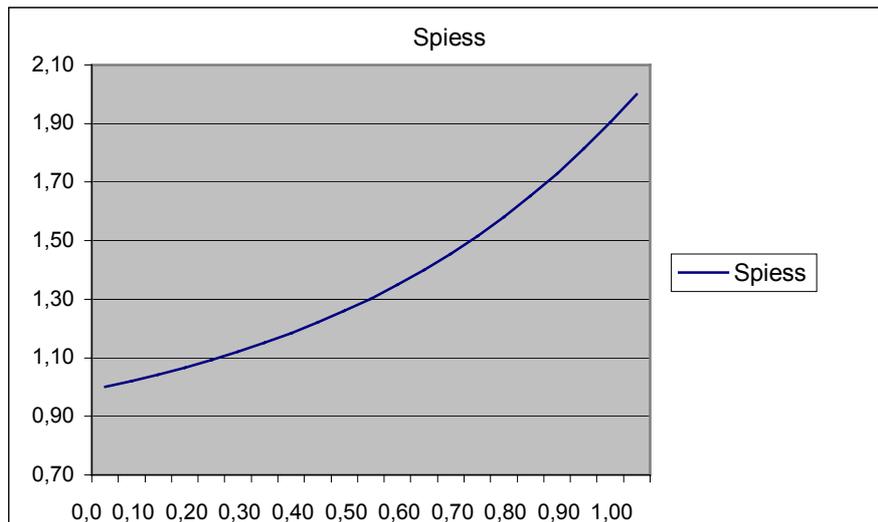


Figura 6. Nivel de irritación en función del tiempo de espera

### 4.4. Control de esperas máximas

Se considera una opción de control para tiempos de espera máximos. Para ello se incorpora una variable que acumula el tiempo de espera asociada a cada llamada de planta. En caso de que se supere un valor establecido se envía una cabina expresa a la planta.

### 4.5. Actuaciones de los elementos de control

La Tabla 1 recoge los principales criterios de gestión sobre los que actúa cada uno de los controles adicionales que se han añadido a las rutinas de control del sistema de maniobra.

	Control de ocupación de la cabina	Control de situaciones críticas de tráfico	Control de ahorro energía	Control de situaciones de espera máximos
Criterios de gestión sobre los que actúa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Minimizar el consumo energético del sistema.</li> <li>- Minimizar el tiempo medio de espera de los pasajeros.</li> <li>- Minimizar el tiempo medio de viaje de todos los pasajeros.</li> <li>- Minimizar el tiempo medio de sistema de los usuarios.</li> <li>- Optimizar la asignación de llamadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Minimizar el tiempo medio de espera de los pasajeros.</li> <li>- Minimizar el tiempo medio de viaje de todos los pasajeros.</li> <li>- Minimizar el tiempo medio de sistema de los usuarios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Minimizar el consumo energético del sistema.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Minimizar el porcentaje de largas espera en planta</li> </ul>

Tabla 1. Actuaciones de los elementos de control sobre los criterios de gestión

## 5. Arquitectura del sistema

La arquitectura propuesta para el sistema se define mediante el diagrama de bloques que se expone en la Figura 7. Un controlador principal recibe la información de las variables de control de las cabinas y de las plantas. El controlador principal incluye las rutinas de control básicas, los algoritmos de optimización y los elementos de control adicionales y específicos.

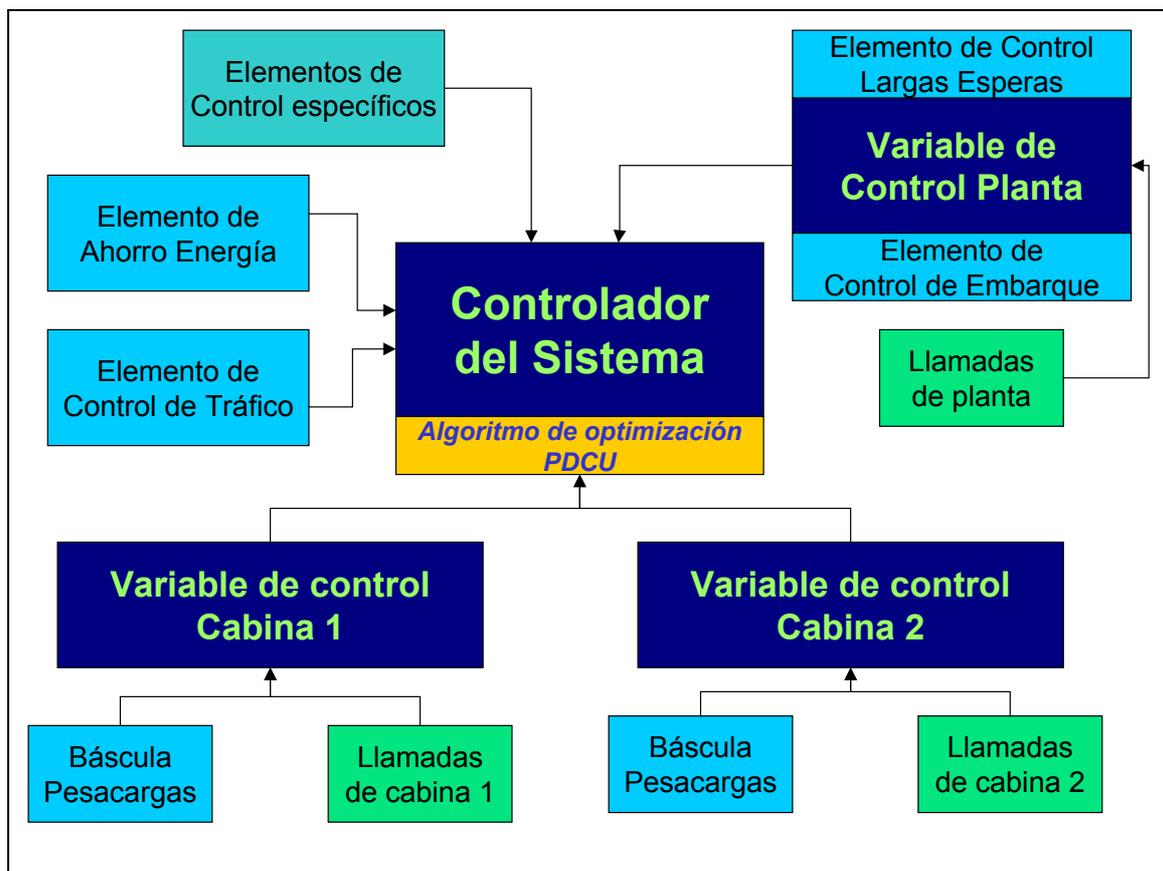


Figura 7. Arquitectura del sistema

## 6. Conclusiones y extensiones del trabajo

El empleo de algoritmos de despacho está justificado en la gestión de sistemas de tráfico vertical en edificios destinados a usos residenciales y con una densidad de vecinos de tipo media o baja. Sin embargo, el empleo de técnicas más rigurosas, que incluyan criterios de evaluación basados en la calidad de viaje percibida por el usuario permiten obtener ventajas comparativas frente a los sistemas tradicionales. Aquí se ha presentado un algoritmo que para la toma de decisión de la asignación cabina-llamada tiene en cuenta: el historial pasado en relación al tiempo de viaje de los pasajeros en cabina y los pasajeros en los hall del exterior, así como la evolución prevista de la cabina a lo largo del sistema de transporte vertical. La incorporación adicional de reglas de control heurísticas permite obtener mejores rendimientos que algoritmos de despacho tradicionales como el THV-Duplex que asignan la cabina más cercana que esté direccionada en la dirección de viaje adecuada.

La evaluación sistemática del comportamiento de los algoritmos de optimización, así como de los elementos de control que se incorporen en la maniobra del sistema, está fuertemente ligada al comportamiento de los patrones de tráfico externos. Estos movimientos de pasajeros tienen una fuerte aleatoriedad y son difícilmente predecibles por ser un entorno fuertemente dinámico. Para un análisis en profundidad es necesaria la construcción de herramientas de simulación que permitan este tipo de análisis. El grupo Ingeniería de Organización viene investigando recientemente en este ámbito, que no sólo es una extensión de este trabajo sino también una clave para el análisis de cualquier tipo de sistema de transporte vertical.

### Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero que la empresa MAC PUAR, S.A presta al sostenimiento económico de esta línea de investigación *Tráfico Vertical* desde el año 2000.

### 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 E. Abrego. Coincident call optimization in a elevator dispatching system, Westinghouse Electric Corp. U.S. Patent No. 4 782 921, 1988.
- [4] Thangavelu y Kandasamy. Queue based elevator dispatching system using peak period traffic prediction, Otis Elevator Company. U.S. Patent No. 4 838 384, 1989.
- [5] Thangavelu y Kandasamy. "Artificial intelligence", based learning system predicting "peak-period" times for elevator dispatching, Otis Elevator Company, U.S. Patent No. 5 241 142, 1993.
- [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 M. James. Elevator downpeak sectoring, Otis Elevator Company. U.S. Patent No. 5 480 006, 1996.
- [8] Kim, C. y O. Jeong. 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, 1997.
- [9] Bahjat, S. Zuhair y J. Bittar. Automated selection of high traffic intensity algorithms for up-peak period, Otis Elevator Company. U.S. Patent No. 5 168 133, 1992.
- [10] Siikonen, M-L. Elevator group control with artificial intelligence, Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory, Research Reports A67 (1997).
- [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] Cortés, P. y Larrañeta, J. Optimización Dinámica en Sistemas de Tráfico Vertical, Universidad de Sevilla, Grupo Ingeniería de Organización, Technical Report IO-01MP (2001).
- [13] Cortés, P., Larrañeta, J., Onieva, L., Muñuzuri, J. y Fernández de Cabo, I. (2002) Algoritmos de optimización en sistemas de transporte vertical en Prado, J.C. *II Conferencia de Ingeniería de Organización*.
- [14] Peters, R., Mehta, P. y Haddon, J. (2000) "Lift Passenger Traffic Patterns: Applications, Current Knowledge and Measurement", *Elevator World*, Septiembre, pp. 87-94.