

4th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management
XIV Congreso de Ingeniería de Organización
Donostia- San Sebastián , September 8th -10th 2010

Controlador de grupo de ascensores autónomo para la reducción del consumo durante tráfico interfloor

Joaquín R. Fernández V¹, Pablo Cortés¹ y José Guadix¹

¹ Ingeniería de Organización. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Sevilla. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092 Sevilla. jrfv@esi.us.es, pca@esi.us.es, guadix@esi.us.es.

Palabras clave: Transporte Vertical, Ascensor, Eficiencia Energética, Desarrollo Sostenible, Logística, Lógica Difusa, Inteligencia Artificial.

Resumen

El artículo describe un nuevo controlador de grupo de ascensores autónomo para la reducción del consumo energético basado en lógica difusa. Éste se basa en un algoritmo propuesto que se detalla y que despacha las llamadas de acuerdo con tres valoraciones distintas de cada posible asignación: una valoración de la energía absoluta empleada, una valoración energética de la energía relativa empleada y una valoración de la proximidad de las llamadas de planta. Las simulaciones presentadas al final del mismo avalan el diseño propuesto.

1. Introducción

La tendencia a construir rascacielos y edificios de altura cada vez mayor ha sido una constante en la construcción urbanística por motivos económicos y espaciales. En estas instalaciones el transporte vertical constituye un verdadero problema logístico, su complejidad aumenta de forma exponencial con su altura. Así, se han desarrollado sistemas complejos de control de grupo de ascensores (*Elevator Group Control System*, EGCS) para proporcionar un transporte eficiente y ofrecer a la vez un grado de servicio aceptable. En este sentido el despacho de ascensores es una actividad de importancia vital y todo EGCS lo acomete atendiendo dos aspectos principales: magnitud del cálculo (tiempo de respuesta) y tratamiento de la incertidumbre.

El rendimiento de un EGCS se mide según distintos criterios como el tiempo medio de esperas por pasajero, el porcentaje de esperas superiores al minuto y el consumo energético (la energía media empleada por un edificio puede oscilar entre el 2% y el 10% de su factura eléctrica total, *CIBSE guide*, 2005). Alcanzado cierto grado de sofisticación, es matemáticamente imposible optimizar el funcionamiento atendiendo todos los criterios a la vez, por lo que se suele optimizar uno en detrimento de los otros según las preferencias del propietario del edificio.

Además, para un determinado instante el problema del despacho de ascensores se define como un problema *NP-Hard*. Así, para un edificio que posee n ascensores donde k plantas demandan el servicio de una cabina, existen n^k soluciones. De ahí la complejidad del problema en edificios altos. En sistemas corrientes donde no se proporcionan paneles numéricos de preselección de llamadas a los pasajeros para indicar su 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 EGCS debe tener en cuenta las posibles

llamadas de planta futuras. Por todo ello, es frecuente el empleo de inteligencia artificial o metaheurísticas avanzadas: la utilización de algoritmos genéticos (Siikonen *et al*, 2002) o de búsqueda tabú proporciona resultados de calidad pero su tardanza a la hora de obtener una solución óptima los hace inapropiados para este tipo de problemas donde la cuestión temporal es vital. Otras alternativas como las redes neuronales (Lu Yu *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 de la demanda. A diferencia de las anteriores metodologías mencionadas, la lógica difusa (Zong-Mu *et al*, 2003) es de fácil implementación, rápida en ejecución y por su propia definición perfecta para el tratamiento de la incertidumbre. Por todo lo expuesto y dada la relevancia internacional que está adquiriendo desarrollo sostenible sobre todo como ventaja competitiva que puede marcar las diferencias en el sector privado, se propone un EGCS basado en lógica difusa que optimiza el consumo energético.

2. Consumo energético de la cabina

En la actualidad con el desuso de los ascensores hidráulicos, la mayoría de los edificios poseen ascensores con contrapeso y sistemas de frenado recuperadores de energía. El diseño suele ser tal (Tyni *et al*, 2006) que cuando la cabina se encuentra a la misma altura que el contrapeso y la carga de ésta es la mitad de la máxima permitida el sistema se encuentra en equilibrio:

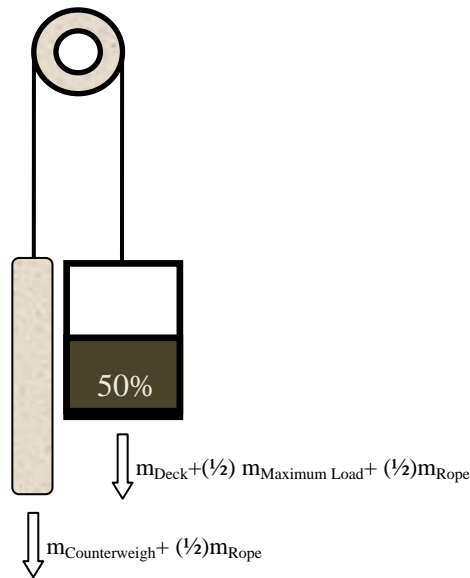


Figura 1. Patrones de tráfico existentes durante el día en un edificio de trabajadores.

$$m_{Contrapeso} + \frac{1}{2} m_{Cuerda} h = m_{Cabina} + \frac{1}{2} m_{CargaMáxPermitida} + \frac{1}{2} m_{Cuerda} h \quad (1)$$

Cuando una cabina se desplaza desde una altura h_1 hacia otra altura h_2 la energía potencial del sistema cambia:

$$\Delta E = mg h_2 - h_1 = mg \Delta h \quad (2)$$

Siendo m el balance estático del conjunto:

$$m = m_{Cabina} + m_{CargaCabina} - m_{Contrapeso} = m_{CargaCabina} - \frac{1}{2} m_{CargaMaxPermitida} \quad (3)$$

Donde el peso de las cuerdas en comparación con el resto de elementos del sistema (contrapeso, cabina y personas) es insignificante. De esta manera cuando el ascensor viaja en dirección descendente con una carga menor que la mitad de la máxima permitida o en dirección ascendente con una carga mayor que la mitad de la máxima permitida, el ascensor consume energía (más cuanto mayor es la distancia y el desequilibrio es mayor) y viceversa. La tecnología permite que una parte de esa energía potencial sea devuelta a la red eléctrica (ganancia) mientras que la restante se pierde por rozamiento. Así, mediante una asignación eficaz de las llamadas es posible recuperar parte de la energía consumida, llegándose a obtener en algunos casos hasta un balance neto positivo.

2.1. Consideraciones acerca del ahorro energético y el patrón de tráfico

Según Barney (2003) existen cuatro patrones de tráfico predominantes para un edificio de trabajadores que se alternan a lo largo del día: *Uppeak*, *Downpeak*, *Lunchpeak* e *Interfloor*, según el flujo predominante sea ascendente, descendente, ambos o ninguno respectivamente:

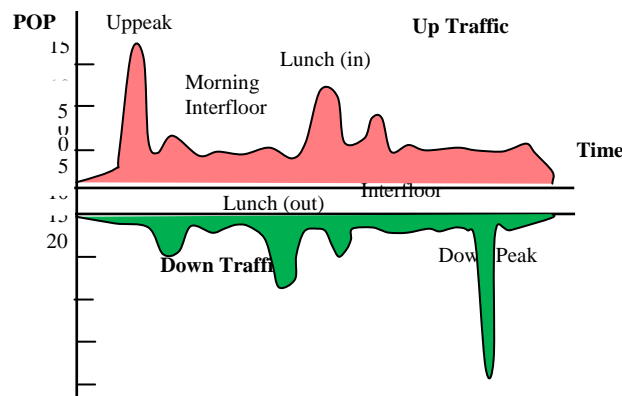


Figura 2. Patrones de tráfico existentes durante el día en un edificio de trabajadores.

Según la naturaleza de la demanda inherente a cada tipo y lo anteriormente expuesto, en los periodos de tráfico denso como *uppeak* o *downpeak* donde el inicio o destino del viaje son conocidos de antemano, el ahorro energético será más difícil por cuanto existirán menos alternativas de despacho y la densidad del tráfico requerirá un mayor peso para una asignación según el tiempo medio de espera de los pasajeros. Por el contrario durante el periodo de mayor duración, el *interfloor*, la ligereza del tráfico y las numerosas alternativas de asignación permitirán una adjudicación basada mayormente en criterios energéticos.

3. Despacho inteligente de llamadas

El algoritmo de despacho realiza una doble valoración atendiendo a los criterios de energía ($S_{E n p}$) y de tiempo de espera ($S_{AWT n p}$) según el patrón de tráfico vigente (pesos w_1 y w_2).

La idoneidad de un ascensor n para responder a una planta p se calcula como:

$$I_{n p} = w_1 S_{AWT n p} + w_2 S_{E n p} \quad (4)$$

4. Algoritmo de ahorro energético basado en lógica difusa

El 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 es completa. Como la lógica difusa es incapaz de procesar la información en paralelo, es necesario establecer el orden de

evaluación de las llamadas de planta conforme a ciertos criterios (esto constituye un hecho novedoso en los FL-EGCS, que siempre se han limitado a asignar de forma difusa sólo la última llamada de planta producida, despreciando las ventajas una reasignación completa).

El algoritmo evalúa la aptitud energética de cada cabina y asigna las llamadas de planta según un orden conforme tres criterios distintos: una valoración absoluta energética, una valoración relativa energética y una valoración conforme a la contigüidad de las llamadas:

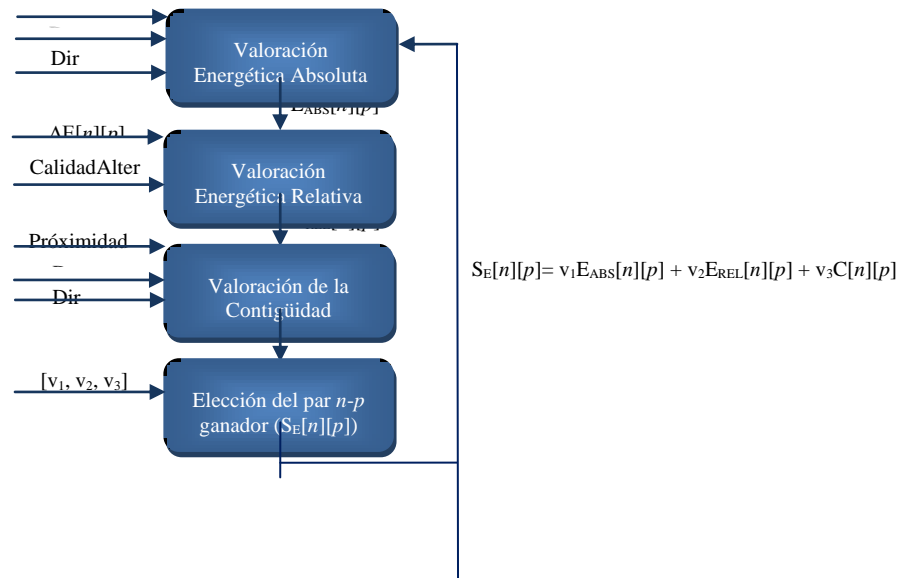


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo de ahorro energético.

NOTA: Para abreviar, se define de ahora en adelante *LCall* (*Landing Call*) como llamada realizada desde una planta *CCall* (*Car Call*) como llamada realizada desde una cabina.

4.1. Restricciones

El modelo propuesto sólo sigue *dos restricciones básicas*:

- Regla colectiva: los ascensores no pueden recoger pasajeros que deseen viajar en sentido opuesto al desplazamiento de la cabina debido a restricciones psicológicas humanas.
- Una *LCall* siempre ha de estar asignada a un ascensor.

NOTA: Un ascensor puede tener asignado más de una *LCall* o a ninguna.

4.2. Valoración energética absoluta

La valoración energética absoluta estima la cantidad total de energía empleada por

$$E_{ABS} \ n \ p$$

la cabina n en responder la llamada p . Así, depende de:

- La *posible distancia recorrida* en caso de que la cabina atendiera la llamada (*PDR*).
- El *desequilibrio* de la cabina respecto del estado energético nulo o de reposo si la cabina atendiera la llamada (*Deseq*).

- La **dirección actual** de la cabina.

La valoración absoluta actúa como una medida objetiva de la energía que sería empleada en la acción considerada sin tener en cuenta las condiciones de contorno (resto de las demás llamadas asignadas, posibles asignaciones futuras y las posiciones y estados de las otras cabinas).

4.3. Valoración energética relativa

Por el contrario, la **valoración energética relativa** $E_{REL} n p$ realiza una comparativa ponderando entre la energía que consumiría la cabina n si atendiese la $LCall p (E_{ABS} n p)$ y la energía empleada por el resto de cada uno de los $n-1$ ascensores si atendiesen la llamada $LCall p$. Según su definición, depende de:

- $\Delta E[n][p]$: diferencia entre la energía absoluta de la posibilidad $n-p$ y la energía absoluta media del resto de ascensores si atendiesen la $LCall$ concreta p medida en número de desviaciones típicas:

$$\Delta E n p = \frac{E_{ABS} n p - \bar{E}_{ABS} n [p_{fija}]}{S n [p_{fija}]} \quad (5)$$

Donde $S n [p_{fija}]$ es la desviación típica y $\bar{E}_{ABS} n [p_{fija}]$ la media energética de todas las posibles asignaciones para una llamada de planta determinada p .

- La **calidad de la mejor alternativa** a la cabina n para atender una $LCall p$ concreta:

$$CalidadAlter[n][p] = \frac{E_{ABS} n [p_{fija}] - E'_{ABS} n [p_{fija}]}{mejor E_{ABS} n [p_{fija}]} \quad (6)$$

Donde $E'_{ABS} n [p_{fija}]$ es la mejor alternativa a $E_{ABS} n [p_{fija}]$ para una llamada p dada.

La valoración relativa actúa como una medida de las condiciones de contorno y permite tomar decisiones sobre las n posibilidades de atender una $LCall$ y por extensión sobre las $n \times p$ posibilidades en general.

De hecho, la valoración relativa afecta al orden en el que las $LCalls$ se adjudican: mediante la medida $\Delta E[n][p]$ se puede detectar si una opción de cabina para atender a una $LCall$ es mejor que las demás o no, y conjuntamente con el **parámetro calidad de la mejor alternativa** $[n][p]$ se puede determinar si la opción n constituye una asignación crítica para una $LCall p$ determinada. Esto permite resolver satisfactoriamente situaciones complicadas: P.e. cuando no existe cabina optima para un despacho p en el sentido de que todas las opciones conllevan un gasto energético considerable pero existe una única cabina que consumiría significativamente menos que las demás (o incluso generaría potencia). Esta cabina crítica debe de ser adjudicada a la $LCall p$ antes de ser asignada a otra distinta que puede que impida posteriormente la asignación de ella a la $LCall p$.

De la misma forma, los parámetros $\Delta E[n][p]$ y *calidad de la mejor alternativa [n][p]* posibilitan detectar y resolver otras situaciones complicadas. Por ejemplo, si existe más de un despacho crítico (supongamos dos) en el sentido de que sus valoraciones son mucho más altas que la del resto de opciones, asignar la cabina del primero de estos despachos críticos a otra *LCall* no implica la pérdida de la oportunidad crítica pero una vez la otra opción vital se ha constituido como la única de su clase, es sumamente importante que la cabina de este despacho no sea adjudicada a otra *LCall*.

En definitiva, la valoración relativa de la energía permite reconocer cuando una decisión de despacho óptima para una *LCall* concreta p no conduce a la optimización energética de todo el sistema.

4.4. Valoración de la contigüidad de las llamadas

La contigüidad de las *LCalls* es un factor decisivo para la optimización energética. Las llamadas de plantas próximas espacialmente entre sí deben ser servidas por la misma cabina o por una diferente según los patrones energéticos definidos por el modelo de consumo planteado. Por ejemplo, una cabina que se desplaza en sentido descendente con una carga total inferior a la máxima permitida debe servir todas las *LCalls* seguidas que pueda para incrementar la masa transportada y reducir el consumo energético o incluso generar energía. Por el contrario, cabinas que se desplazan en sentido ascendente con una masa total transportada inferior a la mitad de la carga máxima permitida deben de atender el menor número posible de *LCalls* porque cada nuevo pasajero que transporte aumenta la carga y reduce la ganancia de energía:

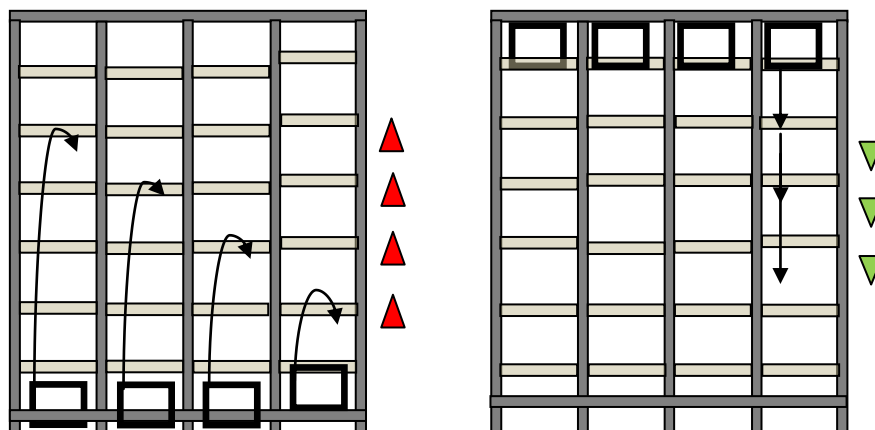


Figura 4. Ejemplos triviales: A la izq. los ascensores deben servir el menor núm. de *LCalls* contiguas posibles. A la der. los ascensores deben servir el mayor núm. de *LCalls* posibles.

Así, la valoración energética de la contigüidad de las *LCalls* estima si una *LCall* p determinada debería de ser asignada a una cabina n de acuerdo con lo expuesto. Depende de:

- La **proximidad** de la *LCall* p considerada a la *LCall* mas cercana ya asignada a la cabina n .
- El posible **desequilibrio** de carga de la cabina respecto del estado energético nulo.
- La **dirección actual** de la cabina (que a su vez depende de las *CCalls* y *LCalls* asignadas a la cabinas).

La valoración de la contigüidad contribuye a asignar o no un grupo de *LCalls* cercanas espacialmente a la misma cabina y junto con la valoración energética relativa proporciona una valoración de las condiciones de contorno.

NOTA: Durante la primera ejecución del algoritmo ninguna *LCall* se encuentra asignada previamente por lo que el valor del parámetro $E_{CONT}[n][p]$ es cero. Una vez se obtiene el primer par ganador $n-p$, los valores de $E_{ABS}[n][p]$ para la cabina n , $E_{REL}[n][p]$ para todo el grupo de cabinas p y $E_{CONT}[n][p]$ para la cabina n y el juego completo de *LCalls* p son calculados de nuevo para tener en cuenta la *LCall* p asignada. Y así sucesivamente hasta que toda *LCall* posee una cabina asignada.

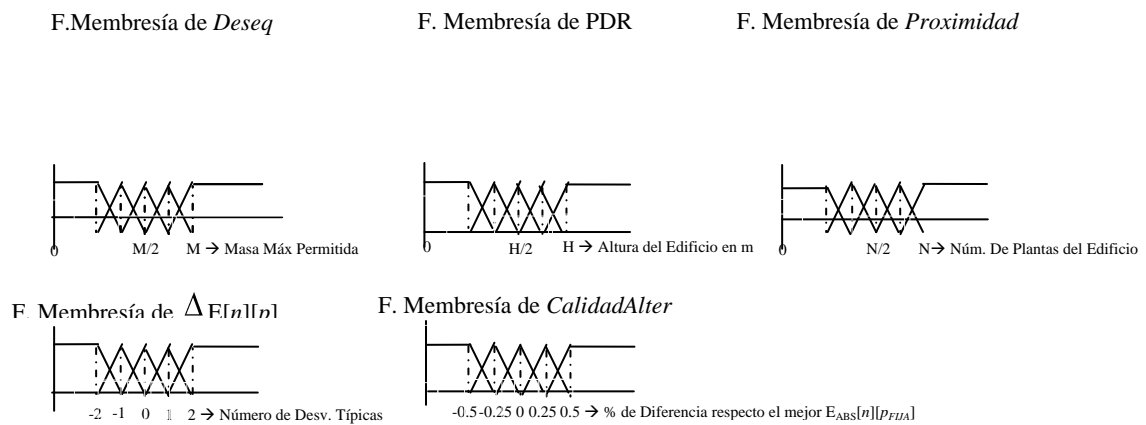
4.5. Valoración energética final

Una vez se han realizado las tres valoraciones energéticas, se obtiene mediante el juego de pesos $[v_1, v_2, v_3]$ el parámetro final que representa la idoneidad de la opción de despacho $n-p$ desde un punto de vista energético.

$$S_{E n p} = v_1 E_{ABS n p} + v_2 E_{REL n p} + v_3 C n p \quad (7)$$

4.6. Variables difusas para el cálculo de las tres valoraciones energéticas distintas

Cada una de las valoraciones son calculadas de forma difusa mediante sus correspondientes variables lingüísticas. Una de las virtudes de este diseño basado en lógica difusa radica en que no es necesario conocer a priori el posible grado de servicio del sistema como ocurre en Tyni *et al.* (2006), donde es necesario indicar a un controlador PI el tiempo medio de espera deseado. Así, las funciones de membresía dependen sólo del edificio y del tipo de cabina:



5. Validación del controlador dinámico basado en lógica difusa para la optimización del consumo energético

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 juego de pesos $[v_1, v_2, v_3]$ se fijó a 0.4, 0.3 y 0.3 respectivamente. 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* (figuras 5 a 8 y tabla 1):

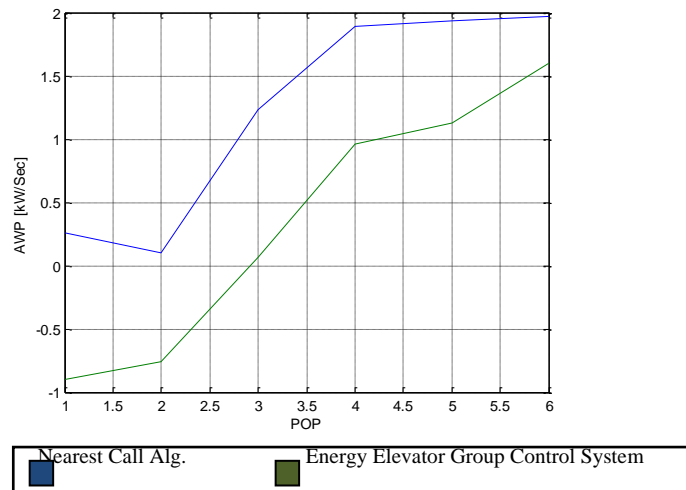


Figura 5. Función que relaciona el Consumo Medio de Potencia (*Average Wasted Power, AWP*) por Segundo y la demanda de transporte vertical (*Percentage Of Population demanding service, POP*).

Table 1. Resultados de las simulaciones que muestran la ganancia relativa y absoluta de energía

POP	NC Alg.	EFLEGCS	Difference	% Improve
1%	0.26	-0.90	1.16	- 446%
2%	0.10	-0.75	0.85	- 850%
3%	1.23	0.07	1.16	- 94%
4%	1.89	0.96	0.93	- 49%
5%	1.93	1.13	0.80	- 41%
6%	1.97	1.16	0.81	- 41%

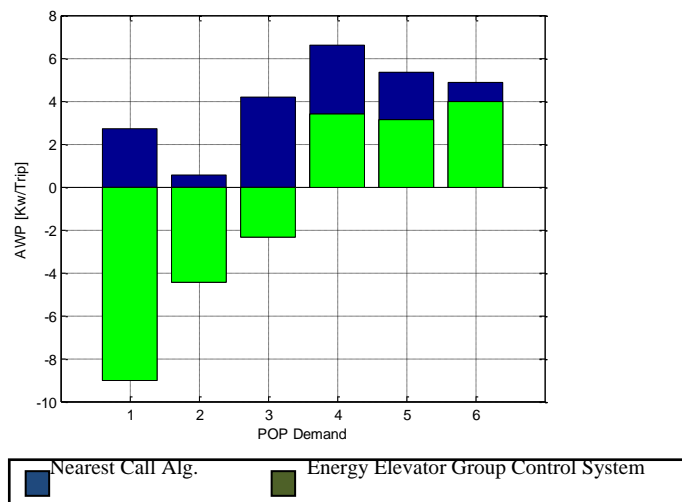


Figura 6. Función que relaciona el Consumo Medio de Potencia (*Average Wasted Power, AWP*) por viaje segundo y la demanda de transporte vertical (*Percentage Of Population demanding service, POP*).

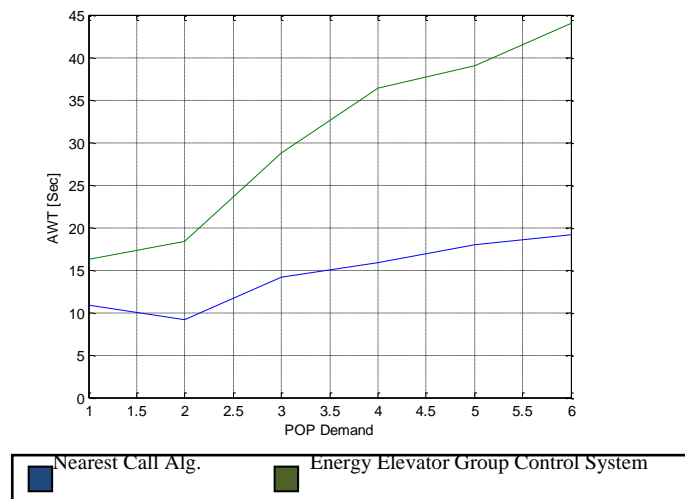


Figura 7. Función que relaciona el Tiempo Medio de Espera de los Pasajeros (*Average Waiting Time, AWT*) y la demanda de tráfico vertical (*Percentage Of Population demanding service, POP*).

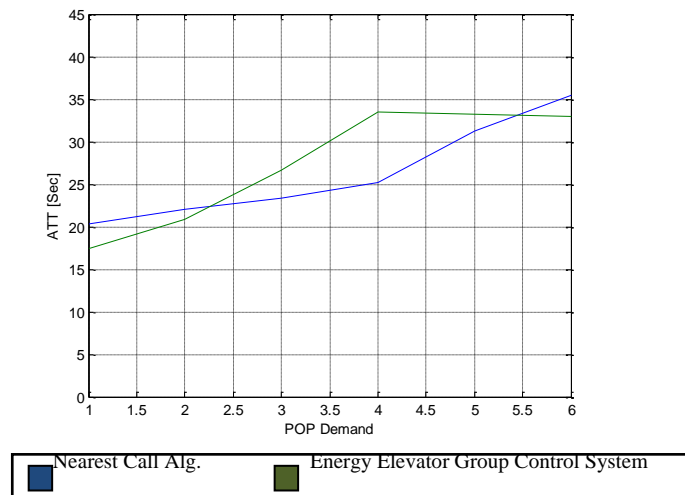


Figura 8. Función que relaciona el Tiempo Medio de Viaje de los Pasajeros (*Average Trip Time, ATT*) y la demanda de tráfico vertical (*Percentage Of Population demanding service, POP*).

Los resultados son concluyentes: para una demanda de tráfico vertical baja, el ahorro energético proporcionado por el algoritmo implementado es extremadamente grande, produciendo incluso ganancias de potencia para periodos concretos de tiempo con un coste en los tiempos medios de espera de los pasajeros muy pequeño (*AWT*) y prácticamente manteniendo constante los tiempos medios de viaje de los pasajeros. Para las demandas simuladas el controlador desarrollado es completamente capaz de despachar eficientemente las *LCalls*.

A medida que aumenta la demanda también lo hace el coste marginal, deteriorando los beneficios de empeorar los tiempos de espera en detrimento del consumo energético. Cuando la demanda es considerablemente alta, sobre el 6% (durante periodos de tráfico *interfloor* esta raramente sobrepasa el umbral del 4%), las desventajas de un aumento en el tiempo de espera superan las ventajas del ahorro energético, produciéndose tiempos de espera que empiezan a ser inaceptables y ahorros energéticos que no merecen la pena.

Si se tiene en cuenta el ahorro energético medio producido por viaje y que la cantidad total de estos que un ascensor realiza en cinco minutos varía aproximadamente desde 30 hasta 120 (según la demanda) se puede obtener una idea de la cantidad total de energía que puede ahorrarse sin deteriorar el servicio ofrecido.

6. Conclusiones

El modelo descrito ha sido probado utilizando el software ELEVATE. Se ha demostrado que mediante la metodología propuesta se realiza una valoración adecuada del problema de despacho de tal forma que es posible optimizar el tiempo de espera y las pérdidas energéticas del tráfico vertical. El EGCS difuso planteado se muestra eficaz y robusto, constituye el primer FL-EGCS de asignación dinámica, mejora el tiempo de espera y el ahorro energético obtenido en otros estudios similares y además no necesita conocer *a priori* el rendimiento esperado del sistema (Tyni *et al*, 2006). Mediante la utilización de pesos distintos proporciona un funcionamiento flexible adaptándose a cualquier patrón de tráfico.

Referencias

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

The Chartered Institution of Building Services Engineers (2005). CIBSE Guide D: Transportation systems in buildings.

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

Tyni T. y Ylinen J. (2006) Evolutionary bi-objective optimisation in the elevator car routing problem, KONE Corporation, Finlandia.

Yeh Z. y Li K. (2003) A systematic approach for designing multistage fuzzy control systems. Kagawa University, Japón.

Yu L., Zhou J., Mabu S., Hirasawa K, Hu J. y Markon S. (2007), Elevator Group Control System using Genetic Network Programming with ACO Considering Transitions, SICE Annual Conference, Kagawa University, Japón.