

## Optimización del despacho de llamadas mediante la inclusión de la consideración del tiempo de espera relativo

Joaquín R. Fernández Valverde<sup>1</sup>, Pablo Cortés Achedad<sup>1</sup>, Pablo Aparicio Ruiz<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Dpto. de Administración y Gestión de Empresas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla.  
[jrfv@esi.us.es](mailto:jrfv@esi.us.es), [pca@esi.us.es](mailto:pca@esi.us.es), [pabloaparicio@us.es](mailto:pabloaparicio@us.es)

**Palabras clave:** Transporte Vertical, Ascensor, Inteligencia Artificial, Lógica Difusa, Logística, Metaheurística.

### 1. Introducción a los sistemas complejos de control de grupo de ascensores

La incesante revalorización del suelo urbano y la necesidad de maximizar el aprovechamiento de éste tienen como consecuencia la construcción de rascacielos y edificios de altura cada vez mayor. En estas instalaciones el transporte vertical constituye un verdadero problema logístico. Se define éste como el desplazamiento en sentido ascendente y descendente de personas y bienes a través de las plantas de un edificio. Los medios disponibles para llevar a cabo dicho transporte son dos y complementarios: escaleras y ascensores.

El problema de la gestión del tráfico vertical consta de dos partes:

- La primera hace referencia al diseño de la instalación (número, ubicación y características de los ascensores).
- La segunda a la gestión y supervisión del funcionamiento del sistema.

Su evaluación es doble:

- Atendiendo a la cantidad (*quantity of service*) se calcula la solvencia (*handling capacity*) medida en usuarios/unidad de tiempo del sistema para comprobar si es capaz de ofrecer la capacidad de transporte necesaria.
- Desde el punto de vista de calidad de servicio (*quality of service*) se suele calcular el tiempo medio de espera de los pasajeros (*average waiting time*) como referencia.

Ambos parámetros no son totalmente independientes el uno del otro sino que existe un cierto grado de correlación entre ambos de forma que una vez alcanzado un diseño óptimo es difícil mejorar uno sin empeorar el otro.

Dentro de este contexto, el problema principal es el de despacho de llamadas, que se encuadra dentro de la categoría de problemas *NP-Hard* ya que para un instante concreto en un edificio que posee  $n$  ascensores y  $p$  llamadas de plantas existen  $n^p$  posibilidades de despacho. En sistemas corrientes, donde no se proporcionan paneles numéricos a los pasajeros para indicar el destino, la incertidumbre es muy elevada pues ni la cantidad de pasajeros de la llamada ni el destino exacto de cada uno de ellos se conoce hasta que entran en la cabina.

Además de la complejidad y el alto grado de incertidumbre el sistema de control de grupo de ascensores debe tener en cuenta las posibles llamadas de plantas futuras. Por ello todo sistema de control de grupo de ascensores acomete el despacho de llamadas atendiendo a dos aspectos principales: magnitud del cálculo (tiempo de respuesta) y tratamiento de la incertidumbre.

## 2. Sistemas de control para el despacho de llamadas

Actualmente la evolución de la tecnología y la investigación en nuevas metodologías de optimización han permitido desarrollar sistemas complejos de control de grupo de ascensores en los que es frecuente el empleo de inteligencia artificial: la utilización de metodologías como el algoritmo genético (Siikonen et al, 2002), la búsqueda tabú (Bolat et al, 2011) o el algoritmo de enjambre de partículas (Li et al, 2007) proporciona resultados de cierta calidad pero su tardanza a la hora de obtener una solución óptima no los hace apropiados del todo para este tipo de problemas donde la cuestión temporal es vital.

Otras alternativas como las redes neuronales (Liu et al, 2007) necesitan periodos largos de entrenamiento y son costosas y complejas de implementar, además se muestran incapaces de adaptarse a variaciones bruscas o imprevistas del patrón.

Aunque también existen aproximaciones heurísticas en la forma de métodos de despacho basado en árboles de decisión como el propuesto por Hamdi et al. (2007) que demuestra que mediante árboles de decisión también se puede alcanzar una solución óptima, generalmente todos los modelos implementan soluciones mediante procesos metaheurísticos. A este respecto, Kim et al. (1995) propone un método de despacho basado en el cálculo mediante lógica difusa de la proximidad de la cabina a la llamada. Para ello propone una función objetivo multicriterio que tiene en cuenta el tiempo medio de espera, la probabilidad de espera larga y la energía. También, es frecuente el empleo de algoritmos genéticos para el despacho de llamadas: Alander et al. (1995) pone de manifiesto la potencia de este algoritmo para encontrar soluciones de calidad, Cortés et al. (2003) demuestra que los tiempos medios de espera durante periodos *lunchpeak* pueden reducirse utilizando cromosomas de longitud fija.

Pero la mayoría de los métodos de despacho no atienden a criterios de servicio particulares para cada planta, sino globales para todo el sistema, sin embargo Fujino *et al.* (2003) propone un método de despacho basado en un algoritmo genético que proporciona servicios particulares para cada planta, incidiendo así en preferencias o desventajas para las llamadas según la planta. Bolat *et al.* (2011) demuestra que la búsqueda tabú no siempre es inviable desde el punto de vista computacional y que puede superar al algoritmo genético en cuanto calidad de la solución se refiere.

También existen métodos de despacho basados en redes neuronales: Kenji et al. (1996) plantea un sistemas de control basado en una red neuronal convencional mientras que Beielstein et al. (2003) propone una red neuronal optimizada por un algoritmo genético, pero excesivas simplificaciones en el modelo dejan entrever un rendimiento discreto. La principal

ventaja de estas redes es su capacidad de aprendizaje dinámica que le confiere gran adaptabilidad a todos los sistemas, sobre todo a largo plazo. La principal desventaja de las redes neuronales viene dada por su alta complejidad que dificulta y encarece en grado sumo su implementación real. Además su capacidad para adaptarse a cambios bruscos (p.e. variación repentina de la demanda de tráfico) es limitada. Para superar esta última desventaja Gu et al. (2003) propone un sistema basado en una red neuronal difusa que combina la adaptabilidad a las fluctuaciones de tráfico repentinas que proporciona el empleo de lógica difusa con la memoria a largo plazo que ofrecen las redes neuronales simples. Algunos autores como Yu et al. (2007) proponen el uso de otras metodologías híbridas como redes genéticas programables mediante un algoritmo hormiguero que facilita una convergencia rápida de la solución, solucionando el problema del coste computacional asociado a las redes genéticas programables. Mientras que en oposición a los sistemas de control centralizados Ogoshi et al. (2003) propone un método basado en agentes independientes intercomunicados que toman decisiones mediante procesos de aprendizaje también independientes y unas reglas definidas *in situ*, con el objetivo de optimizar el funcionamiento global. En el sistema los agentes (ascensores) se comunican entre sí para evitar competir por las llamadas. Otros enfoques multiagente como el desarrollado por Muñoz et al. (2008) se basan en configurar una estructura hardware programable para que el sistema de control de cada ascensor pueda implementar hasta cuatro métodos de despacho diferentes según las necesidades del tráfico. El sistema de control de grupo sólo interviene para decidir cuál de ellos debe ejecutarse, reduciendo el tráfico de datos de forma considerable pues el resto de las operaciones de selección de llamada y control de competición las lleva a cabo el sistema particular de cada cabina.

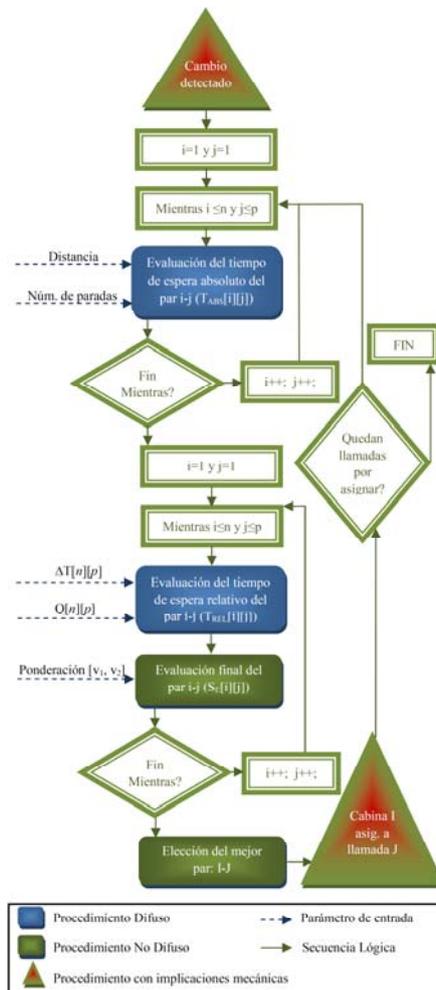
A diferencia de las anteriores metodologías mencionadas, la lógica difusa es de fácil implementación, rápida en la ejecución y por su propia definición perfecta para el tratamiento de la incertidumbre.

### 3. Principios del algoritmo de despacho basado en lógica difusa que considera el tiempo de espera relativo de cada llamada

El algoritmo de despacho de llamadas es dinámico: cada vez que se produce una nueva llamada de planta o se detecta un cambio de masa en alguna cabina, la reasignación de las llamadas es completa. Como la lógica difusa es incapaz de procesar la información en paralelo, es necesario establecer el orden de reevaluación de las llamadas de planta conforme a ciertos criterios (esto constituye una novedad en los sistemas de control basados en lógica difusa, que siempre se han limitado a optimizar únicamente la última llamada de planta producida, despreciando las ventajas una reasignación completa).

El funcionamiento es el siguiente: en un edificio o instalación con un número  $p$  de llamadas de plantas activas y  $n$  de cabinas, el algoritmo evalúa aproximadamente  $n \times p$  procedimientos difusos (donde cada uno representa la aptitud de cada cabina  $i$  a la hora de responder cada llamada de planta  $j$ ) y asigna estas llamadas de planta según un orden optimizado conforme dos criterios distintos: una valoración absoluta del tiempo de espera de la llamada y una valoración relativa del tiempo de espera de la llamada. La valoración final de cada par  $i$ - $j$  se obtiene calculando la suma ponderada, mediante el juego de pesos  $[v_1, v_2]$ , de las valoraciones del tiempo absoluta y relativa:

$$S_T [i][j] = v_1 T_{ABS} [i][j] + v_2 T_{REL} [i][j] \quad (1)$$



**Figura 1.** Diagrama de flujo que representa el despacho de un set de  $p$  llamadas de planta en un edificio.

Como el despacho es dinámico, todas las asignaciones previas a la llamada del algoritmo son descartadas, por lo que el valor inicial de los todos los parámetros es cero. La totalidad del set de  $n \times p$  procedimientos difusos ha de ser calculada completamente solo la primera vez (para la elección del primer despacho I-J). Durante las siguientes iteraciones sólo es necesario calcular de nuevo los valores de aquellos parámetros que han cambiado como consecuencia del despacho I-J seleccionado anteriormente (para reflejar el nuevo estado) pues el resto de parámetros no han cambiado de valor. Esto proporciona una velocidad de cálculo muy superior a la de los sistemas de control de grupo de ascensores basados en otras técnicas de inteligencia artificial, pues prácticamente se resuelve un problema de  $n^p$  combinaciones mediante el cálculo de poco más de  $n \times p$  posibilidades. Además esta forma de ejecución lo convierten el primer sistema de control de grupo de ascensores basado en lógica difusa que permite un despacho dinámico de las llamadas.

#### 4. Método de evaluación doble de cada opción de despacho

La **valoración absoluta del tiempo de espera** ( $T_{ABS}[i][j]$ ) estima la tiempo total de espera de la llamada  $j$  si fuese atendida por la cabina  $i$ . Depende de la posible distancia recorrida en caso

de que la cabina  $i$  atendiera la llamada  $j$  y del número de paradas de la cabina  $i$  como consecuencia de las llamadas de cabina y de planta ya asignadas a ella.

Para el cálculo de la distancia se tiene en cuenta que los ascensores siguen el método de despacho colectivo doble, de forma que sólo pueden cambiar de dirección una vez hayan atendido todas las llamadas de planta y de cabina en la dirección en la que se encuentran despachando.

Por otro lado, la **valoración relativa del tiempo de espera** ( $T_{REL}[i][j]$ ) realiza una comparativa ponderando los valores  $T_{ABS}[i][j]$  ya calculados para evaluar la aptitud de cada una de las posibles asignaciones respecto de las demás dentro del universo de despachos factibles. Depende de los parámetros  $\Delta T_{ABS}[i][j]$  y  $Q[i][j]$ :

- $\Delta T_{ABS}[i][j]$ : mide la diferencia en número de desviaciones típicas entre el tiempo de espera absoluto de la opción  $i$ - $j$  ( $T_{ABS}[i][j]$ ) y la media de todos los tiempos de espera absolutos del set completo de  $n$  cabinas si atendieran la llamada  $i$ .

$$\Delta T[i][j] = \frac{T_{ABS}[i][j] - \bar{T}_{ABS}[j]}{S_{ABS}[j]} \quad (2)$$

Donde,  $S_{ABS}[j]$  es la desviación típica y  $T_{ABS}[j]$  el tiempo medio de espera absoluto para todas las posibles asignaciones de cabina a la llamada de planta  $j$ :

$$\bar{T}_{ABS}[j] = \frac{\sum_{k=1}^n T_{ABS}[k][j]}{n} \quad S^2_{ABS}[j] = \frac{\sum_{k=1}^n (T_{ABS}[k][j] - \bar{T}_{ABS}[j])^2}{n} \quad (3)$$

- $Q[i][j]$ : Representa la calidad de la mejor alternativa a la cabina  $i$  para responder a la llamada de planta específica  $j$ . Si el par  $i$ - $j$  constituye una buena opción de despacho,  $Q[i][j]$  permite al sistema de control de grupo de ascensores cerciorarse de la existencia de alguna otra alternativa de despacho de aptitud similar de forma que si la calidad de la alternativa es buena la cabina  $i$  puede considerarse para despachar otra llamada, pues existe una buena opción para sustituirla.

$$Q[i][j] = \frac{T_{ABS}[i][j] - T'_{ABS}[l][j]}{T''_{ABS}[k][j]} \quad (4)$$

Donde  $T'_{ABS}[l][j]$  es la mejor alternativa a  $T_{ABS}[i][j]$  para una llamada  $j$  concreta y  $T''_{ABS}[k][j]$  la mejor opción de entre todas las posibilidades (incluyendo  $T_{ABS}[i][j]$ ) para una llamada concreta  $j$ .

El sistema de control de grupo de ascensores puede resolver situaciones difíciles como por ejemplo cuando no existe ninguna posibilidad de despacho óptimo para atender una llamada de planta concreta  $j$ , porque todas las posibilidades existentes conllevan un tiempo de espera considerable, pero existe una posibilidad de despacho cuyo tiempo de espera es significativamente mejor que el de las demás (aun no siendo bueno).

Mediante la medida del tiempo relativo de espera se puede asignar prioridad en el orden de despacho de las llamadas a esta posibilidad de despacho crítica (par  $i-j$ ) antes que adjudicarle otra llamada a la cabina  $i$  que podría tener como consecuencia la inviabilidad del despacho crítico mencionado (par  $i-j$ ).

De la misma forma, la evaluación combinada de los parámetros  $\Delta T[i][j]$  y  $Q[i][j]$  permiten resolver otras situaciones parecidas. Por ejemplo cuando existen más de una decisión crítica para un despacho a una planta concreta, es decir existen dos o más cabinas cuyas aptitudes para atender una llamada de planta concreta superan significativamente a las del resto de cabinas.

En este caso, mediante la evaluación conjunta de los parámetros  $\Delta T[i][j]$  y  $Q[i][j]$  es posible detectar esta situación y despachar de forma que le sea adjudicada a la llamada de planta una de las cabinas denominadas como “críticas” pero a la vez liberando a la otra de la tarea, de forma que se optimice la asignación de la cabina “crítica” teniendo en cuenta el escenario global.

## 5. Aspectos relevantes de la metodología propuesta basada en lógica difusa

### 5.1. Cálculo de las variables lingüísticas

Cada una de las dos valoraciones son estimadas de forma difusa mediante sus correspondientes variables lingüísticas. A diferencia de otros modelos (Tyni et al, 2004), no es necesario conocer *a priori* el grado de servicio del sistema (tiempo medio de espera promediado) porque las funciones de membresía dependen exclusivamente del edificio:

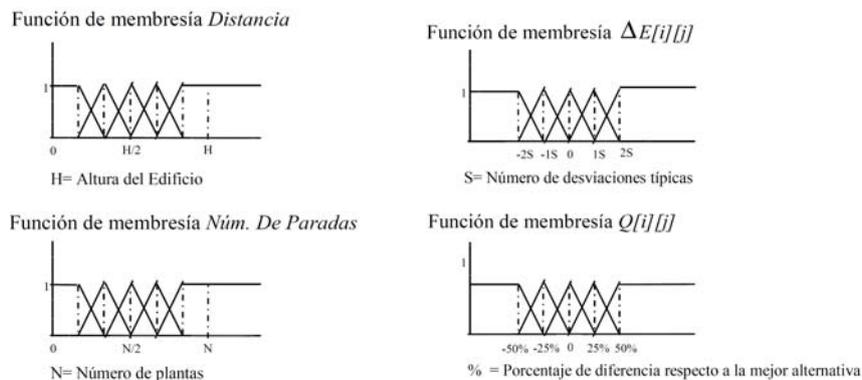


Figura 2. Funciones de membresía de las variables lingüísticas del modelo.

### 5.2. Reglas lógicas del proceso de inferencia difusa

Una vez calculados los valores de las variables difusas, el algoritmo evalúa cada opción según sus respectivos criterios definidos de acuerdo con un conjunto de reglas lógicas (p.e. Tabla 1).

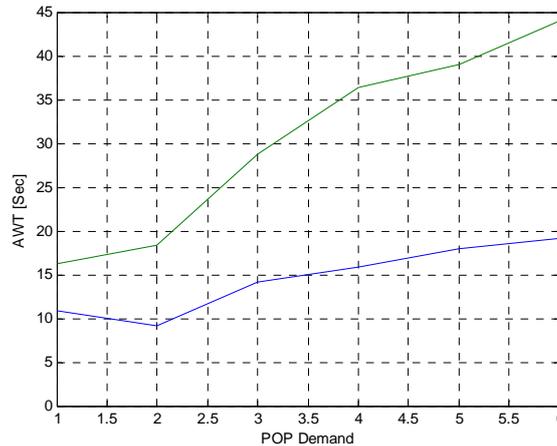
**Tabla 1.** Reglas lógicas para la evaluación del tiempo de espera absoluto

	DIST <sub>MP</sub>		DIST <sub>P</sub>		DIST <sub>MED</sub>		DIST <sub>G</sub>		DIST <sub>MG</sub>	
N <sub>MP</sub>	R <sub>1</sub>	MB	R <sub>6</sub>	MB	R <sub>11</sub>	B	R <sub>16</sub>	R	R <sub>21</sub>	R
N <sub>P</sub>	R <sub>2</sub>	MB	R <sub>7</sub>	B	R <sub>12</sub>	B	R <sub>17</sub>	R	R <sub>22</sub>	M
N <sub>MED</sub>	R <sub>3</sub>	B	R <sub>8</sub>	R	R <sub>13</sub>	R	R <sub>18</sub>	M	R <sub>23</sub>	MM
N <sub>G</sub>	R <sub>4</sub>	R	R <sub>9</sub>	R	R <sub>14</sub>	M	R <sub>19</sub>	MM	R <sub>24</sub>	MM
N <sub>MG</sub>	R <sub>5</sub>	M	R <sub>10</sub>	M	R <sub>15</sub>	MM	R <sub>20</sub>	MM	R <sub>25</sub>	MM

DIST: Posible Distancia      MP: Muy Pequeño      MM: Muy Malo  
 N: Número de paradas      P: Pequeño      M: Malo  
    MED: Mediano      R: Regular  
    G: Grande      B: Bueno  
    MG: Muy Grande      MB: Muy Bueno

## 6. Resultados

El algoritmo de despacho más implementado por las compañías del sector es el algoritmo “cabina más cercana” (*Nearest Call, NC*). Sus principales características su sencillez, fiabilidad y un tiempo de proceso pequeño. Por ello es propuesto como referencia para el algoritmo de ahorro energético desarrollado. Las simulaciones se han llevado a cabo mediante el programa de simulación de tráfico vertical ELEVATE. El edificio de muestra posee 19 plantas y ha sido diseñado para cumplir las especificaciones de transporte vertical (Barney, 2003) de manera que posee 7 ascensores para una población de 1520 trabajadores distribuidos homogéneamente entre las plantas de la instalación. Los siguientes resultados se obtuvieron para diferentes demandas (*Percentage Of Population requiring service, POP*) de tráfico interfloor:



**Figura 3.** Función que relaciona el Tiempo Medio de Espera de los Pasajeros (*Average Waiting Time, AWT*) y la demanda de tráfico vertical (*Percentage Of Population demanding service, POP*).

## 7. Conclusiones

La valoración relativa del tiempo de espera actúa como medida de las condiciones de contorno. Esto permite al sistema de control de grupo de ascensores evaluar globalmente la aptitud de las  $n$  posibilidades para responder a una llamada específica  $j$  y por extensión, evaluar la calidad de las  $n \times p$  posibilidades en general.

De hecho, la evaluación relativa afecta al orden en el que las llamadas de planta son adjudicadas: La medida de  $\Delta T[i][j]$  puede detectar si una opción  $i$ - $j$  es más ventajosa que las demás en el sentido de que supera los tiempos de espera que producirían las demás cabinas de responder a la llamada de planta  $j$  en cuestión. Y conjuntamente con  $Q[i][j]$ , el sistema de control de grupo de ascensores puede detectar si existen decisiones de despacho de importancia crítica para una llamada de planta concreta  $j$ .

## Referencias

Alander, J.T.; Ylinen, J.; Tyni, T. (1995). Elevator Group Control Using Distributed Genetic Algorithm, Proceedings of the International Conference. Springer-Verlag, Vienna, Austria, pp. 400-403.

Barney, G. (2003). Elevator traffic handbook / Spon Press. USA.

Beielstein, T.; Ewald, C.; Markon, S. (2003). Optimal elevator group control by evolution strategies, Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, Chicago.

Bolat, B.; Cortés, P. (2011). Genetic and tabu search approaches for optimizing the hall call car allocation problem in elevator group systems, Applied Soft Computing 11, pp. 1792–1800.

Cortes, P.; Larrañeta, J.; Onieva, L.; (2003). A genetic algorithm for controlling elevator group systems. Seventh internationalwork-conference on artificial and natural neural networks, pp. 313–320. Menorca, Spain.

Hamdia, M.; Mulvaney, D.J. (2007). Prioritised A\* search in real-time elevator dispatching, Control Engineering Practice, Vol. 15, Issue 2, pp. 219-230.

Kenji, S.; Sandor, M.; Masami, N. (1996). Elevator group supervisory control system using neural network, Elevator World. Vol. 44, pp. 81-86.

Kim, C.; Jeong, O. (1995). 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.

Li, Z.; Tan, H.; Zhang, Y. (2007). Particle Swarm Optimization Applied to Vertical Traffic Scheduling in Buildings, Department of Electronics y Communication Engineering, Sun Yat-sen University, China.

Liu, J.; Liu, Y. (2007). Ant Colony Algorithm and Fuzzy Neural Networkbased Intelligent Dispatching Algorithm of An Elevator Group Control System, IEEE International Conference on Control and Automation FrB3-2, Guangzhou, China.

Muñoz, D.M.; Llanos, C. H.; Ayala-Rincón, M.; Van Els, R.; Almeida R. P. (2008). Implementation of Dispatching Algorithms for Elevator Systems using Reconfigurable Architectures. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 21, Issue 8, December, pp. 1309-1320

Ogoshi, Y.; Kimura, H.; Hirose, S.; Osato, N. (2003). Elevator Group Control System Using Multiagent System, Faculty of Information Systems Technology, Kanazawa, Japan.

Siikonen, M-L.; J. Sorsa. (2002). Optimal control of Double Deck elevator group using genetic algorithm, KONE Corporation, Finland.

Tyni, T.; Ylinen, J. (2004). Evolutionary bi-objective optimisation in the elevator car routing problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 169, Issue 3, pp 960-977.