

## **Controlador basado en lógica difusa para la detección del patrón de tráfico en sistemas de transporte vertical**

**Joaquín R. Fernández V.<sup>1</sup>, Pablo Cortés<sup>1</sup>, María del Carmen Delgado<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Dpto. de Organización de Empresas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Sevilla

**Palabras clave:** Lógica difusa, patrón de tráfico, despacho de ascensores.

### **1. Introducción**

Uno de los aspectos más relevantes y sin embargo menos estudiado en el funcionamiento de los sistemas de transporte vertical es la detección del tipo tráfico, fundamental a la hora de diseñar un sistema robusto que responda a las demandas de los pasajeros de forma rápida y eficaz. Según el método de control implementado y el flujo de tráfico detectado se elige un algoritmo apropiado de despacho de entre varios o simplemente se informa al despachador para que tenga en cuenta el patrón a la hora de distribuir las llamadas, de tal forma que en ambos casos el rendimiento aumenta gracias a la información proporcionada.

La teoría clásica (Barney, 2003) divide el tráfico en cuatro clases posibles: *Uppeak*, *Downpeak*, *Lunchpeak* e *Interfloor*, según el flujo predominante sea ascendente, descendente, ambos o ninguno respectivamente.

### **2. Características de los diseños basados en lógica difusa (*fuzzy logic*)**

El objetivo principal del diseño es el de proporcionar un sistema de detección fiable pero a la vez de fácil implementación. La inconsistencia de los patrones y la fluctuación en cuestión de minutos de la demanda sugieren el empleo de técnicas de inteligencia artificial. La lógica difusa destaca, por su sencillez y fácil realización y es especialmente adecuada para la conjunción de variaciones de demanda de muy diversas características. Esta técnica consiste en una serie de reglas generales o directrices de forma que el problema que se pretende resolver no se corresponde unívocamente con un modelo determinado de lógica difusa, de ahí su versatilidad en cuanto a implementaciones y su rendimiento se refiere. Aún así como es lógico, todo sistema basado en lógica difusa presenta características parecidas: son sistemas robustos, necesitan poca información de entrada, y el su proceso suele constar de las siguientes tres fases: *fuzzification* (conversión del valor de las variables de entrada en valores “difusos”), proceso de inferencia basado en reglas lógicas y *defuzzification* (conversión del valor de las variables difusas y toma de decisión).

### **3. Variables y datos de entrada del modelo**

#### **3.1 Parámetros de diseño**

- $\Delta t$ : Periodo de tiempo tras el cuál se efectúa el análisis y posterior toma de decisión respecto al tipo de tráfico que acontece.

### 3.2 Entradas del modelo medidas con sensores

Mediante sensores se puede medir la masa total del ascensor y el estado en el que se encuentra éste (parado, desplazándose en sentido ascendente o desplazándose en sentido descendente) además de registrar los instantes en que cambió de estado.

El objetivo aquí es proporcionar un sistema fiable pero a la vez de fácil implementación, de ahí lo escueto y la sencillez de las mediciones necesarias.

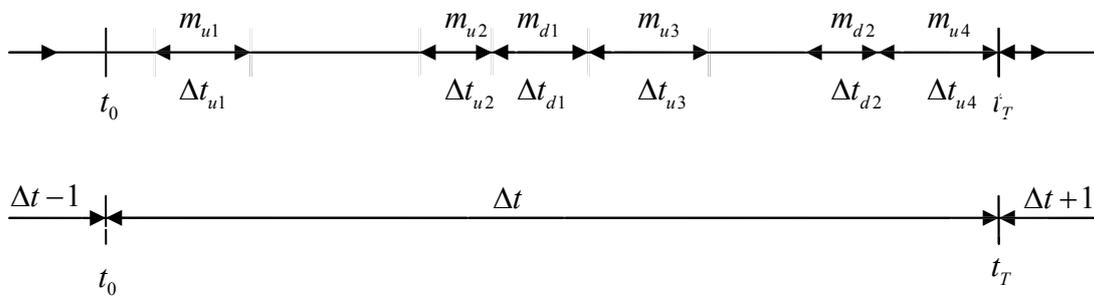
### 3.3 Variables iniciales del modelo

- $m_u$  : masa total ascendente durante el periodo  $\Delta t$ .
- $m'_u$  : variación de la masa total ascendente entre el periodo  $\Delta t$  y el periodo  $\Delta t-1$ .
- $m_d$  : masa total descendente durante el periodo  $\Delta t$ .
- $m'_d$  : variación de la masa total descendente entre el periodo  $\Delta t$  y el periodo  $\Delta t-1$ .
- $T_{anterior}$ : tipo de tráfico detectado al finalizar el periodo anterior.

El cálculo de  $m_u$  y  $m_d$  se obtiene ponderando la masa total registrada en cada viaje por la duración de éste:

$$\begin{aligned} m_u|_{\Delta t} &= \sum_i m_{u_i} \cdot \Delta t_{u_i} \\ m_d|_{\Delta t} &= \sum_j m_{d_j} \cdot \Delta t_{d_j} \end{aligned} \tag{1.1}$$

La figura 1 sirve de ejemplo para el caso de una única cabina:



**Figura 1.** Ejemplo contabilización de llamadas en el caso de una única cabina.

- $m_{u_i}$  : masa que se desplaza en sentido ascendente durante el viaje  $i$ .
- $m_{d_j}$  : ídem en sentido descendente para el viaje  $j$ .
- $\Delta t_{u_i}$  : duración del viaje  $i$  en sentido ascendente.
- $\Delta t_{d_j}$  : ídem en sentido descendente para el viaje  $j$ .
- $\Delta t$  : intervalo de examen.
- $t_0$  : inicio del periodo examen.

- $t_T$  : final del periodo de examen, vaticinio e inicio del siguiente.

En el caso de existir más de una cabina en el sistema, obviamente se contabilizarían todos los viajes llevados a cabo por todas las cabinas. Para el ejemplo anterior  $m_u$  y  $m_d$  se calcularía como:

$$\begin{aligned} m_u|_{\Delta t} &= m_{u_1} \cdot \Delta t_{u_1} + m_{u_2} \cdot \Delta t_{u_2} + m_{u_3} \cdot \Delta t_{u_3} + m_{u_4} \cdot \Delta t_{u_4} \\ m_d|_{\Delta t} &= m_{d_1} \cdot \Delta t_{d_1} + m_{d_2} \cdot \Delta t_{d_2} \end{aligned} \quad (1.2)$$

Si durante el intervalo de duración de un viaje se alcanza el umbral del final del periodo sin que el viaje en cuestión haya finalizado, el controlador crea un final e inicio virtual de viaje para poder contabilizar a éste en los cálculos que se llevan a cabo al término del periodo, de manera que solo la franja de tiempo que coincide con la definición del intervalo cuente a la hora de realizar los cálculos. También de esta misma forma, al término del siguiente periodo, dicho viaje que concurrió con el inicio del periodo y final del periodo anterior, sólo contabilizará en los cálculos como viaje que comenzó al inicio del periodo.

Las variaciones de las masas transportadas durante dos periodos diferentes consecutivos se calculan como:

$$\begin{aligned} m'_u|_{\Delta t} &= \frac{m_u|_{\Delta t} - m_u|_{\Delta t-1}}{m_u|_{\Delta t-1}} \\ m'_d|_{\Delta t} &= \frac{m_d|_{\Delta t} - m_d|_{\Delta t-1}}{m_d|_{\Delta t-1}} \end{aligned} \quad (1.3)$$

#### 4. Conversión de las variables iniciales en variables difusas (*fuzzification*)

Según la posición relativa de las variables definidas previamente respecto de la **masa máxima ascendente y descendente esperada durante el intervalo**, cada variable se divide en términos porcentuales dos veces en tres componentes diferentes.

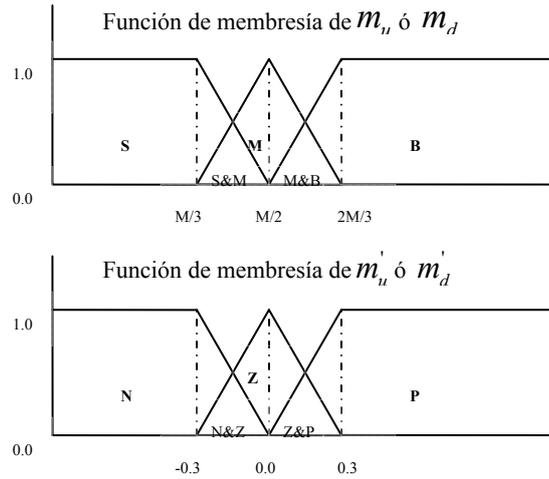
Así las masas totales ascendentes o descendentes durante el periodo  $\Delta t$  se representan por tres componentes que la definen en cuánto a cantidad total se refiere:

- $m_s$  : componente de masa pequeña.
- $m_m$  : componente de masa mediana.
- $m_b$  : componente de masa grande.

En lo que respecta a la variación tanto ascendente como descendente de masa entre dos periodos consecutivos también se divide cada parámetro en tres partes o componentes porcentuales según la intensidad y/o el signo de la variación entre periodos:

- $m_p$  : parte de variación positiva.
- $m_z$  : parte de variación nula.
- $m_n$  : parte de variación negativa.

La cuantificación exacta de los componentes de cada una de las variables se rige según las funciones de membresía representadas en la figura 1:



**Figura 1.** Funciones de membresía para las variables iniciales del modelo.

Donde  $M$  representa la masa máxima ascendente y descendente esperada durante el intervalo de cálculo y es igual a:

$$M = 80\% \times (\text{capacidad de cabina}) \times \left( \frac{\Delta t - t_{stops}}{2} \right) \quad (1.4)$$

La fórmula calcula la masa máxima esperada teniendo en cuenta que raramente la ocupación de la cabina sobrepasa el 80% de la capacidad máxima permitida y considera que en un intervalo de tiempo suficientemente largo la mitad del tiempo (que no se encuentre estacionada) la cabina se estará moviendo hacia arriba y la otra mitad hacia abajo.

### 5. Proceso de inferencia basado en reglas lógicas

Una vez obtenidas las tres componentes de cada variable, se calcula mediante ellas y teniendo en cuenta el tipo de tráfico presente en el periodo anterior una serie de reglas lógicas como las siguientes (en total 36):

- **SI** ( $T_{anterior} = \text{UPPEAK} \parallel T_{anterior} = \text{LUNCHPEAK}$ ):
  - R1u:  $m_{us} \ \&\& \ m'_{un} \ \text{ENTONCES}$  Salida = NOT
  - R2u:  $m_{us} \ \&\& \ m'_{uz} \ \text{ENTONCES}$  Salida = UPPEAK
  - ...
  - R9u:  $m_{ub} \ \&\& \ m'_{up} \ \text{ENTONCES}$  Salida = UPPEAK
- **SI** ( $T_{anterior} = \text{DOWNPEAK} \parallel T_{anterior} = \text{INTERFLOOR}$ ):
  - R10u:  $m_{us} \ \&\& \ m'_{un} \ \text{ENTONCES}$  Salida = NOT
  - ...
  - R18u:  $m_{ub} \ \&\& \ m'_{up} \ \text{ENTONCES}$  Salida = UPPEAK
- **SI** ( $T_{anterior} = \text{DOWNPEAK} \parallel T_{anterior} = \text{LUNCHPEAK}$ ):
  - R1d:  $m_{us} \ \&\& \ m'_{un} \ \text{ENTONCES}$  Salida = NOT

- ...
- **SI** ( $T\_anterior = UPPEAK \parallel T\_anterior = INTERFLOOR$ ):
- ...

Donde el producto lógico AND (&&) representa el mínimo de entre los dos factores, que en caso de no encontrarse habilitado por el condicional IF correspondiente que le precede toma el valor de cero como era lógico suponer.

Aquí, el significado de las palabras UPPEAK y DOWNPEAK no se ciñe a la definición exacta de tráfico *uppeak* o *downpeak* definidos previamente, sino que se utilizan para indicar si existe un flujo de tráfico de tamaño considerable en un determinado sentido. No significando esto necesariamente que el único flujo considerable existente sea el que representa (y por tanto que el tipo de tráfico fuera el que define) y pudiendo por consiguiente encontrarse un tráfico notable en sentido opuesto que de existir será representado también mediante su palabra correspondiente. El significado de NOT hace referencia a la inexistencia de un flujo considerable en el sentido evaluado.

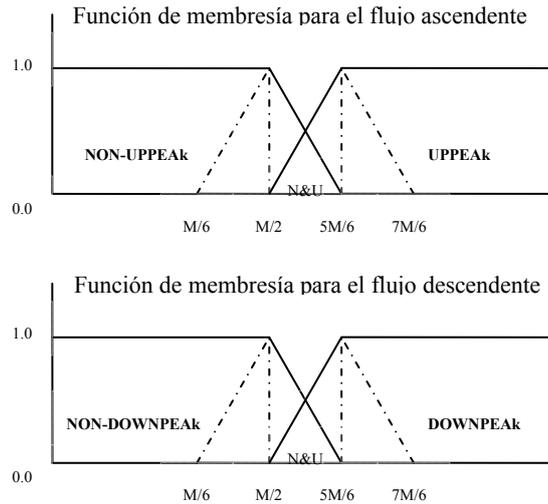
Una vez obtenido el valor de cada regla, se calcula la fuerza de las componentes *uppeak* y *downpeak* separadas de las componentes *non-uppeak* y *non-downpeak* mediante la raíz de la suma cuadrática de todas las reglas asociadas a cada una de ellas:

$$\begin{aligned} \text{"non-uppeak"} &= \sqrt{(R1u^2 + R10u^2 + R11u^2 + R12u^2 + R13u^2)} \\ \text{"uppeak"} &= \sqrt{\left( \begin{array}{l} R2u^2 + R3u^2 + R4u^2 + R5u^2 + R6u^2 + R7u^2 + R8u^2 \\ + R9u^2 + R14u^2 + R15u^2 + R16u^2 + R17u^2 + R18u^2 \end{array} \right)} \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} \text{"non-downpeak"} &= \sqrt{(R1d^2 + R10d^2 + R11d^2 + R12d^2 + R13d^2)} \\ \text{"downpeak"} &= \sqrt{\left( \begin{array}{l} R2d^2 + R3d^2 + R4d^2 + R5d^2 + R6d^2 + R7d^2 + R8d^2 \\ + R9d^2 + R14d^2 + R15d^2 + R16d^2 + R17d^2 + R18d^2 \end{array} \right)} \end{aligned} \quad (1.6)$$

## 6. Conversión del valor de las variables difusas (*defuzzification*) y toma de decisión

Para poder tomar una decisión sobre el tráfico regente, es necesario transformar los dos resultados anteriores del proceso de inferencia para cada sentido (*non-downpeak* y *downpeak*, y *non-uppeak* y *uppeak*) en un solo resultado interpretable matemáticamente en forma de probabilidad. Para ello se emplean las funciones de membresía (*membership function*) siguientes representadas en la figura 2:



**Figura 2.** Funciones de membresía para el flujo ascendente y descendente respectivamente.

Donde  $M/6$  y  $7M/6$  representan los “centros” *non-downpeak* y *non-uppeak*, y *uppeak* y *downpeak* respectivamente. Se pondera cada centro mediante la fuerza de la componente respectiva calculada anteriormente en el proceso de inferencia y se calcula la media:

$$\text{ponderación downpeak} = \frac{[\text{No-down.centro}] \times [\text{No-down.fuerza}] + [\text{Down.centro}] \times [\text{Down.fuerza}]}{\text{No-down.fuerza} + \text{Down.fuerza}}$$

$$\text{ponderación uppeak} = \frac{[\text{No-up.centro}] \times [\text{No-up.fuerza}] + [\text{Up.centro}] \times [\text{Up.fuerza}]}{\text{No-up.fuerza} + \text{Up.fuerza}}$$

(1.6)

De la función de membresía de salida se obtienen los nuevos pares de salidas que representan la probabilidad en porcentaje de que se produzca el comportamiento que definen. Así, de las probabilidades de hallarse ante un flujo de tráfico *uppeak* o *non-uppeak* para sentido de tráfico ascendente y *downpeak* o *non-downpeak* para sentido descendente, se deduce el patrón existente en el periodo analizado. Y como no sólo se tiene en cuenta el tamaño del flujo si no la variación de este respecto al periodo anterior y el tipo de tráfico que se detectó, mediante la elaboración cuidadosa de las reglas se puede no sólo detectar el tráfico sino también predecirlo para el periodo siguiente con una probabilidad de error muy pequeña. Todo ello utilizando la menor cantidad de información posible, habida cuenta que no se conocen ni a priori ni a posteriori las plantas desde o hacia la que los pasajeros viajan y que constituye uno de los elementos esenciales que caracterizan los distintos patrones de tráfico. Las reglas lógicas de decisión son las cuatro siguientes:

- Rf1: **SI** *Non-uppeak* && *Non-downpeak* **ENTONCES** INTERFLOOR
- Rf2: **SI** *Uppeak* && *Non-downpeak* **ENTONCES** UPPEAK
- Rf3: **SI** *Non-uppeak* && *Downpeak* **ENTONCES** DOWNPEAK
- Rf4: **SI** *Uppeak* && *Downpeak* **ENTONCES** LUNCHPEAK

Caso de detectarse varios tipos de tráfico posibles, el de más alta probabilidad sería seleccionado.

## 7. Calibración

Los siguientes parámetros necesitan calibración o ajuste de valores:

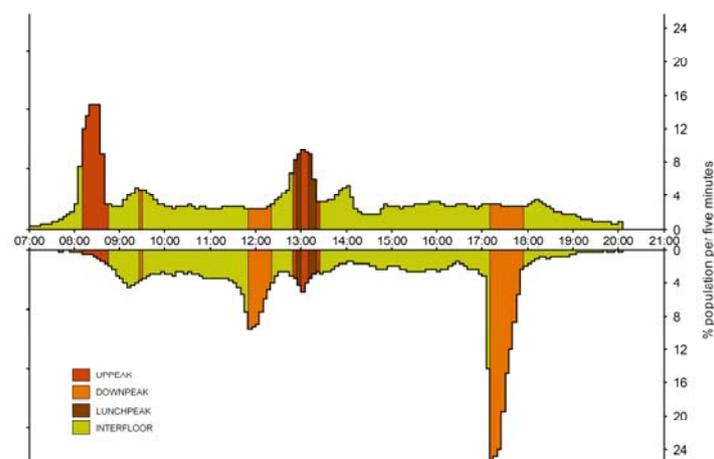
- $\Delta t$ : intervalo de tiempo de análisis. Nunca debe ser menor de cinco minutos y al menos debe ser un par de veces mayor que el RTT para que tenga sentido la predicción.
- $M$ : masa máxima ascendente y descendente esperada durante el intervalo de cálculo que sirve como referencia en las funciones de membresía.
- $\{M/3, M/2, 2M/3\}$  y  $\{-0.3, 0.0, 0.3\}$ : los valores que definen las funciones de membresía triangulares de entrada.
- $\{M/6, 7M/6\}$ : los valores centrales que definen las funciones de membresía de salida que sirven para identificar el tipo de tráfico.

## 8. Simulación

Para comprobar la validez de lo expuesto se llevaron a cabo varias simulaciones en un edificio representativo sometido a distintos patrones con el fin de averiguar si el detector de tipo de tráfico basado en lógica difusa descrito era capaz de realizar su cometido de forma eficaz.

El edificio escogido en cuestión posee cinco plantas donde trabajan cuarenta y una personas en cada una, además de una planta baja que se considera sólo de entrada y ningún sótano. Así, la población total es de doscientos cinco trabajadores. Un solo ascensor de 600Kg es suficiente para dar servicio a todo el edificio en términos de capacidad de solvencia (*handling capacity*, HC) descrito por Barney (2003), esto quiere decir que se asegura transporte vertical para hasta un 15% de la población durante los cinco minutos del tráfico *uppeak* más denso.

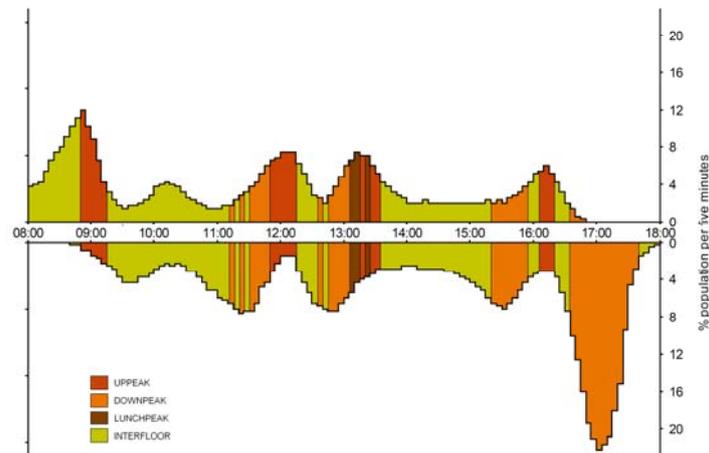
Los patrones de tráfico utilizados para poner a prueba el controlador son tres: el patrón que aparece en la guía CIBSE, el definido por Strakosch y el definido por Siikonen. Todos representan el tráfico diario en un edificio de trabajadores desde el inicio de la jornada laboral hasta su finalización, alternando todos los tipos de tráfico posibles. A continuación se muestran las gráficas de estos patrones utilizados, donde en abscisas se representa la hora del día y en ordenadas la cantidad de tráfico ascendente y descendente en términos de porcentaje total de la población, los distintos colores muestran los diversos patrones detectados. El patrón definido por la guía CIBSE para un día típico en un edificio de oficinas y el tipo de tráfico que detectó el controlador se muestran en la figura 3 a continuación:



**Figura 3.** Patrón de tráfico definido en la guía CIBSE (en distintos colores el tipo de flujo detectado por el controlador).

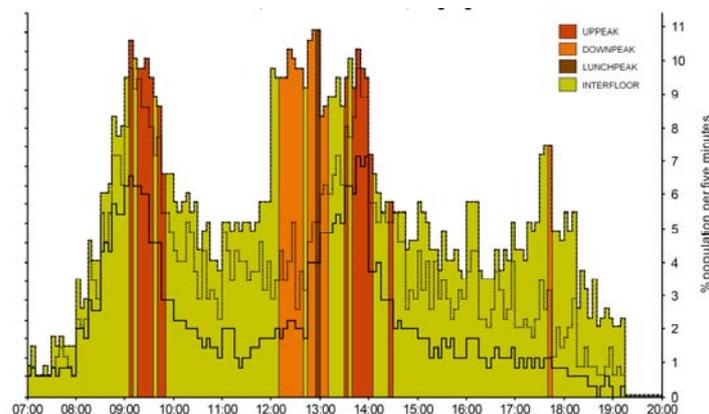
El modelo CIBSE describe el comportamiento típico esperado, con un periodo *uppeak* abrupto al inicio de la jornada y un periodo *downpeak* marcadamente fuerte al final de ésta. Al

mediodía el periodo *lunchpeak* se puede dividir en dos periodos, un periodo *downpeak* y otro *uppeak* ambos de carácter moderado. Los resultados en relación al tipo de tráfico detectado por el controlador cuando se somete al patrón definido por Strakosch se representan en la figura 4 siguiente:



**Figura 4.** Patrón de tráfico definido por Strakosch (en distintos colores el tipo de flujo detectado por el controlador).

El modelo de Strakosch por contra representa un modelo mucho más atípico, con curvas suaves, máximos pequeños y periodos ligeros *uppeak* y *downpeak* también durante toda la mañana y la tarde. Un patrón que se asemeja más al comportamiento real de los flujos de pasajeros es el definido por Siikonen y representado en la figura 5:



**Figura 5.** Patrón de tráfico definido por Siikonen (en distintos colores el tipo de flujo detectado por el controlador).

De las grandes diferencias en la descripción de estos patrones se aprecia lo duro de la prueba a la que se somete el controlador, que por otra parte se muestra fiable y consistente. Si en ocasiones se cambia rápidamente de patrón detectado, esto se debe mayormente a que los comportamientos del flujo de tráfico se mueven entre límites, como por ejemplo ocurre entre las 11:15 y las 11:30 en la figura 4 que define el patrón según Strakosch.

También puede deberse a la forma en la que se computa el tiempo de cada viaje, así por ejemplo puede ocurrir que para una demanda de servicio parecida en ambos sentidos de viaje se de el caso de una detección de flujos ascendentes y descendentes distinta debido a que el tiempo que transcurren los pasajeros en cabina (y de este modo la masa total detectada) sean

muy diferentes. Factores como la longitud de cada trayecto, el número de plantas con demanda o el número de plantas demandadas influyen en los cálculos.

El despachador escogido no influye en los resultados mientras el intervalo de tiempo de examen sea lo suficientemente grande como para satisfacer la demanda de la mayoría de los pasajeros que requieren servicio, de ahí la justificación de que el intervalo de tiempo escogido debe ser mayor, un par de veces al menos, que el *Round Trip Time* (RTT). Por todo ello se escogió el controlador simple THV, colectivo ascendente y descendente, que recoge a todos los individuos en el sentido de viaje hasta que se llena o llega al final, solo entonces se evalúa la posibilidad de cambio de sentido.

De la misma forma, al ser el RTT mayor que el tiempo de evaluación, el número de ascensores con que se realice la simulación no es significativo siempre que el sistema se encuentre correctamente diseñado para copar los servicios exigidos durante el periodo de tiempo, de ahí que se escogiese el caso más simple.

Dada la multitud de posibles valores que pueden tomar los numerosos parámetros que necesitan calibración, se llevaron a cabo diversas pruebas mediante los distintos patrones de tráfico con el fin de optimizar el funcionamiento. Los valores empleados son los que se consideraron mejores.

## **9. Conclusiones**

De las pruebas anteriores se concluye que el controlador funciona correctamente y se adapta en general a cambios de tráfico de diversa naturaleza: lentos y graduales y bruscos y rápidos.

Los cambios que se producen dentro de la duración de un periodo nunca son detectables antes de la finalización de éste por definición, pues el controlador sólo examina el tipo de tráfico presente al término del tiempo intervalo. En teoría para un periodo de duración  $x$  minutos el tiempo medio de detección es de  $x/2$  minutos, así, para un periodo ejemplo de cinco minutos se puede hablar de una detección media de 2,5 minutos. Según esto se puede hablar de una detección rápida que confiere al controlador credibilidad.

El periodo de detección se puede disminuir para acelerar la detección del patrón hasta un mínimo de unas dos veces el Round Trip Time RTT, por debajo de este umbral el comportamiento es inesperado o no seguro. Se puede hablar de este modo de un compromiso entre una detección rápida y una detección segura.

Un defecto presente en casi todas las implementaciones de lógica difusa y en general en diseños basados en lógica difusa es la existencia de numerosos parámetros que necesitan calibración, exigiendo el sistema real, al que se quiere aplicar el modelo, un ajuste de dichos parámetros.

Los diseños basados en lógica difusa adolecen en general de una carencia de memoria y esto repercute en su funcionamiento, por ello a menudo se combinan con redes neuronales que perfeccionan su funcionamiento subsanando algunos errores de ejecución que pueden estar presentes. Como el inconveniente de las redes neuronales en cuanto a implementación es evidente y el principal objetivo de este diseño es ofrecer una puesta en práctica sencilla, una solución de compromiso para mejorar el rendimiento fue retroalimentar la última decisión tomada para de esta forma tener en cuenta el pasado más reciente y tomar una decisión más sensata en consecuencia. Así, al “recordar” el controlador el tipo de tráfico detectado durante el periodo anterior de cálculo, el funcionamiento mejora notablemente sin caer en implementaciones tediosas.

## Referencias

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

M. L. Siikonen; J. Leppala (1991). "Elevator traffic pattern recognition," in *Proc. 4th IFSA Congr.* pp. 195–198.

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

Zong-Mu Yeh; Kuei-Hsiang Li (2003). A systematic approach for designing multistage fuzzy control systems.

S.M. dos Santos, G.C. Barney (1985). Elevator traffic analysis design and control. IEE control engineering series 2