Regulación de las cuatro fases de los ciclos de los semáforos de un cruce urbano mediante un algoritmo basado en recocido simulado

Lema Fernández, Carmen Socorro [carmen.lemaf@udc.es]
Pedreira Andrade, Luís Pedro [lucky@udc.es]
Dpto. Economía Aplicada II
Universidade da Coruña
Bouza Allende, Gemayqzel [gema@matcom.uh.cu]
Allende Alonso, Sira [sira@matcom.uh.cu]
Universidad de La Habana (La Habana-Cuba)

RESUMEN

Debido al incremento de la densidad del flujo del tráfico en zonas urbanas, se necesita un funcionamiento óptimo de los semáforos. En este trabajo presentamos un modelo que describe la evolución de las longitudes de las colas en un cruce de dos calles con los dos sentidos de circulación con semáforos controlables en cada esquina (cuatro fases en cada ciclo). Pretendemos calcular una sucesión temporal switching para semáforos que minimice un criterio dado, tal como la longitud media de la cola sobre todas las colas, la longitud de la cola en el peor caso, el tiempo medio de espera, una combinación de las anteriores, entre otras posibilidades. Para su solución, proponemos usar una metaheurística, tipo recocido simulado. Aplicaremos el modelo propuesto para analizar el tráfico en la intersección semaforizada de la Avenida de Finisterre con la Ronda de Nelle en A Coruña.

ABSTRACT

Because of the increasing density of the traffic flow in urban areas there is a need for optimal performance of traffic lights. In this paper we study a model that describes the evolution of the queue lengths at an intersection of two two-way streets with controllable traffic lights on each corner (four phases in each cycle). We want to compute the traffic light switching scheme that minimizes a given criterion, such as average queue length over all queues, worst case queue length, average waiting time, a combination, etc. We solve the associated optimization model with linear complementarity constraints by a simulated annealing approach. We also present some numerical examples corresponding to the junction Finisterre avenue and Ronda de Nelle streets in A Coruña.

***Palabras claves*:**
Intersecciones semaforizadas; control óptimo de semáforos; recocido simulado.

***Área temática*:** Optimización

1. INTRODUCCIÓN

La congestión de tráfico es un problema cada vez más acuciante en las ciudades ya que causa no sólo incomodidades e inconvenientes, sino que, también supone un gran problema económico y medioambiental. Si el problema no se trata correctamente, puede incluso paralizar el crecimiento económico y desarrollo de nuestras ciudades y contribuir significativamente al indeseable "efecto invernadero" y al cambio climático. Incluso cuando la sobresaturación de vehículos dura poco y ocurre en una zona pequeña o en una esquina en particular, su efecto negativo en el flujo del tráfico puede prolongarse por bastante tiempo. La sobresaturación se define como la situación en la cual los vehículos no pueden moverse libremente debido a la cantidad de autos que están en una intersección o a las colas que se han formado en las calles por las cuales se puede salir de la intersección. Por otro lado, cuando no hay congestión queremos también que los vehículos atraviesen distintas zonas de la ciudad, o circulen por las vías principales en el menor tiempo posible.

Cuando, como ocurre en muchos casos, el ampliar las infraestructuras de tráfico no es viable por motivos económicos, de espacio o medioambientales, se necesita optimizar y mejorar las infraestructuras existentes para obtener el mejor servicio posible. La buena coordinación de la red de semáforos de la ciudad y la optimización de los ciclos y fases de los mismos son herramientas fundamentales para tratar de resolver los problemas de congestión de tráfico y sobresaturación de vehículos. Diferentes autores, y entre ellos Huang [Huang, D.W. (2003)], Natagani [Natagani, T. (2006)] o Poli [Poli, J. (2005)] han demostrado que la secuencia de los semáforos tiene una influencia fuerte en los resultados de la circulación. Coordinar o planificar un semáforo incluye esencialmente decidir cuál es la duración del ciclo completo del mismo, y cuál es la duración del verde en cada dirección de cada una de las calles que son parte de la intersección.

En este trabajo se estudia un problema de regulación del tráfico a través del ajuste de los ciclos de los semáforos (problema en el que existen cuatro fases en cada ciclo), para una intersección de dos calles con los dos sentidos de circulación, proponiendo para su resolución un algoritmo heurístico inspirado en la metaheurística de recocido simulado, ya que es prácticamente imposible encontrar procedimientos exactos de resolución que operen en tiempos realistas y con tecnologías asequibles.

El trabajo se organiza de la siguiente manera: En el apartado dos presentamos el problema de control óptimo y su modelación, en el apartado tres exponemos un algoritmo basado en la metaheurística de recocido simulado para el problema de sincronización de semáforos, fundamentado en el propuesto en [Lema, C. et al. (2011)]. La aplicación de dicho algoritmo en el cruce de la avenida de Finisterre con la Ronda de Nelle en A Coruña, se discute a continuación y además se indican los resultados obtenidos mediante la programación en MATLAB del algoritmo mencionado. Finalmente, se establecen las conclusiones obtenidas y las líneas de trabajo que permanecen abiertas en este tema.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y SU MODELACIÓN

En esta sección presentamos un modelo matemático para el problema de control de tráfico en un cruce. Se tiene una intersección a la que confluyen dos calles, ambas doble vía en las que se puede circular de frente, girar a derecha e izquierda (figuras 1, 2, 3 y 4). En cada esquina del cruce hay un semáforo. Se quiere hallar los períodos en que deben permanecer en verde o rojo las luces de los semáforos T_1, T_2, T_3 y T_4 para evitar la congestión de las vías, descrita por el número de vehículos en espera (longitud de la cola) en cada vía. Para ello se consideran distintos criterios: la suma de las longitudes medias de las colas de cada vía, longitud de la cola más larga, tiempo medio de espera o una combinación de ellas. Con este planteamiento, hemos de modelar y resolver un problema que en cada ciclo tiene cuatro fases:

- En la **primera fase** (Figura 1) el semáforo T_1 está verde y T_2, T_3 y T_4 permanecen en rojo, por tanto los coches del carril L_1 rebasan el cruce, continuando de frente o girando a la derecha o a la izquierda.

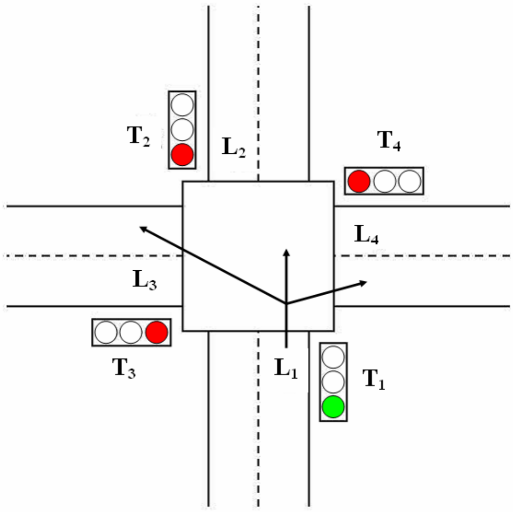

Figura 1: Fase 1

- En la **segunda fase** (Figura 2) el semáforo T_2 que ha cambiado de rojo a verde, permite que los vehículos que circulan por el carril L_2 rebasen el cruce siguiendo de frente o girando a la derecha o izquierda, (T_1, T_3 y T_4 están en rojo).

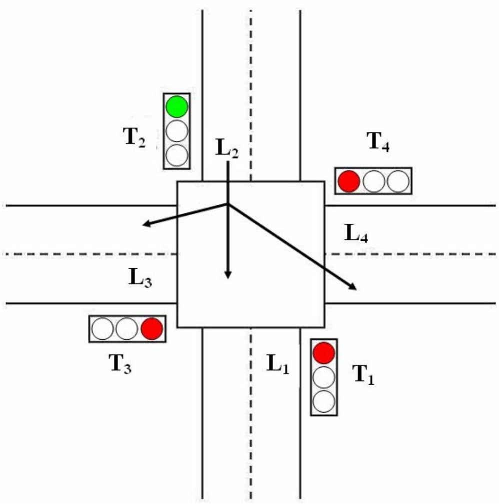

Figura 2: Fase 2

- En la **tercera fase** (Figura 3) el semáforo T_3 que ha cambiado de rojo a verde, permite que los vehículos que circulan por el carril L_3 rebasen el cruce siguiendo de frente o girando a la derecha o izquierda, (T_1, T_2 y T_4 están en rojo).

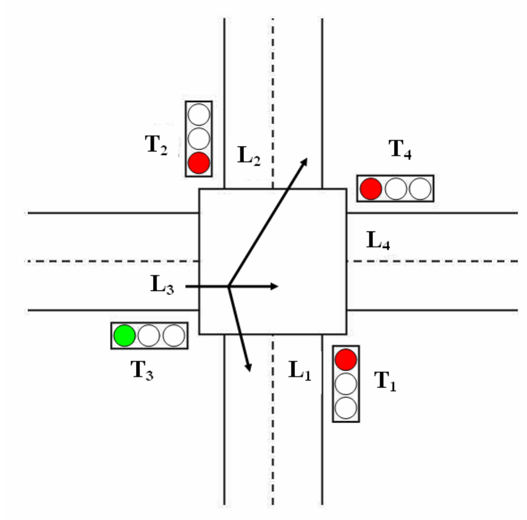

Figura 3: Fase 3

- En la **cuarta fase** (Figura 4) el semáforo T_4 que ha cambiado de rojo a verde, permite que los vehículos que circulan por el carril L_4 rebasen el cruce siguiendo de frente o girando a la derecha o izquierda, (T_1, T_2 y T_3 están en rojo).

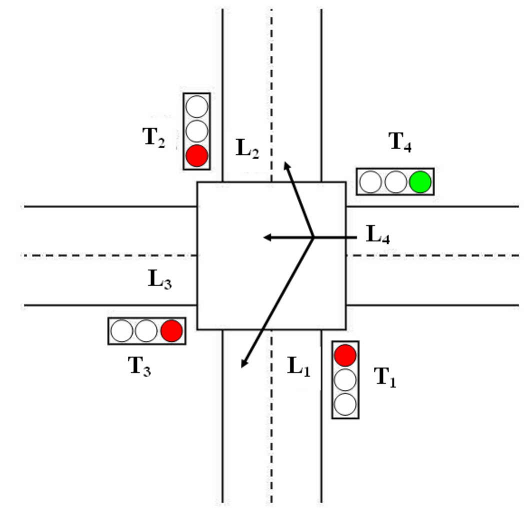

Figura 4: Fase 4

Consideraremos dado el número de veces que los semáforos tienen la luz verde y lo denotaremos por N. También se considera pre-establecido δ_{amb} que representa el tiempo de duración de la luz ámbar (en la práctica se considera una constante que fluctúa entre los 3 y los 4 segundos).

Describimos el problema con las *variables de control* δ_k, tiempo de duración de la luz verde en el k-ésimo cambio de luz (incluyendo el ámbar) y las *variables de estado* $x_k = (x_{k1}, x_{k2}, x_{k3}, x_{k4})^t$, cantidad promedio de vehículos en los carriles L_1, L_2, L_3, L_4 en el momento del k-ésimo cambio de luz.

Como simplificaciones del modelo trabajaremos con el comportamiento promedio por lo que asumimos que la cantidad de autos es continua. Para cada carril L_i se definen las tasas medias de llegada y salida de los vehículos bajo las luces verde y ámbar y se denotan:

λ_i : tasa media de llegada de vehículos en el carril L_i (dada en vehículos por segundo).

μ_i : tasa media de salida en el carril L_i cuando el semáforo está en verde.

κ_i : tasa media de salida en el carril L_i cuando el semáforo está en ámbar.

Los vectores b_i, i=1,…,12 representan el número de vehículos en cada carril teniendo en cuenta los movimientos asociados a cada fase:

$$b_1 = \begin{bmatrix} \lambda_1 - \mu_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix},\ b_2 = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 - \mu_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix},\ b_3 = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 - \mu_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix},\ b_4 = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 - \mu_4 \end{bmatrix},\ b_5 = \begin{bmatrix} (\mu_1 - \kappa_1)\delta_{amb} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$b_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ (\mu_2 - \kappa_2)\delta_{amb} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\ b_7 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (\mu_3 - \kappa_3)\delta_{amb} \\ 0 \end{bmatrix},\ b_8 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ (\mu_4 - \kappa_4)\delta_{amb} \end{bmatrix},$$

$$b_9 = \begin{bmatrix} max((\lambda_1 - \kappa_1)\delta_{amb}, 0) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\ b_{10} = \begin{bmatrix} 0 \\ max((\lambda_2 - \kappa_2)\delta_{amb}, 0) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$b_{11} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ max((\lambda_3 - \kappa_3)\delta_{amb}, 0) \\ 0 \end{bmatrix},\ b_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ max((\lambda_4 - \kappa_4)\delta_{amb}, 0) \end{bmatrix}.$$

Entonces:

$x_{4k+1}=max(x_{4k}+b_1\delta_{4k+1}+b_5,\ b_9)$ para $k=0,1,\ldots,N-1,$

$x_{4k+2}=max(x_{4k+1}+b_2\delta_{4k+2}+b_6,\ b_{10})$ para $k=0,1,\ldots,N-1,$

$x_{4k+3}=max(x_{4k+2}+b_3\delta_{4k+3}+b_7,\ b_{11})$ para $k=0,1,\ldots,N-1,$

$x_{4k+4}=max(x_{4k+3}+b_4\delta_{4k+4}+b_8,\ b_{12})$ para $k=0,1,\ldots,N-1.$

Las características de la zona de tráfico puede imponer otras regulaciones, tales como establecer cotas a las duraciones mínimas y máximas para los tiempos verde y rojo, así:

$\delta_{min.verde,i}$: cota mínima de duración de la luz en semáforo i=1,2,3,4.

$\delta_{max.verde,i}$: cota máxima de duración de la luz en semáforo i=1,2,3,4.

El problema de regulación de los semáforos puede representarse a través del siguiente modelo:

$$\text{Minimizar } J \tag{1}$$

sujeto a:

$$\delta_{min.verde,1}\leq\delta_{4k+1}-\delta_{amb}\leq\delta_{max.verde,1} \quad \text{para } k=0,1,\ldots,N-1, \tag{2}$$

$$\delta_{min.verde,2}\leq\delta_{4k+2}-\delta_{amb}\leq\delta_{max.verde,2} \quad \text{para } k=0,1,\ldots,N-1, \tag{3}$$

$$\delta_{min.verde,3}\leq\delta_{4k+3}-\delta_{amb}\leq\delta_{max.verde,3} \quad \text{para } k=0,1,\ldots,N-1, \tag{4}$$

$$\delta_{min.verde,4}\leq\delta_{4k+4}-\delta_{amb}\leq\delta_{max.verde,4} \quad \text{para } k=0,1,\ldots,N-1, \tag{5}$$

$$x_{4k+1}=max(x_{4k}+b_1\delta_{4k+1}+b_5,\ b_9) \quad \text{para } k=0,1,\ldots,N-1, \tag{6}$$

$$x_{4k+2}=max(x_{4k+1}+b_2\delta_{4k+2}+b_6,\ b_{10}) \quad \text{para } k=0,1,\ldots,N-1, \tag{7}$$

$$x_{4k+3}=max(x_{4k+2}+b_3\delta_{4k+3}+b_7,\ b_{11}) \quad \text{para } k=0,1,\ldots,N-1, \tag{8}$$

$$x_{4k+4}=max(x_{4k+3}+b_4\delta_{4k+4}+b_8,\ b_{12}) \quad \text{para } k=0,1,\ldots,N-1 \tag{9}$$

Si los carriles difieren en importancia al evaluar el nivel de congestión de los mismos, se representa el nivel de importancia del carril, fijando diferentes pesos o ponderaciones w_i, i=1,…,4. La función J a minimizar puede ser:

- **Suma (ponderada) de las longitudes medias de las colas en todos los carriles**

$$J_1 = \sum_{j=1}^{4} w_j \frac{\sum_{i=1}^{4N} x_{ij}\delta_i}{\sum_{i=1}^{4N} \delta_i} \qquad (10)$$

- **Longitud (ponderada) media de las colas en el carril con mayores colas**

$$J_2 = max_{\mathrm{j}}\, w_j \frac{\sum_{i=1}^{4N} x_{ij}\delta_i}{\sum_{i=1}^{4N} \delta_i} \qquad (11)$$

- **Longitud (ponderada) de la cola más larga**

$$J_3 = max_{i,j}\, w_j x_{ij} \qquad (12)$$

- **Suma (ponderada) de los tiempos medios de espera considerando las colas de todos los carriles**

$$J_4 = \sum_{j=1}^{4} \frac{w_j}{\lambda_j} \frac{\sum_{i=1}^{4N} x_{ij}\delta_i}{\sum_{i=1}^{4N} \delta_i} \qquad (13)$$

- **Tiempo (ponderado) medio de espera en el carril con mayor tiempo de espera**

$$J_5 = max_j \frac{w_j}{\lambda_j} \frac{\sum_{i=1}^{4N} x_{ij}\delta_i}{\sum_{i=1}^{4N} \delta_i} \qquad (14)$$

Se puede analizar una sexta opción que consiste en considerar una combinación de los criterios anteriores. Esto nos lleva a un modelo multi-objetivo que podemos resolver tomando una combinación positiva de las distintas funciones objetivo.

$$J_6 = \sum_{i=1}^{5} \alpha_i J_i \qquad (15)$$

donde los valores α_i corresponden a los pesos que se les dan a los distintos usuarios.

Como consecuencia de lo anteriormente expuesto, conocido δ (vector de los tiempos de cada luz), la cantidad de autos en cada carril queda determinado mediante las ecuaciones (6) – (7) – (8) – (9). Denotamos por $x(\delta)$ la matriz de 4N filas y 4 columnas donde $x_{ij}(\delta)$ indica la cantidad de autos en el carril j en el momento del cambio de luz i.

Definimos:

$$\Delta_{ij} = \begin{cases} 1 & si\ \ i \equiv j(4) \\ 0 & si\ no \end{cases}$$

Una forma más compacta de escribir el problema, sin tener que diferenciar entre las cuatro fases es la siguiente:

$$\text{Minimizar J} \qquad (16)$$

sujeto a:

$$\Delta_{k1}\delta_{min.verde1}+\Delta_{k2}\delta_{min.verde2}+\Delta_{k3}\delta_{min.verde3}+\Delta_{k4}\delta_{min.verde4}\leq\delta_k-\delta_{amb}\leq \Delta_{k1}\delta_{max.verde1} +$$
$$+\Delta_{k2}\delta_{max.verde2}+\Delta_{k3}\delta_{max.verde3} +\Delta_{k4}\delta_{max.verde4} \qquad \text{para k=1,…,4N} \qquad (17)$$

$$x_{kj}=max[x_{k-1j}+(\lambda_j-\Delta_{kj}\mu_j)\delta_k+\Delta_{kj}(\mu_j-\kappa_j)\delta_{amb},max(\Delta_{kj}(\lambda_j-\kappa_j)\delta_{amb},0)] \quad \text{para k=1,…,4N j=1,2,3,4} \qquad (18)$$

Como habíamos mencionado anteriormente, ya introducimos una aproximación extra al considerar las longitudes de cola continuas. Además, en la práctica, hay también alguna incertidumbre y variación en el tiempo de las tasas de llegada y de salida, lo que hace recomendable obtener una buena aproximación de la solución óptima que sea calculable en un tiempo corto y fácilmente ajustable a los cambios en los valores de los parámetros. De hecho [de Schutter, B. and de Moor, B. (1998)] se trata de un problema de optimización con restricciones de complementariedad lineal (problema NP-duro), que involucra 20N variables, 8N restricciones suaves y 16N no suaves, lo que haría muy costoso la aplicación de un algoritmo iterativo [de Schutter, B. (2002)].

3. ALGORITMO BASADO EN RECOCIDO SIMULADO PARA EL PROBLEMA DE SINCRONIZACIÓN DE SEMÁFOROS

Como ya se ha indicado en la introducción y en la sección anterior, el problema de regulación del tráfico a través del ajuste de los ciclos de los semáforos, es intrínsicamente difícil de resolver de manera óptima. Para resolver el problema, se propone un algoritmo heurístico inspirado en la metaheurística de recocido simulado.

El método de recocido simulado es una metaheurística en que se resuelve un problema de optimización *min* $J(x)$ $x \in M$, simulando el proceso de enfriamiento en el que a medida que baja la temperatura el movimiento de los átomos es menos probable [Kirkpatrick, et al. (1983)]. Dado un candidato a solución Ω, el algoritmo busca en una vecindad del mismo, un punto con mejor evaluación de la función objetivo. De no existir, se toma un punto con peor evaluación como nueva solución con una cierta probabilidad. Esta probabilidad que se calcula a partir de la ley de Boltzman, es proporcional a la temperatura del sistema e inversamente proporcional a la variación de los valores de la función objetivo al pasar al nuevo punto. Cada cierto número de iteraciones se disminuye la temperatura del sistema. Los distintos criterios de parada son: encontrar un punto con un valor adecuado de la función objetivo y alcanzar una temperatura suficientemente baja en el sistema.

Sobre la base de lo explicado en esta sección, se formuló el algoritmo, cuyo seudo-código presentamos a continuación.

ALGORITMO

0) Fijar $t_0>0$ (temperatura inicial), $\alpha\in(0,1)$ (parámetro del esquema de enfriamiento), Q (cantidad de pasos con igual temperatura), T (menor temperatura a alcanzar por el sistema). Escoger J_i, i=1,…, 6, y construir F, función objetivo del problema.

1) Construir un vector δ_0 y la solución $x(\delta_0)$ asociada. $F_{mejor}=F(x(\delta_0),\delta_0)$, $\delta_{mejor}=\delta_0$, temperatura $t=t_0$, i=0, $F_{anterior}=+\infty$

2) Mientras $t>T$,

2.1) $q = 1$

2.2) Mientras $q<Q$

2.2.1) Tomar δ un punto vecino de δ_i y hallar $x(\delta)$. Si $F(x(\delta),\delta)<F_{mejor}$, $\delta_{mejor}=\delta$, $F_{mejor}=F(x(\delta),\delta)$. Si $F(x(\delta),\delta)<F_{anterior}$, $\delta_{i+1}=\delta$, $F_{anterior}=F(x(\delta),\delta)$ e ir a **2.2.4)**

2.2.2) Generar r, número aleatorio de acuerdo a la ley uniforme en (0,1).

2.2.3) Si $r<exp\left(\frac{F_{anterior} - F(x(\delta),\delta)}{t}\right)$, $\delta_{i+1} = \delta$, si no, $\delta_{i+1} = \delta_i$, $\delta_{anterior} = \delta_{i+1}$

y $F_{anterior} = F(x(\delta_{i+1}), \delta_{i+1})$, construir la solución $x(\delta_{i+1})$ asociada.

2.2.4) $q = q+1$ e ir a **2.2)**

2.3) $t = t.\alpha$ e ir a **2)**.

3) Mejor solución δ_{mejor} con valor de la función objetivo $F(x(\delta_{mejor}), \delta_{mejor})$. Fin

Pueden considerarse diversos criterios para definir el sistema de vecindades para ejecutar el algoritmo formulado. Consideramos el sistema de vecindades definido por el criterio: δ es vecino de δ^* si difieren en solo una componente y $\|\delta - \delta^*\| = 1$, es decir δ es vecino δ^* si existe i tal que $\delta_i = \delta_i^* \pm 1$ y $\delta_j = \delta_j^*$ para todo $j \neq i$. En aras de mantener factibilidad se tiene en cuenta que el nuevo punto cumpla las restricciones en (17). Claramente las vecindades así definidas, son un subconjunto discreto del conjunto de soluciones factibles, pero posibilita la rápida exploración de soluciones factibles.

El algoritmo y el método de resolución propuestos han sido programados en MATLAB y se han implementado en un ordenador con procesador Intel Core i7, 950 que trabaja a 307 GHz. El programa permite variar los parámetros del algoritmo (temperatura inicial y final, número de repeticiones para una temperatura fija y estrategia de disminución de la temperatura), a fin de posibilitar el ajuste de sus valores en distintas situaciones de tráfico (por ejemplo, en cuanto a densidad de tráfico o número de ciclos).

4. APLICACIÓN AL CRUCE DE LA AVENIDA DE FINISTERRE CON LA RONDA DE NELLE

La intersección semaforizada de la avenida de Finisterre con la Ronda de Nelle en la ciudad de A Coruña, es un ejemplo del tipo de cruce presentado y modelado en este trabajo, o sea, de cruce regulado por semáforos con cuatro fases (descritas en las figuras 1, 2, 3 y 4) en cada ciclo.

En la primera fase, el semáforo situado en la Ronda de Nelle (T_1) se encuentra en color verde, permitiendo que los coches que circulan por dicha calle puedan rebasar el cruce y continuar de frente, por la Ronda de Nelle en sentido hacia el estadio de Riazor, o girar a la derecha o a la izquierda hacia la avenida de Finisterre.

En la segunda fase, el semáforo situado en la Ronda de Nelle en sentido hacia los Cuatro Caminos (T_2) cambia de rojo a verde, permitiendo la circulación en dicho sentido, o girar a la derecha o a la izquierda hacia la avenida de Finisterre.

En la tercera fase, el semáforo situado en la avenida de Finisterre (T_3) cambia de rojo a verde, permitiendo a los vehículos rebasar el cruce, para continuar de frente por dicha avenida en sentido hacia el centro de la ciudad, o girar a la derecha o a la izquierda hacia la Ronda de Nelle.

En la cuarta fase, el semáforo situado en la avenida de Finisterre (T_4) cambia de rojo a verde, permitiendo que los vehículos rebasen el cruce, para continuar de frente por dicha avenida en sentido hacia la salida de la ciudad, o girar a la derecha o a la izquierda hacia la Ronda de Nelle.

En el cruce mencionado hemos de tener en cuenta las siguientes consideraciones, algunas de las cuales pueden apreciarse en la figura 5:

- Existe un paso elevado que permite la circulación en ambos sentidos por la Ronda de Nelle, de ahí que en la primera y segunda fases sean pocos los vehículos que continúan de frente una vez que han rebasado el cruce.
- En el semáforo T_1 existe un anexo en donde, en cierto momento, se ilumina en ámbar una flecha que permite girar a la derecha, mientras que la luz de T_1 está en rojo. Esta situación dura el tiempo que permanece en verde la luz del semáforo T_4 y finaliza en el momento en que se pone en verde la luz de T_1. En este trabajo, esta situación no la hemos contemplado, pues sólo tiene efecto en el tráfico si el coche que ocupa el primer lugar en la cola del carril L_1 gira a la derecha, y los siguientes también, ya que como la vía es muy estrecha, es prácticamente imposible que dos vehículos se sitúen a la par.

- En el semáforo T_2 también existe un anexo en donde, en cierto momento, se ilumina en ámbar una flecha que permite girar a la derecha, mientras que la luz de T_2 está en rojo. Esta situación dura el tiempo que permanece en verde la luz del semáforo T_3, finalizando en el momento en que se pone en verde la luz de T_4. En este trabajo, esta situación no la hemos contemplado, pues sólo tiene efecto en el tráfico si el coche que ocupa el primer lugar (y los siguientes) en la cola del carril L_2 gira a la derecha, ya que como la vía es muy estrecha es imposible que dos vehículos se sitúen a la par.
- Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, es fácilmente comprensible que el tiempo que los responsables de tráfico han asignado para la luz verde de los semáforos T_1 y T_2 sea bajo, concretamente 14 sg. y 12 sg. respectivamente.
- En la avenida de Finisterre en sentido hacia la salida de la ciudad, antes de rebasar el cruce, el carril L_4 se convierte en doble carril, siendo uno para los coches que giran a la derecha hacia la Ronda de Nelle, y otro para los que continúan de frente o giran a la izquierda, de ahí que cuando la luz del semáforo T_4 está verde (22 sg. en ciclo fijo) puedan rebasar el cruce un número elevado de vehículos (en torno a los 14) a pesar de que la calzada esté en rampa.
- El tiempo que los responsables del tráfico han asignado a la luz verde del semáforo T_3 en ciclo fijo es de 30 sg.
- La duración de un ciclo completo (en ciclo fijo) es de 78 sg. que se encuentra en el rango entre 35 sg. y 120 sg. que según [Sánchez-Toscano Barbero, J. (2003)], son los tiempos que en la práctica mejor se acomodan a la mentalidad del usuario de la vía pública.

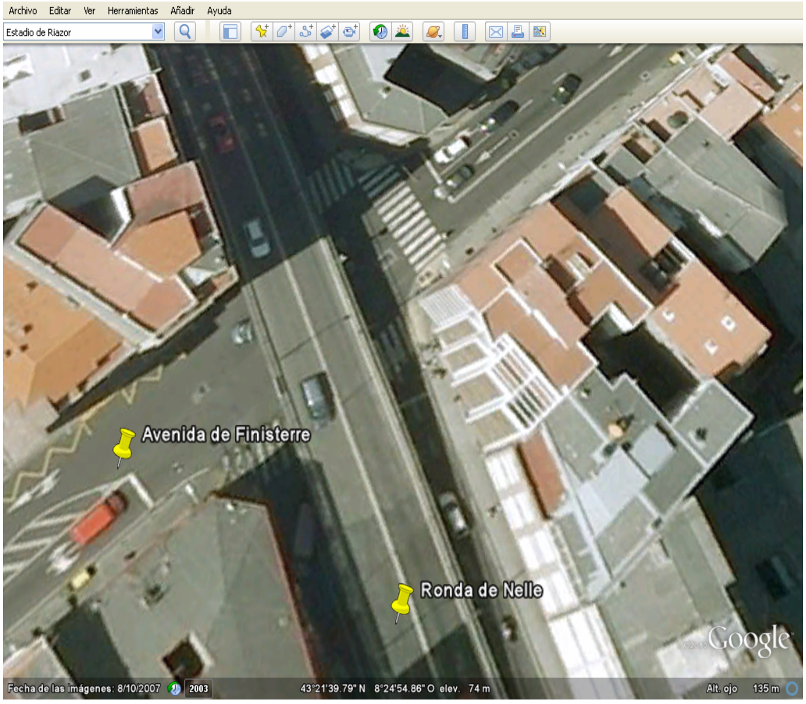

Figura 5: Cruce avda. de Finisterre-Ronda de Nelle

A continuación, se analiza la validez del modelo propuesto para representar la situación del cruce mencionado. Se observa, a partir de datos reales de entrada y salida de vehículos en el cruce, que el número de vehículos que esperan en los semáforos según el modelo, es aproximadamente el mismo que los que en la realidad constituyen las colas en las horas punta. Luego, usando esos mismos datos y el método heurístico propuesto para la resolución del problema, se obtiene una regulación variable de los tiempos verde de los semáforos para llegar a optimizar las diferentes funciones objetivo, con lo cual se obtiene una reducción en la longitud de las colas, lo que permite una circulación más fluida, una reducción del gasto de combustible, disminución de la contaminación ambiental y de los accidentes.

5. RESULTADOS COMPUTACIONALES

Consideramos en este ejemplo cinco ciclos (N=5). Por mediciones directas en observaciones de varios días durante el horario pico, se estimaron las tasas de llegada y salida en los carriles.

$\lambda_1 = 0.09$, $\lambda_2 = 0.08$, $\lambda_3 = 0.19$, $\lambda_4 = 0.21$ (vehículos por segundo)

$\mu_1 = 0.57$, $\mu_2 = 0.6$, $\mu_3 = 0.52$, $\mu_4 = 0.83$ (vehículos por segundo)

$\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = \kappa_4 = 0.1$ (vehículos por segundo)

$\delta_{amb} = 3$ sg.

$\delta_{min.verde,1} = \delta_{min.verde,2} = \delta_{min.verde,3} = \delta_{min.verde,4} = 8$

$\delta_{max.verde,1} = 20$, $\delta_{max.verde,2} = 16$, $\delta_{max.verde,3} = 52$, $\delta_{max.verde,4} = 36$

Pesos w = [1 1 1 1]

En ciclo fijo, el tiempo verde (incluido el ámbar) para los semáforos es: para T_1: 14 sg., para T_2: 12 sg., para T_3: 30 sg. y para T_4: 22 sg.

En la tabla siguiente se exponen los resultados obtenidos con la sincronización de los semáforos a ciclo fijo.

Promedio de vehículos en el momento del cambio de luz

	Carril1	Carril2	Carril3	Carril4
Ciclo1-Fase1	0	1,12	2,66	2,94
Ciclo1-Fase2	1,08	0	4,94	5,46
Ciclo1-Fase3	3,78	2,4	0,27	11,76
Ciclo1-Fase4	5,76	4,16	4,45	0,33
Ciclo2-Fase1	0,45	5,28	7,11	3,27
Ciclo2-Fase2	1,53	0,54	9,39	5,79
Ciclo2-Fase3	4,23	2,94	0,75	12,09
Ciclo2-Fase4	6,21	4,7	4,93	0,545
Ciclo3-Fase1	0,9	5,82	7,59	3,485
Ciclo3-Fase2	1,98	1,08	9,87	6
Ciclo3-Fase3	4,68	3,48	1,23	12,3
Ciclo3-Fase4	6,66	5,24	5,41	0,76
Ciclo4-Fase1	1,35	6,36	8	3,7
Ciclo4-Fase2	2,43	1,62	10,35	6,22
Ciclo4-Fase3	5,13	4	1,71	12,52
Ciclo4-Fase4	7,11	5,78	5,89	0,97

Ciclo5-Fase1	1,8	6,9	8,55	3,91
Ciclo5-Fase2	2,88	2,16	10,83	6,43
Ciclo5-Fase3	5,58	4,56	2,19	12,73
Ciclo5-Fase4	7,56	6,32	6,37	1,19

Se ve que la longitud de la peor cola es de 12,73 vehículos, que se alcanza en la avenida de Finisterre en sentido hacia la salida de la ciudad. A pesar de este dato, se observa que la regulación a ciclo fijo determinada por los responsables de tráfico es bastante buena ya que, prácticamente rebasan el cruce todos los vehículos que se encuentran en la cola, cuando se enciende la luz verde del semáforo correspondiente (como máximo quedan dos vehículos en espera).

Partiendo de la misma situación inicial, y de los datos anteriormente señalados, se aplicó el algoritmo propuesto con los siguientes parámetros:

Solución inicial: δ_0 = [14 12 30 22 14 12 30 22 14 12 30 22 14 12 30 22 14 12 30 22]

Temperatura inicial $t_0 = 100000000$

Función de reducción de temperatura $T_M = 0.5T_{M-1}$

Número de iteraciones con igual temperatura Q = 100

Criterio de parada T < 0.000000001

Los tiempos de luz verde obtenidos son dados por el vector:

δ = [19 8 16 18 8 8 24 17 13 8 21 21 8 8 27 17 14 8 18 26]

La tabla siguiente muestra el estado del sistema en las diferentes fases y ciclos asociadas a estos tiempos de luz verde.

Promedio de vehículos en el momento del cambio de luz

	Carril1	Carril2	Carril3	Carril4
Ciclo1-Fase1	0	1,52	3,61	3,99
Ciclo1-Fase2	0,72	0	5,13	5,67
Ciclo1-Fase3	2,16	1,28	1,11	9,03
Ciclo1-Fase4	3,78	2,72	4,53	0,33

Ciclo2-Fase1	1,83	3,28	5,86	1,8
Ciclo2-Fase2	2,55	0,62	7,38	3,48
Ciclo2-Fase3	4,71	2,54	0,72	8,52
Ciclo2-Fase4	6,24	3,9	3,95	0,33
Ciclo3-Fase1	1,41	4,94	6,42	3,06
Ciclo3-Fase2	2,13	2,28	7,94	4,74
Ciclo3-Fase3	4	3,96	2,27	9,15
Ciclo3-Fase4	5,91	5,64	6,26	0,33
Ciclo4-Fase1	4,44	6,12	7,4	1,59
Ciclo4-Fase2	5,16	3,46	8,92	3,27
Ciclo4-Fase3	7,59	5,62	1,27	8,94
Ciclo4-Fase4	9,12	6,98	4,5	0,52
Ciclo5-Fase1	3,81	8,1	7,16	3,46
Ciclo5-Fase2	4,53	5,44	8,68	5,14
Ciclo5-Fase3	6,15	6,88	4	8,92
Ciclo5-Fase4	8,49	8,96	8,94	0,33

Vemos que la peor cola es de 9,15 vehículos que se alcanza en la avenida de Finisterre en sentido hacia la salida de la ciudad, mientras que en ciclo fijo en esa misma dirección y sentido era de 12,73. Se aprecia, por tanto, la mejora obtenida con la heurística, a pesar de que se observa que pueden quedar incluso 5 vehículos sin rebasar el cruce durante la etapa de luz verde.

El tiempo computacional es de 1,8 sg. tiempo que se puede considerar adecuado para que *en-línea* se puedan ajustar de modo óptimo los ciclos de los semáforos que rigen el cruce mencionado.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

- En este trabajo hemos estudiado un problema de control óptimo de semáforos para un cruce de dos carreteras con los dos sentidos de circulación en el que en cada ciclo existen cuatro fases.

- Hemos propuesto un método de solución basado en la metaheurística recocido simulado; con él se obtienen valores para los períodos de luz verde que permitieron colas más cortas, con un tiempo computacional adecuado.
- Hemos comparado los resultados conseguidos con nuestro modelo y nuestra propuesta de solución, con los que se dan en la realidad en el cruce de la avenida de Finisterre con la Ronda de Nelle, partiendo de datos reales de número de vehículos que llegan y rebasan el cruce, obteniendo resultados mejores (en cuanto a la longitud de las colas).
- En el futuro continuaremos con la experimentación computacional para validar la conducta del algoritmo propuesto y modelaremos otros tipos de intersecciones en las que en cada ciclo haya cuatro o seis fases con ocho semáforos.
- También nos proponemos, en dichas intersecciones, la experimentación con datos reales de flujo de vehículos, incluyendo en nuestro estudio diferencias entre los distintos carriles, un mayor número de ciclos y en el caso del problema multiobjetivo, vectores de peso que ponderen más un objetivo que otro.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DE SCHUTTER, B. y DE MOOR, B. (1998) "Optimal traffic light control for a single intersection". European Journal of Control*,* 4, 3, pp. 260-276.
- DE SCHUTTER, B. (2002) "Optimizing acyclic traffic signal switching sequences through an extended linear complementarity problem formulation". European Journal of Operational Research, 139, 2, pp. 400-415.
- HUANG, D.W. y HUANG, W.N. (2003) "Optimization of traffic lights at crossroads". International Journal of Modern Physics C, 14, 5, pp. 539-548.
- KIRKPATRICK, S.; GELATT, J.R. y VECCHI, M.P. (1983) "Optimization by simulated annealing". Science*,* 220, pp. 671-680.

- LEMA, C. et al. (2011) "Estudio de la optimización del tráfico en un cruce a través del ajuste de los ciclos de los semáforos mediante recocido simulado". Anales de ASEPUMA nº 19: 901, pp. 901.1-901.24.
- NATAGANI, T. (2006) "Dispersion and scaling of fluctuating vehicles through a sequence of traffic lights". Physica A, 361, 2, pp. 619-629.
- POLI, J. y MONTEIRO, L.H.A. (2005) "Improving vehicle flow with traffic lights". Advances in Complex Systems, 8, 1, pp. 59-63.
- SÁNCHEZ-TOSCANO BARBERO, J. (2003). "Temario específico ESTT-OEP 2005, tema 82", pp. 1-19.