



Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana
de Inteligencia Artificial

ISSN: 1137-3601

revista@aepia.org

Asociación Española para la Inteligencia
Artificial
España

López, Secundino; García, Marco; Hernández, Pedro; Hernández, Alejandro
Control Inteligente de Redes Urbanas de Tráfico

Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, vol. 4, núm. 10, verano, 2000,
pp. 49-58

Asociación Española para la Inteligencia Artificial
Valencia, España

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92541005>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Control Inteligente de Redes Urbanas de Tráfico*

Secundino López; Marco García; Pedro Hernández; Alejandro Hernández

Centro de Inteligencia Artificial de la Universidad de Oviedo en Gijón

Campus de Viesques s/n. 33271 GIJON

{secun, marco, pedro, alex}@aic.uniovi.es

Resumen

En este artículo se describe el Sistema ITACA para el Control del Tráfico Urbano y se proponen nuevas vías de investigación. Comenzamos realizando un breve recorrido por los diferentes sistemas desarrollados hasta el momento, describiendo los elementos básicos del problema y analizando las características más peculiares del proceso bajo control, entre las que destaca un hecho relevante: la disponibilidad de acciones óptimas no basta para garantizar el control óptimo de la red; necesitamos además un criterio inteligente para trasladar dichas acciones a la calle. Estas peculiaridades contribuyen a aumentar sustancialmente la complejidad del problema y en consecuencia también la del sistema propuesto, que ha sido concebido como un modelo de Inteligencia Artificial en tiempo real basado en una tecnología de agentes que se comunican a través de pizarras. Finalmente, ponemos de manifiesto que el entrenamiento de una red artificial de neuronas para la determinación de la longitud máxima de las colas en los accesos a los cruces nos permite introducir una nuevo modelo de control con arquitectura distribuida.

1 Introducción

Los controladores de tráfico urbano son sistemas que calculan e implantan las temporizaciones de la red semafórica más adecuadas para atender a la demanda del tráfico medida en la calle. Pueden actuar sobre tres variables diferentes para cada uno de los semáforos de la red: el *ciclo* o periodo de las luces, el *reparto* o distribución del tiempo de ciclo entre ellas y el *desfase* o instante del ciclo en el que comienza la fase verde. Para conseguir este objetivo disponen de información sobre el comportamiento del tráfico a lo largo del último ciclo a través de mediciones de intensidad y tiempo de ocupación realizadas cada 5 segundos por un detector habitualmente ubicado antes (aguas arriba) de la línea de parada en cada uno de los accesos a los cruces. Estos valores se almacenan en sendos

vectores denominados *perfíles* de flujo y de ocupación, respectivamente.

Los controladores centralizados pioneros se agruparon esencialmente en torno a dos filosofías: los sistemas de selección en los que el Ingeniero de Tráfico elabora los planes en proceso off-line y luego vincula cada uno de ellos a una situación particular del tráfico, y los sistemas adaptativos que utilizan la información disponible sobre la situación del tráfico para elaborar en proceso on-line y en tiempo real un plan que se acomode a la demanda [1] [5] [7] [19] [27].

La estrategia básica de los controladores adaptativos consiste en proponer periódicamente (al menos una vez por ciclo) ligeras modificaciones de las temporizaciones vigentes con el objeto de ajustar la oferta de los semáforos a las condiciones de la

* Esta investigación ha sido realizada bajo la financiación del CDTI y de la Empresa Sainco Tráfico, S.A. y contando con la colaboración del Ilmo. Ayto. de Gijón.

demandas del tráfico reflejadas en los perfiles. Para llevar a cabo esta tarea se dispone de un hardware de control en el que destacan los siguientes elementos. Un ordenador central que gestiona las comunicaciones, toma las decisiones de control y realiza una propuesta de temporización para cada uno de los semáforos. Varias centrales de zona que actúan como sistemas intermediarios en el proceso de comunicaciones. Y finalmente un regulador para cada cruce encargado de preprocesar la información suministrada por los detectores asociados a dicho cruce y de gestionar la implantación de las órdenes recibidas del sistema central.

En el ámbito de los sistemas centralizados adaptativos han surgido diferentes herramientas de control, entre las que cabe destacar SCOOT [16] [25] [26], SCAT [4] [17] [22] y CLAIRE [3].

En nuestro laboratorio del Centro de Inteligencia Artificial (www.aic.uniovi.es) de la Universidad de Oviedo en Gijón y en colaboración con la empresa SAINCO TRAFICO, S.A hemos desarrollado un sistema de control de tráfico adaptativo en tiempo real con estrategia inteligente denominado ITACA [2], que opera con éxito actualmente en diversas ciudades del mundo. El presente artículo está basado en dicho desarrollo.

2 Control de una Red Semaforica: Características Esenciales del Problema

Desde un punto de vista conceptual, el problema corresponde en términos matemáticos para una situación dada del tráfico a un modelo de optimización de una función objetivo dependiente de un conjunto de variables (duración de las fases para cada uno de los cruces de la red e instante de inicio de las mismas) que deben satisfacer ciertas restricciones. En la mayoría de los casos se elige como objetivo el número total de paradas que se producen en la red, o el tiempo total de espera en cola de los vehículos o el consumo de combustible. Las restricciones vienen dadas por los límites máximo y mínimo establecidos empíricamente para el tiempo de ciclo y para la duración de las fases.

Un análisis elemental nos permite comprobar que no disponemos de información suficiente para determinar el valor de la función objetivo y que el espacio de búsqueda de la solución es intratable en tiempo real debido al número de variables que intervienen en el modelo y a ciertas características especiales del problema que analizamos a continuación.

- *Dificultad para medir la demanda.* Los ojos del sistema son los detectores instalados en los carriles de entrada o accesos al cruce. Cuando dichos detectores están próximos a la línea de parada, como sucede en nuestro caso, la cola de vehículos parados alcanzará con cierta frecuencia la posición de los mismos, invadiéndolos temporalmente. Cuando esto sucede, el detector queda ciego durante el periodo de invasión, con lo que la información que suministra está seriamente viciada.

La tentación de ubicar el detector lo más lejos posible de la línea de parada queda anulada por el riesgo de que la cola crezca indefinidamente sin que exista la posibilidad de detectar tal circunstancia hasta que se produzca la invasión, lo cual afectaría entonces a un número tan importante de vehículos que haría muy difícil la solución del problema.

Por último, la existencia de vehículos aparcados en doble fila obliga a realizar cambios de carril a los restantes vehículos, con lo que la información recibida del carril obstruido es también engañosa.

- *Dependencia entre variables.* Las variables del modelo (ciclo, reparto y desfase) dependen unas de otras. La actuación sobre una cualquiera de ellas modifica el valor de las restantes. A modo de ejemplo podemos advertir que resulta imposible alargar una fase sin modificar el desfase de las restantes y recíprocamente.

• *Objetivo inestable.* Aún admitiendo que la decisión óptima para un carril fuera calculable, la serie de acciones que habríamos de realizar en la red para poner en vigor tal propuesta podría provocar cambios en la demanda del carril capaces de hacer inadecuada dicha solución o de producir un embotellamiento. En otras palabras, cuando conseguimos alcanzar la solución óptima ésta ya dejó de serlo como consecuencia del propio proceso de adecuación de las señales a la temporización propuesta, independientemente de que las condiciones del tráfico hubieran permanecido estables. En definitiva, perseguimos un objetivo móvil.

- *Diferentes estrategias de control.* Debemos señalar también que la modificación de los desfases sólo es factible en los casos en los que la señal dispone de verde sobrante; es decir, cuando $oferta_de_verde > verde_demandado$. Este hecho nos pone sobre la pista de que los criterios de control para los carriles que se encuentran en situación de congestión o precongestión deben ser diferentes. Basta considerar que en tales circunstancias puede no ser razonable un comportamiento adaptativo (a más demanda, más duración del verde) puesto que

podemos provocar un colapso en los carriles receptores. Además, el detector estaría permanente invadido y el sistema se quedaría ciego. Han de coexistir pues diferentes estrategias de control.

- *Colisión de propuestas* El proceso de implantación constituye una tarea especialmente problemática. En la mayoría de los casos la puesta en vigor de una propuesta de temporizaciones requiere varios ciclos. Además, antes de abordar la implantación de una nueva propuesta deberíamos esperar uno o dos ciclos adicionales para que el comportamiento del tráfico se regularice, una vez que cesa la influencia del proceso de implantación. Si la toma de decisiones tuviera un comportamiento síncrono con la Implantación, nos veríamos obligados a demorar el proceso de decisión durante un lapso de tiempo excesivo. Esta posibilidad es rechazada por los Ingenieros de Tráfico, lo que nos obliga a separar ambos procesos y hacerlos asíncronos, de modo que se pueda generar una nueva propuesta antes de que haya sido completamente implantada la anterior. Por otro lado, un proceso de implantación mal concebido puede incluso provocar que el reloj del regulador pierda el control horario del cruce si la orden de modificar la duración de una fase se recibe en un instante inapropiado

- *Óptimos locales*. La experiencia adquirida en las Salas de Control demuestra que los inconvenientes anteriores se agravan especialmente cuando los cambios en las temporizaciones son drásticos. La única forma de evitar esta posibilidad consiste en tomar decisiones muy frecuentemente. Tenemos que limitarnos pues a conjeturar sobre la situación del tráfico y a realizar propuestas suficientemente simples para garantizar que el tiempo de respuesta global sea admisible. En definitiva, renunciamos al óptimo global, y nos restringimos a la búsqueda local para cada cruce de la temporización factible más cercana al óptimo, entendiendo por temporización factible aquella que puede ser implantada en un solo ciclo sin perder su bondad y sin producir una situación de embotellamiento

3 ITACA: Un Sistema Multiagente

Para dar solución a este conjunto de problemas, hemos construido un Sistema de control denominado ITACA cuya estrategia se basa en dos pilares fundamentales:

- La utilización de tres agentes específicos (ciclo, reparto y desfase) que trabajan siguiendo las pautas establecidas por un módulo Planificador. La complejidad del problema nos obliga, con el fin de

disminuir la complejidad del software de control, a dividir el área bajo control en un conjunto de cruces que se controlan independientemente y cuyas soluciones parciales habrán de conjuntarse para producir la solución global que será implantada en la calle. Admitimos la hipótesis (razonablemente verificada en las pruebas de campo posteriores) de que una *buena* temporización para cada cruce nos proporcionará una *buena* temporización global para la red.

- La existencia de un Agente Implantador capaz de armonizar las propuestas de los agentes de ciclo, reparto y desfase, realizadas de forma independiente para cada cruce, y de trasladarlas eficazmente a la calle ([2] y [21]).

En la versión actualmente operativa, ITACA se basa fundamentalmente en la planificación de agentes [6] [8] [10] [15] [25] [29] [31] y adopta una arquitectura inspirada en AIS (Adaptive Intelligent Systems) [11]. Está concebido como un sistema centralizado en el que todas las decisiones se toman en un ordenador central en el cual reside el Sistema Cognitivo. Los cruces se ordenan en sentido decreciente de acuerdo con la carga que soportan y se gestionan secuencial e idénticamente en un único proceso de control en el que los sistemas cognitivo, de percepción y de acción trabajan continuamente de modo concurrente.

Realizamos a continuación una breve descripción de los módulos principales representados en la Fig. 1 y de la funcionalidad de los mismos.

El sistema de percepción recoge segundo a segundo datos de intensidad y ocupación de los detectores. Con el fin de evitar el colapso de las comunicaciones, esta información es procesada y acumulada en períodos de agregación de 5 segundos. A continuación es transmitida al sistema central en el que a través de las correspondientes estructuras de datos para la intensidad y la ocupación se representa el comportamiento del tráfico a lo largo del último ciclo.

A partir de la Base de Datos de entrada y del Conocimiento de control educido de los expertos locales de tráfico, el agente Evaluador clasificará el estado de los cruces en función de las cargas medidas en los perfiles y de la longitud de las colas en los accesos, y los asignará a una de las siguientes categorías: Congestión, Precongestión y Verde_Sobrante. Este proceso es importante puesto que permitirá al Gestor de la Agenda seleccionar en cada caso la fuente de conocimiento más adecuada, la cual pasará a tener máxima prioridad en la Agenda. En los dos primeros casos, el conocimiento se representa por medio de un sistema de reglas de

producción. En el tercero, de carácter esencialmente algorítmico y que tiene como entrada la terna compuesta por los dos perfiles y la estimación de la longitud de la cola, se contemplan estrategias diferentes según que la optimización se realice atendiendo a una orientación de la red por rutas (desfases orientados) o a un criterio global (desfases promediados entre los accesos al cruce).

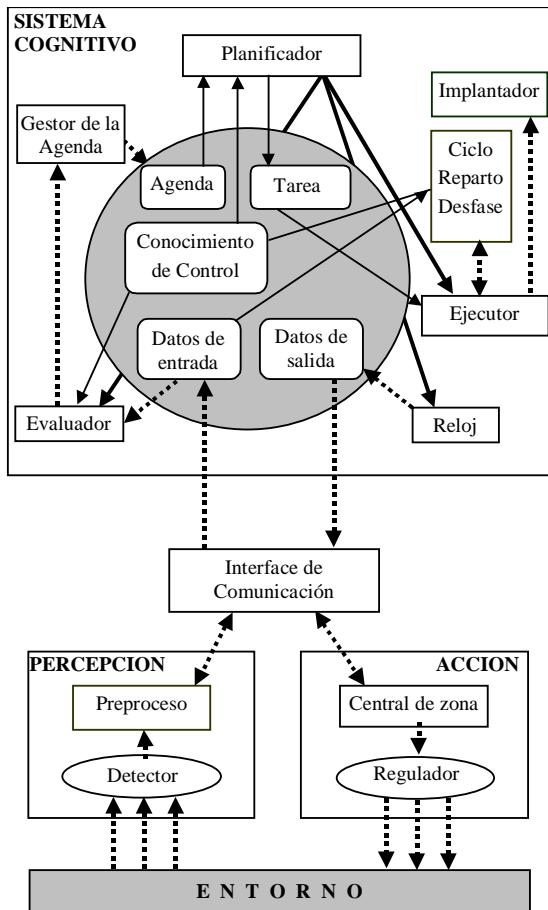


Fig. 1 Arquitectura de ITACA

El agente Planificador es el encargado de proponer tareas al Ejecutor en el momento adecuado, determinando cuál de los agentes Ciclo, Reparto o Desfase debe activarse, así como de activar el mecanismo de envío de órdenes a la calle. Cuando el Ejecutor recibe del Planificador el encargo de realizar una tarea, reclama la actuación del agente o agentes necesarios y realiza una propuesta de temporización para el cruce. Teniendo en cuenta la filosofía de actuación de los más recientes reguladores de cruce, la única acción posible sobre las señales consiste en modificar el instante de finalización de las fases verdes y, por lo tanto, las propuestas iniciales del Ejecutor (descritas a más

alto nivel) deberán ser traducidas a impulsos de cambio de fase y conjuntadas con la situación actual de las temporizaciones. Esta tarea es realizada por el Implantador a instancias del Ejecutor (Fig. 1) y constituye uno de los puntos cruciales y tal vez más conflictivos del sistema, puesto que el proceso de implantación repercute directamente en la toma de decisiones posteriores, lo que nos obliga a conocer en todo momento la temporización real del cruce. A continuación describimos con más detalle este proceso.

Sabemos, pues, que no basta con disponer de una buena propuesta. Es necesario traducirla e implantarla inteligentemente. En caso contrario, los efectos pueden ser desastrosos. En [21] se propone una solución para este problema basada en una arquitectura de pizarras [9] [18] [23] [28] que ha mostrado un rendimiento óptimo en múltiples pruebas de campo en las que la implantación de las propuestas se realizó satisfactoriamente. En la figura 2 se recogen las principales ideas directrices.

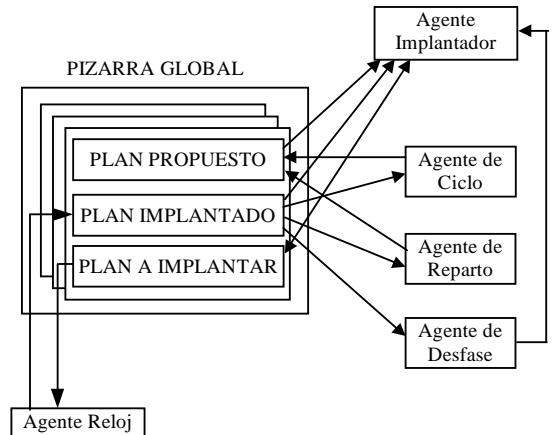


Fig. 2 Estructura de la pizarra global

Cada vez que el Ejecutor dispone de una propuesta global para el cruce, ésta es traducida por el Implantador a un nuevo formato en el que se especifican los instantes del ciclo en el que deben comenzar y finalizar cada una de las fases. En una estructura de información llamada *Plan Propuesto* (PP) recogemos dichos instantes de inicio y final propuestos para las fases verdes. A instancias del Planificador, otro Agente denominado *Reloj* comprueba segundo a segundo para cada cruce si el instante de ciclo actual coincide con el recogido en el PP como final de su fase verde, en cuyo caso ordena al regulador un cambio de fase. Inmediatamente surge una pregunta obvia. ¿Es posible gestionar los cruces simplemente a partir del PP? La respuesta es negativa. Basta pensar que podría darse la circunstancia de que se planificasen

nuevas actuaciones sin conocer el grado de implantación de otras acciones previas. Además una estrategia basada exclusivamente en el Plan Propuesto podría provocar que el regulador pierda la referencia del tiempo [21]. Estos inconvenientes podrían eliminarse demorando la implantación de las propuestas hasta el inicio del ciclo siguiente. Sin embargo, esta solución no es admisible puesto que la base para lograr un buen rendimiento de ITACA consiste en responder en tiempo real a las demandas de la red. Necesitamos entonces una segunda estructura de información llamada *Plan Implantado* (PI) en la que anotamos los inicios y finales de verde implantados en la calle, o lo que es lo mismo lo que llevamos implantado del Plan Propuesto. El Agente Reloj debe modificar su comportamiento puesto que ahora debe enviar una notificación al PI cada vez que ordena al regulador un cambio de fase.

No obstante, la información recogida en el Plan Implantado no es suficiente. De hecho puede suceder que su contenido sea inconsistente [21]. Necesitamos entonces introducir una tercera estructura denominada *Plan a Implantar* (PAI) en la que anotamos un nuevo plan obtenido al conjuntar el PP y el PI de modo que se eliminen las inconsistencias. La conjunción de planes está a cargo del Agente *Implantador*. Esto nos obliga de nuevo a modificar ligeramente el comportamiento del Reloj. Ahora deberá determinar si el instante actual del ciclo coincide con el final de la fase verde recogido en PAI y, en ese caso, enviar al regulador la correspondiente orden; además, se encargará de modificar el valor correspondiente en el PI. Realmente el PAI (que generalmente diferirá del Plan Propuesto) es el plan por el que el cruce se rige en todo momento.

La conjunción de las tres estructuras (PP, PI y PAI), se organiza como una pizarra (Figs. 2 y 3). Cada uno de los cruces dispone de una réplica de la misma.

Intuitivamente y a modo de resumen podemos decir que el Agente Reloj tiene permiso de lectura sobre el Plan a Implantar y de escritura sobre el Plan Implantado y que el Implantador tiene permiso de lectura sobre los Planes Propuesto e Implantado y de lectura y escritura sobre el Plan a Implantar.

En la figura 3 se representa gráficamente la estructura y el contenido de la pizarra asociada a uno de los cruces de la red. Como ya hemos mencionado, el Sistema Cognitivo dispone de tres agentes denominados ciclo, reparto y desfase que deben coordinar su actuación para producir una solución factible, puesto que como hemos visto en el apartado 2 sus decisiones no son independientes. En ITACA la coordinación entre ellos es bastante

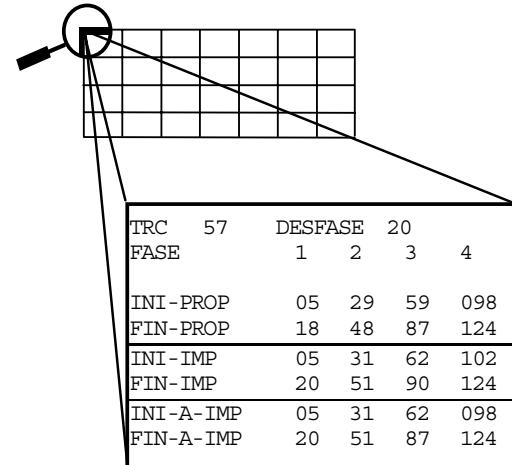


Fig. 3. Pizarra de Implantación

simple. Se limita a otorgar el máximo nivel jerárquico al Reparto, de tal modo que Ciclo y Desfase respeten la proporcionalidad entre la duración de los verdes establecida por aquel. Por otro lado, las modificaciones propuestas por el Desfase requieren una modificación del instante de finalización del ciclo y por lo tanto se traducen en modificaciones temporales (siempre inferiores a un ciclo absoluto) de la duración del ciclo; es por esta razón por lo que sus propuestas no se llevan al PP sino al PAI (Fig. 2).

La experiencia acumulada durante los últimos años en las ciudades donde ha sido instalado ITACA nos muestra que una comunicación tan reducida entre los agentes presenta algunos problemas. Destacamos los dos siguientes: 1) En ciertas condiciones, cuando la red es tratada como una malla cerrada, aparecen circuitos de carriles en los que un cambio en la temporización de uno cualquiera de los cruces que integran dicho circuito provoca un deterioro en el desfase del siguiente que debe ser corregido a continuación. Este fenómeno se propaga sucesivamente por el circuito, creando un efecto dominó que repercute nuevamente en el primero, volviendo a reproducirse el problema. 2) Como consecuencia de la actuación secuencial y de la estructura jerárquica, las decisiones de los agentes de ciclo y de desfase pueden ser revocadas sin su consentimiento. Aunque la rigidez del criterio tiene una influencia moderada sobre el error global de la decisión, es un punto débil del diseño que contribuye a deteriorar la bondad de la misma. 3) La estrategia de implantación de propuestas es eficaz cuando actúa localmente sobre un cruce; no obstante, en muchas ocasiones podría aumentar su eficacia si le dotásemos de una mayor capacidad de

análisis a partir del conocimiento de las propuestas de los cruces adyacentes.

5 Nuevas Perspectivas en el Control del Tráfico Urbano: Sistemas Distribuidos Multiagentes

Con el fin de corregir estas deficiencias, la anterior visión localista del proceso de control está siendo revisada actualmente en una nueva versión del sistema en la que se eliminan las principales deficiencias observadas en la versión anterior. Esencialmente se ha incluido un nuevo módulo basado en la utilización de una red artificial de neuronas para la determinación de la longitud máxima de la cola de vehículos a lo largo del ciclo, se ha corregido la funcionalidad de algunos módulos y se ha propuesto una nueva arquitectura distribuida en la que la responsabilidad del control recae en cada uno de los reguladores. A continuación analizamos con más detalle todos estos aspectos.

5.1. Determinación de la longitud de una cola de vehículos a partir de una red artificial de neuronas

En [20] se demuestra que estimando el número de vehículos que demandan paso en cada ciclo y el momento en el que cada uno de ellos alcanza la línea de parada, una buena parte del problema de control estaría resuelto puesto que nos permitiría integrar las decisiones respecto al reparto y el desfase en un único módulo bastante simple conceptualmente. Así mismo, hemos comprobado que estos requisitos pueden deducirse con cierta precisión a partir de los perfiles proporcionados por el detector y de la longitud máxima alcanzada en el ciclo anterior por la cola de vehículos. La estimación de la longitud máxima de la cola se convierte así en un objetivo clave para simplificar la solución del problema. En [12] [13] [14] abordamos esta tarea partiendo de una conjectura inicial: la observación conjunta de los perfiles de flujo y de ocupación debe aportar alguna pista sobre la velocidad instantánea de los vehículos en el instante de paso por el detector. Si tenemos en cuenta que la longitud del detector es conocida y que la longitud promedio de los vehículos puede estimarse estadísticamente, el cociente flujo/ocupación nos permite relacionar espacio y tiempo y, por tanto, constituye una aproximación a la velocidad instantánea de los vehículos. Si nuestra suposición es cierta, debe producirse una ligera variación entre la velocidad de los vehículos que arrancaron desde la cola y la de aquellos que circularon sin restricción alguna. Esto es, podríamos dividir los perfiles en dos bloques. Uno estaría asociado a los vehículos

que formaron parte de la cola y el otro correspondería a los que circularon libremente. Hemos comprobado que cuando este punto frontera existe podemos detectarlo por medio de una red artificial de neuronas.

Con este fin hemos diseñado, en colaboración con la Sala de control de Tráfico del Ayuntamiento de Gijón, un experimento consistente en la observación de 320 procesos diferentes de descarga de una cola en diferentes condiciones de tráfico y para diferentes tipos de carril, siempre bajo la condición de que la cola contuviera al menos 10 vehículos. En cada proceso anotamos el instante del ciclo (medido desde el inicio de la fase verde) en el que el último vehículo de la cola atravesó la línea de parada. Teniendo en cuenta que cada unidad de medida corresponde a 5 segundos, podemos generar en cada ciclo un conjunto contenido en DURACION_CICLO/5 ternas del tipo *{intensidad, ocupación, último?}* en las que *intensidad* corresponde al número de vehículos que atravesaron el detector en el intervalo de medida correspondiente, *ocupación* al número de segundos en los que el detector estuvo invadido en dicho periodo, y donde *último?* es un booleano con valor cierto si en el periodo de medida se produjo el paso por el detector del último vehículo en cola y falso en caso contrario. Para cada ciclo existe a lo sumo una terna en la que *último?* toma el valor cierto. Si dicha terna existe, al instante de medida correspondiente se le denomina *tiempo de desalojo*. De este modo se han generado 2890 ternas que fueron utilizadas como conjunto de entrenamiento de una red artificial de neuronas [30]. Sometida dicha red a una gran batería de pruebas, hemos comprobado que estima correctamente el tiempo de desalojo en el 53% de los casos y produce un error de 1 unidad de medida en el 38% de las ocasiones.

Estos resultados nos permiten afrontar con garantía el proceso de decisión sobre la temporización de las señales a partir de la estimación de las colas realizadas por la red de neuronas. Dicha red se integra como un nuevo módulo del Sistema Cognitivo contribuyendo a mejorar la información contenida en los datos de entrada.

5.2. Integración de los módulos de Ciclo, Reparto y Desfase

Uno de los puntos débiles que con más frecuencia se ha puesto de manifiesto en la versión anterior es el concerniente a la jerarquización y comunicación de los módulos de Ciclo, Reparto y Desfase. Teniendo en cuenta que el conocimiento de la longitud máxima de las colas facilita la gestión conjunta de reparto y desfase, hemos conseguido mejorar el criterio anterior desarrollando una nueva estructura

para el conocimiento que facilite la gestión del ciclo por medio de un agente específico, mientras que el reparto y el desfase se integran en un único agente encargado de proponer los instantes de inicio de las fases verdes del cruce para los que la función objetivo alcanza el valor mínimo; para conseguir este objetivo hemos incorporado un simulador capaz de evaluar en cada cruce en un tiempo razonable el impacto real de las diferentes opciones posibles para la pareja reparto-desfase. Sin embargo, aunque el tiempo requerido por el simulador para producir una decisión es admisible para un cruce aislado, no lo es si la decisión global sigue rigiéndose por el criterio anterior en el que todos los cruces se tratan secuencialmente en un único proceso, puesto que alargaríamos el periodo de decisión global hasta unos límites inaceptables. La necesidad de paralelizar el proceso es una de las razones fundamentales que nos han llevado a distribuir la toma de decisiones en los reguladores, aprovechando que incorporan un procesador Pentium con capacidad suficiente para soportar localmente la estrategia de decisión para el cruce que gobiernan.

Para implementar este criterio, el módulo cognitivo que anteriormente residía en el ordenador central debe ser replicado en cada uno de los reguladores que pasarán a gestionar individualmente el cruce que tienen a su cargo. En cualquier caso, esta posibilidad debe ser analizada con más detalle a la vista de los problemas que se generan en la implantación de las propuestas de desfase.

5.3. Mejora de la estrategia de Implantación

La asunción de una estrategia de desfases como la expuesta anteriormente con ámbito local para cada cruce, no siempre es la más adecuada para la coordinación de rutas orientadas. Aunque el reparto tiene un carácter eminentemente local, el desfase debe utilizarse muchas veces (especialmente en las situaciones de congestión) como elemento coordinador de señales consecutivas; es decir, como coordinador de rutas. En este caso, el desfase debe ser considerado como una relación entre parejas de señales consecutivas y la estrategia correspondiente debe estar formulada en términos relativos entre pares de señales, de tal modo que los vehículos procedentes de una señal alcancen la siguiente en el momento adecuado sin necesidad de detener la marcha.

En [20] proponemos una estrategia eficiente para el cálculo de desfases relativos admisibles, pero el criterio propuesto genera un nuevo problema de implantación que debemos resolver previamente. Para comprender esta necesidad, fijémonos en el gráfico de la figura 4 en el que se representa una

ruta orientada formada por los accesos A, B, C y D. Si el algoritmo de desfase demanda un incremento del desfase relativo de 5 segundos en todos ellos, nos encontraremos con que existen diferentes soluciones para la implantación de dicha propuesta. Y no todas equivalentes respecto al impacto causado. Una posibilidad consiste en dejar fijo el inicio del verde de A, demorar 5 segundos el de B, 10 el de C y 15 el de D. Representaremos esta solución por (0,5,10,15). También conseguiríamos adecuar los desfases relativos a la propuesta si optásemos por otra solución bien diferente (-15,-10,-5,0). Entre ambas soluciones extremas, existen innumerables soluciones intermedias que pueden priorizarse de acuerdo con una función de penalización. Desgraciadamente, el procedimiento para buscar la solución óptima teórica del problema tiene una complejidad exponencial m^n , donde m representa el número de movimientos posibles para el inicio y el final de la fase verde del acceso y n el número de accesos que componen la ruta. Si pensamos en que las rutas de tamaño medio contienen alrededor de 10 accesos, es obvio que no podemos permitirnos la búsqueda de dicha solución óptima. Hemos propuesto una solución heurística que aproxima razonablemente el óptimo con un costo computacional del orden n^2 .

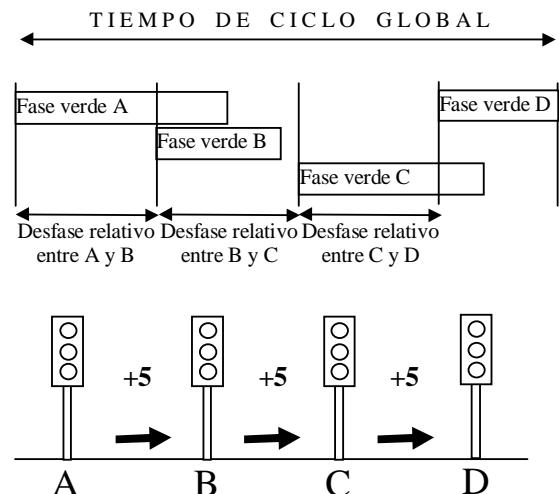


Fig. 4 Implantación de Desfases

Este nuevo planteamiento no tiene cabida en una arquitectura distribuida tan rígida como la apuntada en el apartado anterior, puesto que la concepción del desfase como armonizador de rutas colisiona con la distribución de las decisiones en los reguladores. Proponemos entonces que los reguladores tengan capacidad cognitiva suficiente para admitir un doble comportamiento como gestores locales de cruces y como coordinadores de área. Cuando actúan localmente gestionan exclusivamente el cruce a su cargo y cuando lo hacen como coordinadores

(adquieren el rango de cruce maestro) gobiernan conjuntamente todos los cruces asociados a su ruta. Cada ruta dispondrá de único regulador autorizado para actuar como maestro y se determina en el momento de la definición de la misma. Con la exigencia de que cualquier regulador pueda adquirir la condición de maestro garantizamos el máximo dinamismo en la configuración de rutas.

Para los cruces que no tienen la categoría de maestros existen dos estados o modos de operación diferentes, como gestores locales autónomos o como esclavos del maestro. A su vez, el maestro puede actuar de modo local (cuando decida un funcionamiento autónomo de todos los cruces de la ruta) o como gestor global de la misma.

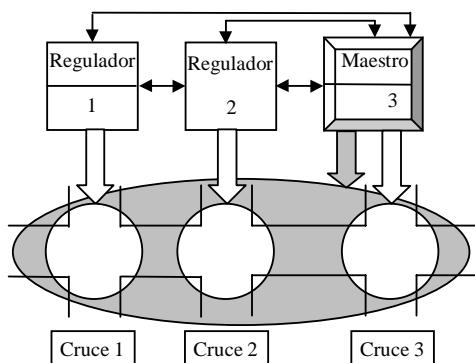


Fig. 5 Comunicaciones entre reguladores

Como es obvio, para llevar a la práctica este planteamiento necesitamos disponer de una vía de comunicación entre los reguladores, de forma que el maestro intercambie información con los esclavos y recíprocamente (Fig. 5). Dado que el volumen requerido de datos es bastante reducido, y que nos encontramos en entornos urbanos, existe la posibilidad de utilizar como soporte de las comunicaciones la red de fibra óptica o el sistema de mensajes cortos GSM. En cualquier caso, la estructura actual por la que los cruces envían información a la Sala de Control a través de líneas dedicadas, permitiría soportar la nueva arquitectura.

5.4. Modificación de la arquitectura del Sistema

La nueva arquitectura, algo más compleja que la anterior, nos obliga a realizar ciertas modificaciones en algunos de los módulos más relevantes.

- *Modificaciones en el Planificador.* Aunque se mantiene el criterio para la planificación de las tareas de primer nivel cuyo plazo de ejecución está establecido y es invariable (actuación del Agente Reloj, petición de datos a los reguladores, etc.), la planificación de las tareas segundo nivel debe

modificarse sustancialmente. Teniendo en cuenta que cuando el regulador actúa como gestor local controla exclusivamente el cruce que tiene asociado y que cuando actúa como maestro toma una decisión global para el conjunto de cruces a su cargo, sin recurrir a la simple adición de óptimos locales, podemos prescindir de la tarea de ordenación de los cruces y de la organización secuencial del proceso.

Para que los cruces maestros puedan coordinar una ruta de modo global será necesario que la base de conocimiento incorpore conocimiento específico. En cualquier caso, incluso cuando un regulador actúe como maestro, recibirá de los reguladores esclavos la propuesta de reparto más adecuada para el cruce correspondiente, limitándose por su parte a la organización de los desfases sobre la base de estas propuestas.

Como ya hemos mencionado, el planificador tiene un comportamiento polimórfico dependiendo de que el regulador actúe como maestro, como esclavo o como gestor local. En el primer caso, estará encargado de decidir y comunicar al resto de reguladores de la ruta los momentos en los que asume y cede el gobierno de la misma, así como el contenido de las decisiones tomadas, y deberá gobernar el intercambio de información necesario. En el segundo caso, el planificador organizará las tareas atendiendo a los requerimientos del maestro incluso para el envío de órdenes a la calle, salvo en algunos casos extremos que mencionaremos más adelante. Finalmente, cuando actúa como gestor local, se limita a controlar íntegramente el cruce y a comunicar a sus vecinos las decisiones tomadas, con el fin de que éstos puedan utilizar dicha información en su proceso de decisión.

- *Modificaciones en la Base de Conocimiento de control.* Para atender a la nueva filosofía, necesitaremos una ampliación del conocimiento disponible y una nueva organización del mismo. Dividiremos el conocimiento en tres fuentes: la primera permite tomar decisiones de modo local, la segunda contiene el *expertise* necesario para la ordenación de una ruta y la tercera será de aplicación en algunos casos de emergencia e incluye ciertos planes preestablecidos en proceso off-line. En realidad, cualquiera que sea el estado del regulador, siempre utilizará en su proceso de decisión las dos primeras fuentes, puesto que el maestro se apoya en propuestas procedentes de los esclavos. El Gestor de la Agenda es el encargado de seleccionar en cada caso la fuente adecuada.
- *Introducción de Monitores.* Siguiendo la línea de otras arquitecturas [15] [24], hemos introducido monitores encargados de activar los procesos necesarios para que un regulador esclavo recupere el

control si los datos recibidos de los detectores indican una situación extraordinaria, o bien se interrumpen las comunicaciones o ha transcurrido un lapso de tiempo excesivo desde la recepción de la última decisión tomada por el maestro. Cuando el Evaluador detecta una de estas situaciones, los monitores se activan de modo automático e independientemente del estado del regulador.

- *Modificaciones en el Ejecutor.* En la versión anterior, el Ejecutor se ocupaba de la armonización de las propuestas de los Agentes de Ciclo, Reparto y Desfase. Puesto que ahora Desfase y Reparto se integran en un único Agente, será necesario modificar ligeramente el comportamiento del Ejecutor y la estructura de la Pizarra.

Los sistemas de Percepción y de Acción se mantienen invariables con respecto a la versión anterior.

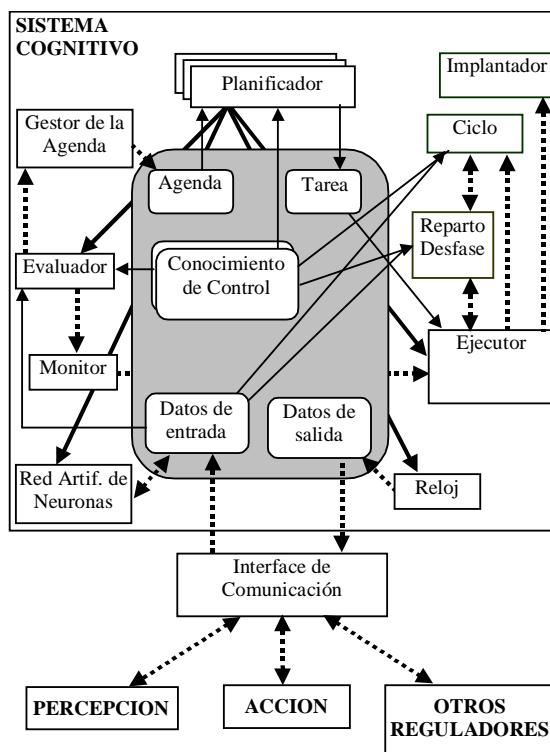


Fig. 6 Nueva arquitectura para un sistema distribuido

En la figura 6 se representan esquemáticamente las principales modificaciones introducidas en la arquitectura del sistema.

6 Conclusiones

A través de esta somera descripción de ITACA hemos puesto de manifiesto las posibilidades reales de la Inteligencia Artificial Distribuida como técnica capaz de soportar Sistemas de control en tiempo real. La sucesiva utilización de ITACA en diferentes ciudades nos ha permitido verificar esta posibilidad.

Experimentalmente hemos podido comprobar también que la arquitectura propuesta facilita la adecuación del Sistema a las peculiaridades de cualquier red urbana, al independizar los módulos Cognitivo, de Percepción y de Acción y al separar drásticamente conocimiento y procedimientos, lo cual supone una ventaja muy valorada desde el punto de vista del Ingeniero de Tráfico.

Finalmente, debemos señalar como aspectos fundamentales sobre los que debería incidirse en el futuro, los relacionados con los mecanismos de coordinación entre Agentes, tratando de que cada regulador aproveche más eficazmente las decisiones de los restantes.

7 Referencias

- [1] Akcelik, R. Capacity and timing calculations methods for signaled intersections. Procs. Of the International Symposium on Traffic Control Systems. Berkeley. (1979). 33-58.
 - [2] Bahamonde, A.; López-García, S.; Hernández-Arauzo, P.; Bilbao, A.; Vela, C.R.: ITACA: An Intelligent Urban Traffic Controller. Proceedings of IFAC Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications, SICICA'92. Málaga, (1992) 787-792
 - [3] Bell, M.; Scemama, G.; Ibbetson, L.: CLAIRE an expert system for congestion management. Proceedings of the Drive Conference. Brussels (1991)
 - [4] Cornwell, P.R.; Luk, J.Y.K; Negus, B.J. Tram priority in Scats. Procs of 2nd International Conference on Road Traffic Control. London. (1986). 333-337.
 - [5] Cuena, J. Intelligent Systems for traffic flow management: A qualitative modeling approach. International Journal of Intelligent Systems, 7. (1992). 133-153.
 - [6] Durfee, E.; Rosenschein, J. Distributed Problem-Solving and Multi-agent Systems: Comparisons and Examples. Proc. 13th Dai Workshop. (1994). 94-104. Jennings, N. Coordination Techniques for Distributed Artificial Intelligence. Foundations of distributed Artificial Intelligence (O'Hare&Jennings, Eds.). Wiley&Sons. (1996). 187-210.

- [7] Forastè, B; Scemama, G.: Surveillance and congested traffic control in Paris by expert system. Proceedings of 2nd. International Conference on Road Traffic Control. London (1986). 333-337
- [8] García Fornés, A.; Botti, V. ARTIS: Una Arquitectura para Sistemas de Tiempo Real Inteligentes. VI Conferencia de la Asociación Española para la Inteligencia Artificial. (1995). 161-174.
- [9] Hayes-Roth, Barbara. A Blackboard Architecture for Control. *Artificial Intelligence*, 26. (1985). 251-321.
- [10] Hayes-Roth, Barbara. Architectural foudations for Real-Time Performance in Intelligent Agents. *Journal of Real-Time Systems*, 2. (1990). 99-125.
- [11] Hayes-Roth, Barbara. An Architecture for Adaptive Intelligent Systems. *Artificial Intelligence*, 72. (1995). 329-365.
- [12] Hernández-Arauzo, P.; López-García, S.; Bahamonde, A.: Artificial Neural Networks for the computation of traffic queues. *Biological and Artificial Computation: From Neuroscience to technology. LNCS*, Vol. 1240. Springer-Verlag, Berlin (1997) 1288-1297.
- [13] Hernández-Arauzo, P.; Bahamonde, A.; López-García, S.: Sobre la Calculabilidad del tiempo de desalojo de una cola de vehiculos. Proceedings of VI Conferencia de la Asociación Española para la Inteligencia Artificial, CAEPIA-95. Alicante. Spain. (1995) 449-458
- [14] Hernández-Arauzo, P.: Traffic queues computation. A virtual problems model, Ph. D. dissertation. Universidad de Oviedo at Gijón. (1996). p. 104 + ii
- [15] Howe, Adele E.; Hart, David M.; Cohen, Paul R. Addressing Real-Time Constraints in the Design of Autonomous Agents. *Journal of Real-Time Systems*, 2. (1990). 81-97.
- [16] Hunt, P.B.; Robertson, D.I.; Bretherton, R.D.; Winton, R.I.: SCOOT a traffic responsive method of coordinating signals. *TRRL Report LR1014*, Transport and Road Research Laboratory. Crowthorne (1981)
- [17] Institute of Transportation Engineers Australian section: Management and Operation of Traffic signals in Melbourne. Technical report. Melbourne. (1985)
- [18] Jagannathan, V.; Dodhiawala, R.; Baum, Lawrence S. *Blackboard Architectures and Applications*. Academic Press. (1989).
- [19] Kirby, H.R.; Montgomery, F.A. Towards a rule-based approach for traffic signal design. *Civil Engineering Systems*, 4. (1987.)
- [20] López, S.; Hernández, P.; Hernández, A.; García, M. Artificial Neural Networks as useful tools for the optimization of the relative offset between two consecutive traffic lights. Documento técnico del Centro de Inteligencia Artificial. 1999.
- [21] López, S.; García M. Diseño de una arquitectura de pizarras aplicable a un Sistema Adaptativo de Control de Tráfico. *Actas de la VI Conferencia de la Asociación española para la Inteligencia Artificial. CAEPIA-95*. Alicante. España. (1995). 105-114.
- [22] Lowrie, P.R.: The Sydney co-ordinated adaptive traffic system. *Principles, Methodology and algorithms. Proceedings of the International Conference on Road Traffic Signalling*. London. (1982). 67-70
- [23] Nagao, M. *Knowledge and Inference*. Academic Press. (1990)
- [24] Ogasawara, G.H.. A distributed decision-theoretic control system for a mobile robot. *SIGart Bulletin*, 2. (1991) 140-145.
- [25] Ossowski, S.; García serrano, A.; Cuena, J. Coordinación descentralizada en sistemas de agentes autónomos para resolución de problemas: aplicaciones a la gestión del tráfico. *Actas de la VI Conferencia de la Asociación española para la Inteligencia Artificial. CAEPIA-95*. Alicante. España. (1995). 551-560.
- [26] Robertson, G.D. Handling congestion with SCOOT. *Traffic Engineering and Control*. April.(1987). 228-230.
- [27] Scemama, G. Un sistema basado en el conocimiento para la gestión del tráfico urbano. *Recherche Transports Securite*. Paris. (1990)
- [28] Schalkoff, Robert J. *Artificial Intelligence: An Engineering Appoach*. McGraw-Hill. 1990.
- [29] Vivancos, E.; Hernández, L. Y Botti, V. Inteligencia Artificial Distribuida en entornos de tiempo real. *Inteligencia Artificial*, 6. (1998). 24-35.
- [30] Zella, A. et al.: *SNNS: Stuttgart Neural Network Simulator*. User Manual, Version 4.1. Institute for Parallel and Distributed High Performance Systems. Technical Report No. 6/95. (1995).
- [31] Zilberstein, Shlomo. Using Anytime Algorithms in Intelligent Systems. *AI Magazine*, 17. (1996). 73-83.