

Un Algoritmo Evolutivo para la Reducción de Tiempos de Viaje y Emisiones Utilizando Paneles LED

Daniel H. Stolfi y Enrique Alba

Resumen—

En este trabajo proponemos la arquitectura Yellow Swarm dedicada a la reducción de los tiempos de viaje del tráfico rodado mediante la utilización de una serie de paneles LED con el fin de sugerir diferentes cambios de dirección durante determinadas ventanas de tiempo. Estos tiempos son calculados por un algoritmo evolutivo diseñado expresamente para este trabajo, el cual evalúa los escenarios compuestos de mapas reales importados desde OpenStreetMap, mediante la utilización del simulador SUMO. Los resultados de nuestra experimentación, sobre una zona de la ciudad de Málaga propensa a sufrir atascos, muestran acortamientos de los tiempos medios de viaje de hasta 24,6 %, una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero de hasta 24,1 %, y una disminución máxima del consumo de combustible del 12,6 %.

Palabras clave— Algoritmo Evolutivo, Tráfico Rodado, Movilidad Inteligente, Tiempos de Viaje, Emisiones de gases, Paneles LED

I. INTRODUCCIÓN

Año tras año las ciudades están creciendo en cuanto al número de habitantes, generalmente provenientes de las zonas rurales [1], mientras que sus infraestructuras no suelen hacerlo al mismo ritmo. Esto trae como consecuencia un aumento considerable en el número de desplazamientos que los ciudadanos deben realizar a diario [2], ya sea para asistir a sus puestos de trabajo, como para llevar a los niños al colegio, situaciones que se suelen dar en la misma franja horaria.

La principal evidencia de esta situación se manifiesta a través de los atascos [3]. Éstos son cada vez son más frecuentes y se dan especialmente en las arterias más importantes de la ciudad, pero también en las cercanías de las escuelas, hospitales, etc. Como consecuencia, los desplazamientos en coche se hacen cada vez más lentos provocando retrasos, problemas de estrés y ansiedad, y además disminuyendo el tiempo de ocio de los individuos.

Otra consecuencia que no se tiene muy presente, en especial porque suele pasar desapercibida para los ciudadanos, son las emisiones de gases de efecto invernadero [4]. Cuanto más tiempo un individuo se encuentre conduciendo, ya sea moviéndose a baja velocidad, o bien retenido por un atasco, más monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), hidrocarburos (HC), partículas (PM) y óxidos de

nitrógeno (NO) estarán volcándose a la atmósfera provenientes del motor del vehículo. Estos gases no sólo contribuyen al calentamiento global, sino que también ponen en riesgo la salud de las personas a través de trastornos en el sistema respiratorio tales como asma o cáncer de pulmón [5]. Las consecuencias económicas también son importantes. Se presentan en forma de gastos médicos, reducción de la productividad por la pérdida de días laborables, sin olvidar el daño que la polución ocasiona en los edificios de la ciudad.

Nuestra propuesta, llamada Yellow Swarm, consiste en un sistema de redirección de tráfico mediante paneles de diodos emisores de luz (LED - *Light-Emitting Diode*) situados en puntos estratégicos de la ciudad, los cuales sugieren a los conductores un posible cambio de dirección que tiene como objetivo la distribución del tráfico rodado y la prevención de congestiones y atascos. Con el sistema Yellow Swarm no sólo se consiguen reducir los tiempos de viaje, sino que también las emisiones de gases y el consumo de combustible se ven disminuidos.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Existe una amplia gama de trabajos que abordan los problemas de movilidad inteligente desde diferentes perspectivas con el objeto de reducir principalmente tiempos de viaje, emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de combustible.

En [6] los autores proponen un nuevo algoritmo de control adaptativo para las luces de los semáforos (ATLC - *Adaptive Traffic Light Control*) que tiene en cuenta tanto la densidad de vehículos como la posición relativa de éstos respecto a los cruces de calles. En el artículo se simula una intersección de la ciudad de Moncton en Canadá basándose en datos de tráfico real donde se valida el sistema propuesto haciendo uso de comunicación inalámbrica (VANET - *Vehicular Ad-Hoc Network*) para realizar el ajuste dinámico de los períodos de luz verde. Los resultados de la simulación indican que el algoritmo propuesto mejora el flujo de tráfico y la configuración actual de la ciudad, así como a otros algoritmos de la literatura. Si bien el escenario pretende ser realista basado en datos históricos de tráfico y los resultados son prometedores, el estudio se circunscribe sólo a una intersección, cuando el comportamiento desde el punto de vista global puede que no sea el mismo al contemplar un escenario mayor.

Otro trabajo con el objeto de minimizar los tiempos de viaje se presenta en [7]. Éste consiste en un sistema de control descentralizado, escalable y basado en multiagentes, encargado de controlar los ciclos de los semáforos en la ciudad de Ottawa, Canadá. Las ventajas que se exponen son la tolerancia a fallos, la respuesta dinámica y que las simulaciones que validan el trabajo están basadas en datos históricos reales. Los resultados muestran un aumento en la velocidad media de los vehículos en un 6.58 % en comparación con planes para los ciclos de luces estáticos. Se aprecian desventajas en la imposibilidad de adaptación para que se generen “olas verdes“ y la necesidad de ampliar el área analizada así como de una validación en escenarios más grandes.

En [8] se presenta una arquitectura destinada a la reducción de los tiempos de viaje de los vehículos, así como de las emisiones de gases de efecto invernadero y del consumo de combustible [9]. Para llevar a cabo esta meta, los autores utilizan una serie de *spots* distribuidos en la ciudad que usualmente están instalados en los semáforos de forma tal que cuando un vehículo se comunica con ellos vía WiFi, el conductor puede optar por seguir una ruta alternativa y personalizada. Esta propuesta se diferencia de la nuestra en la necesidad de que cada conductor debe disponer de un dispositivo de a bordo o de un software específico instalado en su *smartphone* o tableta para recibir la nueva ruta. En el trabajo que presentamos en este artículo no es necesario siquiera desviar la mirada del tráfico para seguir la nueva ruta propuesta, lo que representa una gran ventaja en aras de la seguridad al evitar distracciones.

En [10] se publica un sistema para prevenir atascos y reducir la congestión asignando a los vehículos rutas que excluyan las calles con una mayor carga. Esta asignación se realiza durante el transcurso del viaje de cada vehículo de modo que es capaz de responder a situaciones inesperadas tales como accidentes, etc. Para ello se hace uso también de sistemas de a bordo como tabletas de donde se recoge la posición de cada vehículo y se informa a los conductores de la nueva ruta calculada. Los autores han experimentado con la red de calles de la isla de Manhattan en Nueva York obteniendo reducciones globales en los tiempos de viaje de hasta 33 %. Nuevamente este trabajo se diferencia del que abordamos aquí en la necesidad de que cada conductor cuente con un dispositivo con conectividad de datos, GPS, y pantalla.

Un método para optimizar tráfico urbano se presenta en [11]. En el mismo, los autores analizan cada tipología de intersección realizando simulaciones para entender la respuestas que presentan ante diferentes patrones e intensidades de tráfico. Luego con el conocimiento adquirido calculan la ruta de mínimo retardo para la totalidad del trazado urbano. Los resultados presentados al utilizar la optimización propuesta presentan notables mejoras en tiempos de espera y flujo de vehículos sobre las estrategias de equi-

librado de carga y camino más corto. Dadas las limitaciones en el modelado de mapas en este artículo los autores no han utilizado trazados urbanos reales para validar los resultados.

Resumiendo, se observa la existencia de trabajos que abordan casos de estudio pequeños, limitados o no realistas, o bien que requieren que el usuario disponga de algún tipo de dispositivo para hacer uso de los sistemas descritos. En nuestra propuesta abordamos casos de estudio que se ajustan a una zona real de la ciudad de Málaga comprendiendo $4,6\text{Km}^2$. Adicionalmente, nuestro sistema no depende de que los usuarios dispongan de algún tipo de dispositivo para beneficiarse del mismo, al utilizar paneles LED que les informan de los posibles cambios de dirección mientras conducen por la ciudad.

El resto de este artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: A continuación en la Sección III se presenta la arquitectura Yellow Swarm, los casos de estudio, y el Algoritmo Evolutivo. En la Sección IV se explica la experimentación realizada y se discuten los resultados. Y por último en la Sección V se detallan las conclusiones y se enumeran los posibles trabajos futuros.

III. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

La arquitectura Yellow Swarm, presentada en la Fig. 1, consta de dos fases: La fase *offline* en donde se configura el sistema y la fase *online* en donde los conductores de los vehículos reciben la información sobre los desvíos propuestos.

En la fase *offline* el Algoritmo Evolutivo (AE) analiza diferentes escenarios (distribuciones de tráfico) del caso de estudio (*Málaga*), utilizando el micro-simulador SUMO [12] en comunicación con el módulo TraCI [13], el cual permite implementar los cambios de ruta que realizan los vehículos. Cabe destacar aquí que el trazado urbano utilizado por los casos de estudio ha sido importado desde *OpenStreetMap* por lo que obedece a una distribución amplia y real de calles, semáforos, rotondas, etc. La fase de entrenamiento arroja como resultado la configuración del sistema que utilizar como sugerencias de movilidad en la fase siguiente, la fase *online*.

En la fase *online* los paneles LED presentan las diferentes opciones de desvío a los conductores dependiendo de los tiempos calculados por el AE y almacenados en la configuración del sistema. Las posibles instrucciones consisten en continuar recto, girar a la izquierda, o girar a la derecha, y la disponibilidad de las mismas viene determinada por las características del trazado urbano en el sitio en el que se emplaza cada panel. Cada instrucción será visible durante su tiempo de permanencia calculado, tras el cual la siguiente instrucción se presentará a los conductores. Al completar el ciclo de instrucciones se comenzará nuevamente con la primera de forma que el tráfico se distribuya de la forma más conveniente para evitar posibles atascos.

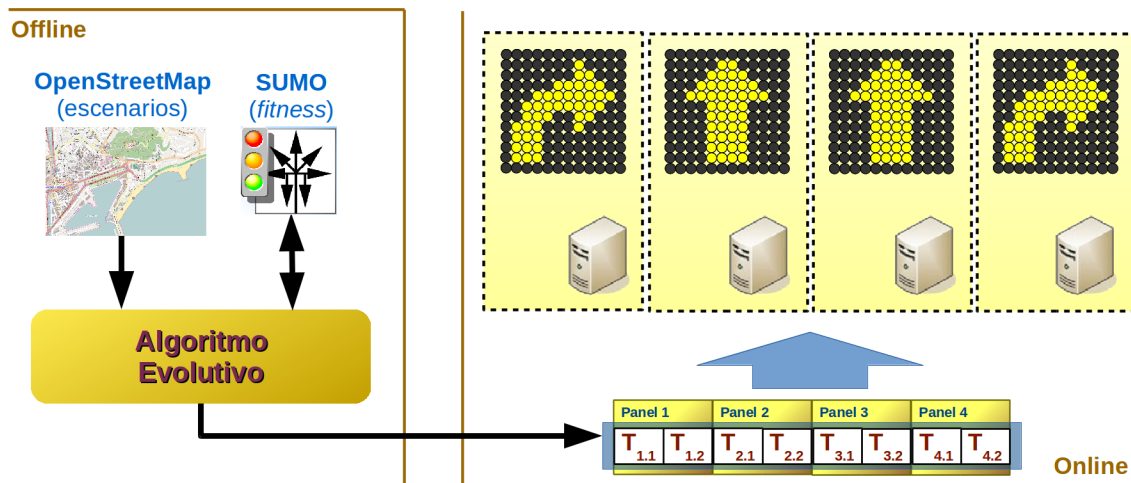


Fig. 1. Arquitectura *Yellow Swarm* dividida en las fases *Offline* y *Online*.

A. Casos de Estudio

En este artículo hemos seleccionado una zona céntrica de la ciudad de Málaga, sujeta a retenciones en horas punta, comprendida entre el río Guadalmedina al Oeste, el mar Mediterráneo al Sur, calle Carretería al Norte y calle Idris al Este, lo que representa un área de aproximadamente $4,6 \text{ Km}^2$.

En la Fig. 2 presentamos la zona analizada como una captura del mapa en *OpenStreetMap* y otra del correspondiente modelo importado en SUMO. Se pueden observar también las ubicaciones de cuatro paneles LED representados como paneles en el mapa y como círculos junto a su identificador, en SUMO.

Para realizar la importación, primero hemos preprocesado el mapa original quitando los elementos de los que podíamos prescindir tales como puntos de interés, bloques de viviendas, ríos, espacios verdes, etc., los cuales formaban parte del mapa proveniente de *OpenStreetMap* pero que podían provocar errores e imprecisiones en el proceso de importación, dando como resultado un mapa en SUMO que no se correspondería con el real. Luego, hemos añadido nueve flujos de vehículos entre los nueve puntos de entrada y las diferentes salidas del área geográfica. Por último hemos definido cuatro tipos diferentes de vehículos para garantizar cierta heterogeneidad en el tráfico

co ya que cada uno tiene su propias características, incluyendo velocidad máxima y tipo de emisiones según el modelo europeo HBEFA [14].

La generación de los flujos de vehículos se ha llevado a cabo utilizando el programa DUAROUTER, incluido dentro del paquete de programas que acompañan a SUMO. Con el mismo se generó una variedad de rutas entre origen y destino haciendo uso de distintos criterios tales como el tiempo de viaje, emisiones, ruido, y combustible, con el fin de considerar situaciones realistas de tráfico. En total se generaron un total de 159 rutas que formarán parte del caso de estudio *Málaga*. Por otro lado, para estudiar el caso en que todos los conductores intentan utilizar el camino más rápido, se utilizaron sólo las 64 rutas que se corresponden a dicha situación para formar el caso de estudio *Málaga_{TV}* (Tiempos de Viaje).

La distintas distribuciones de los tipos de coches y la elección de las rutas disponibles darán como resultado los diferentes escenarios del caso de estudio, de los que utilizaremos ocho para entrenar primero al sistema y luego otros 100 para comprobar su robustez y funcionamiento. Cada distribución generada de forma experta por SUMO la hemos llamado en este artículo la "Solución de los Expertos". En la Tabla I se presentan las características de los vehículos utilizados y en la Tabla II las del caso de estudio.

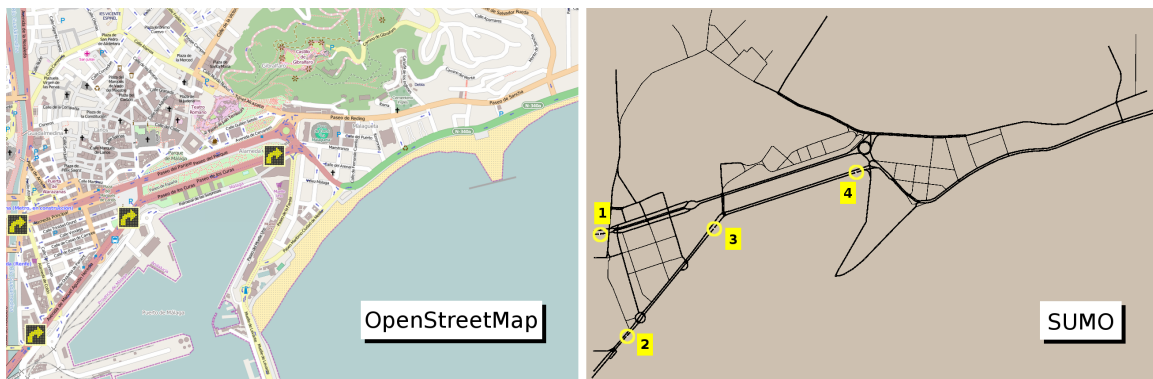


Fig. 2. Caso real de estudio: *Málaga*. Exportado desde *OpenStreetMap* (izquierda) a SUMO (derecha).

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LOS CUATRO TIPOS DE VEHÍCULOS UTILIZADOS.

Tipo	Probabilidad Llegada	Velocidad Máxima (Km/h)	Aceleración (m/s ²)	Deceleración (m/s ²)	Longitud (m)	Clase de Emisión
turismo	0,50	160	0,9	5,0	3,8	P.7.7
monovolumen	0,25	100	0,8	4,5	4,2	P.14.8
furgoneta	0,15	50	0,7	4,0	4,5	P.14.12
camión	0,10	40	0,6	3,5	6,0	HDV.3.3

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DE LOS CASOS DE ESTUDIO.

	Málaga	Málaga _{TV}
Tiempo de análisis (s)	6.000	6.000
Número de vehículos	2.400	2.400
Número de semáforos	259	259
Número de paneles LED	4	4
Número de flujos	9	9
Número de rutas	159	64

B. Algoritmo Evolutivo

Para obtener la configuración de los paneles LED que forman Yellow Swarm hemos utilizado un Algoritmo Evolutivo (AE) dada la complejidad que reviste el cálculo de los tiempos en los que cada opción de desvío va a permanecer activa en cada panel. Durante nuestros resultados preliminares constatamos que para evaluar cada individuo se necesitan entre 20 y 40 segundos de simulación en SUMO, por lo que se ha optado por trabajar con un (10+2)-EA.

B.1 Representación

La representación del problema, modelada en un vector solución, puede verse en la Fig. 1. En este estudio para los cuatro paneles se tendrán dos valores de tiempo (dos posibles direcciones) los cuales se han restringido entre 20 y 300 segundos, de este modo el máximo tiempo de ciclo es de 10 minutos, mientras que el mínimo es de 40 segundos.

B.2 Operadores

En el diseño del AE se ha utilizado *Binary Tournament* como operador de selección, *Uniform Crossover* como operador de recombinación y una estrategia de reemplazo elitista. Como operador de mutación se ha diseñado uno específico cuyo comportamiento se detalla en el Algoritmo 1.

En primer lugar se recorren todos los paneles del individuo y para cada uno se comprueba si va a ser objetivo de la mutación según la probabilidad (P_M). Para cada panel a cambiar se obtienen todas las indicaciones que puede ofrecer el mismo (en este estudio todos los paneles constan de dos opciones pero podrían ser más dependiendo de la ubicación de los mismos en la ciudad). En el siguiente paso se selecciona aleatoriamente una de las indicaciones la cual incrementará el tiempo que permanecerá activa en el panel en un cierto tiempo τ_1 , mientras que el resto

Algoritmo 1 Operador de Mutación

```

procedure MUTAR(individuo)
  for all  $p \in$  panels do
    if  $random() < P_M$  then
       $indics \leftarrow obtenerTodasIndics(p)$ 
       $ind \leftarrow obtenerUnaIndicRND(indics)$ 
      for all  $i \in indics$  do
        if  $i == ind$  then
           $incrementarTiempo(i, \tau_1)$ 
        else
           $decrementarTiempo(i, \tau_2)$ 
        end if
      end for
    end if
  end for
  return individuo
end procedure

```

de las indicaciones que puede sugerir el panel decrementarán el tiempo que están activas en τ_2 . Cuando se ha iterado sobre todas las indicaciones del panel seleccionado y cambiado los tiempos (rango: 20 – 300), se continúa con el siguiente paso del bucle.

Y cuando se han recorrido todos los paneles la ejecución del algoritmo finaliza retornando el individuo con los cambios realizados. En la Fig. 3 se visualiza un ejemplo de mutación de un individuo en el cual el panel 2 se ha seleccionado, modificándose el par de valores desde (185 , 78) a (180 , 83).

Por último, hemos determinado experimentalmente la probabilidad de cruce ($P_c = 0,6$), la probabilidad de mutación ($P_m = 1/8L = 0.0156$), y $\tau_1 = \tau_2 = 5$, tras la realización de 150 ejecuciones independientes del AE.

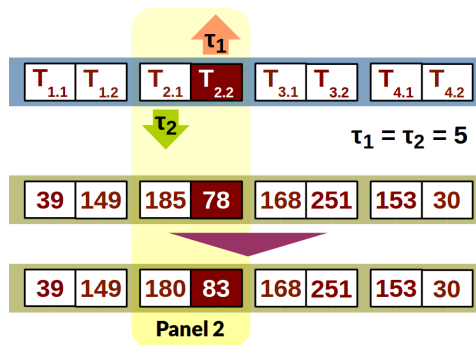


Fig. 3. Operador de mutación aplicado a un individuo.

TABLA III

RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL AE SOBRE OCHO ESCENARIOS Y UN TOTAL DE 19.200 VEHÍCULOS.

Métrica	Solución Expertos		Yellow Swarm		Mejora	Wilcoxon <i>p-value</i>
	Media	StdDev	Media	StdDev	Media	
<i>Tiempo Viaje</i> (s)	1024,0	74,1 %	854,3	55,7 %	16,6 %	0,00
<i>CO</i> (mg)	8885,6	180,8 %	8125,0	168,8 %	8,6 %	0,00
<i>CO₂</i> (mg)	876072,4	117,9 %	826775,7	114,1 %	5,6 %	0,00
<i>Hc</i> (mg)	1337,4	192,0 %	1225,9	181,7 %	8,3 %	0,00
<i>Pm</i> (mg)	130,6	258,2 %	119,4	238,8 %	8,6 %	0,00
<i>No</i> (mg)	5410,5	233,8 %	5117,9	221,3 %	5,4 %	0,00
<i>Combustible</i> (ml)	348,1	117,1 %	328,7	113,5 %	5,6 %	0,00
<i>Distancia</i> (m)	2316,6	38,3 %	2338,5	36,9 %	-1,0 %	0,08

B.3 Función de Evaluación

En este trabajo nos hemos propuesto reducir los tiempos de viaje de los vehículos y comprobar como esto además se refleja en las emisiones de gases de efecto invernadero y en el consumo de combustible. Por lo tanto, nuestra función de evaluación (*fitness*) consistirá en minimizar el tiempo medio de viaje de los vehículos. Además, deseamos que todos los vehículos finalicen su itinerario en el tiempo de análisis (6.000 segundos) por lo que hemos incluido también un término de penalización que depende de esta métrica.

En la Ecuación 1 presentamos la función de evaluación donde hemos llamado N al número total de vehículos (2.400 en nuestro estudio), n al número de vehículos que finalizan su itinerario, y α_1 y α_2 a los coeficientes que multiplican a cada término.

$$F = \alpha_1(N - n) + \alpha_2 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{tiempo viaje}_i \quad (1)$$

Además, hemos normalizado el valor de la función de evaluación para que la solución de los expertos en los escenarios de entrenamiento tenga un valor igual a 1. Por lo tanto α_1 toma el valor de 1 (cada vehículo que no termina su viaje penaliza con una unidad) y α_2 se calcula según la Ecuación 2.

$$\alpha_2 = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^{\lambda} \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \text{tiempo viaje}_{ij} \quad (2)$$

En nuestra experimentación λ toma el valor 8 porque vamos a optimizar ese número de escenarios simultáneamente, de este modo α_2 será igual al valor medio de los valores de *fitness* de cada escenario de entrenamiento (solución de los expertos).

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En primer lugar, hemos afrontado la optimización de ocho escenarios de entrenamiento del caso de estudio *Málaga* que comprende a 2.400 vehículos utilizando el AE. Cada escenario consiste en una distribución de tráfico diferente y han sido generados de

TABLA IV

TIEMPOS EN SEGUNDOS OBTENIDOS POR EL AE PARA LA CONFIGURACIÓN MEJOR VALORADA.

Panel 1		Panel 2		Panel 3		Panel 4	
$T_{1.1}$	$T_{1.2}$	$T_{2.1}$	$T_{2.2}$	$T_{3.1}$	$T_{3.2}$	$T_{4.1}$	$T_{4.2}$
288	42	290	274	190	45	270	25

forma aleatoria. Optimizando varios escenarios a la vez conseguimos que el AE obtenga una configuración más robusta para el Yellow Swarm al tener más información de entrenamiento disponible. En trabajos anteriores similares [8], [9] se vio que esto es mejor que utilizar uno sólo.

Los resultados obtenidos tras 30 ejecuciones independientes se visualizan en la Tabla III. En la misma se presentan los valores medios de las métricas para la solución de los expertos comparados con las obtenidas tras el uso de Yellow Swarm para indicar un desvío en la ruta de los vehículos, así como los valores de la desviación estándar. Se puede observar que se han mejorado tanto los tiempos de viaje medios (16,6 %) como las emisiones (7,3 % de media) y el consumo de combustible (5,6 %), mientras que la distancia media recorrida es levemente superior (1 %). Esto era previsible ya que estamos dirigiendo vehículos por rutas alternativas que por lo general no forman parte del camino más corto, lo que a su vez nos permite obtener las mejoras antes enumeradas.

Nótese que para este entrenamiento hemos supuesto que todos los vehículos siguen los cambios de dirección sugeridos por los paneles. Además, hemos calculado el *p-value* del test de Wilcoxon para asegurarnos que las mejoras reportadas en los valores de cada métrica de los 19.200 vehículos son estadísticamente significativas.

Adicionalmente, en la Tabla IV se presenta los valores obtenidos para cada tiempo incluido en la configuración. En la misma se observa cómo la configuración del Panel 4 dirige el tráfico el 92 % del tiempo en una sola dirección ($T_{4.1} = 270$ y $T_{4.2} = 25$), lo que denota que la otra alternativa fue descartada por el

TABLA V

MEJORAS ALCANZADAS EN EL TIEMPO MEDIO DE VIAJE DE LOS VEHÍCULOS, EMISIONES Y CONSUMO DE CARBURANTE EN LOS CASOS DE ESTUDIO ANALIZADOS RESPECTO A LA SOLUCIÓN DE LOS EXPERTOS. LAS MAYORES MEJORAS SE DESTACAN EN NEGRITA.

		<i>T.Viaje</i>	<i>CO</i>	<i>CO₂</i>	<i>HC</i>	<i>PM</i>	<i>NO</i>	<i>Comb.</i>	<i>Distancia</i>
<i>Málaga</i>	Media 50 Escenarios	15,1 %	8,5 %	4,2 %	8,1 %	5,8 %	3,4 %	4,1 %	-1,0 %
	Mejor Escenario	22,8 %	14,3 %	8,3 %	14,0 %	11,0 %	7,6 %	8,2 %	0,1 %
	Escenarios Mejorados	100,0 %	98,0 %	96,0 %	98,0 %	90,0 %	84,0 %	96,0 %	22,0 %
<i>Málaga_{TV}</i>	Media 50 Escenarios	8,9 %	7,9 %	4,1 %	7,5 %	6,4 %	3,7 %	4,0 %	-2,8 %
	Mejor Escenario	24,6 %	24,1 %	12,8 %	21,4 %	16,1 %	9,9 %	12,6 %	-3,9 %
	Escenarios Mejorados	90,0 %	86,0 %	76,0 %	84,0 %	84,0 %	76,0 %	76,0 %	0,0 %

AE por producir peores flujos de tráfico. Casos similares son los de los paneles 1 y 3 con valores 288 vs. 42 (87%) y 190 vs. 45 (81%) respectivamente. Mientras que la configuración del Panel 2 se encuentra más equilibrada (51%) con tiempos $T_{2.1}$ y $T_{2.2}$ muy similares (290 y 274 respectivamente).

Luego, utilizando esta configuración del sistema, la cual ha sido mejor valorada por la función de evaluación, hemos puesto a prueba nuestro Yellow Swarm frente a 50 escenarios consistentes en diferentes distribuciones de tráfico en las que los vehículos siguen diferentes rutas (caso de estudio *Málaga*) y frente a otros 50 escenarios diferentes en los que los vehículos en esta ocasión siguen la ruta del camino más rápido (caso de estudio *Málaga_{TV}*).

En la Tabla V se presentan las mejoras medias obtenidas para ambos casos de estudio al compararla con la solución de los expertos, el escenario más favorable, y el porcentaje de escenarios mejorados. Se observa que en el caso de estudio *Málaga_{TV}* la solución de los expertos ha resultado más dura de batir (90% de escenarios mejorados) que en *Málaga* (100%). Esto se debe principalmente a que, al estar mejorando tiempos de viaje, el que todos los vehículos sigan la ruta más rápida resulta más difícil de optimizar. De todos modos esto no suele ser lo habitual ya que las decisiones que toman los conductores suelen ser impredecibles en la mayoría de los casos, pero a pesar de esto, queríamos enfrentarnos también a la peor situación dentro de este estudio.

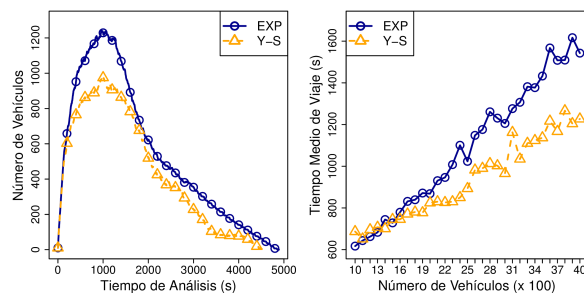
Con esto, dentro del caso de estudio *Málaga*, hemos reducido una media del 15,1% el tiempo de viaje de los vehículos (22,8% máximo), un 8,5% las emisiones de *CO* (14,3% máximo), un 4,2% las emisiones de *CO₂* (8,3% máximo), un 8,1% las emisiones de *HC* (14% máximo), un 5,8% las emisiones de *PM* (11% máximo), un 3,4% las emisiones de *NO* (7,6% máximo), y también hemos reducido un 4,1% el consumo de combustible (8,2% máximo). Para *Málaga_{TV}*, se aprecian reducciones medias menores al caso de estudio anterior (8,9% para el tiempo de viaje, 7,9% para *CO*, 4,1% para *CO₂*, 7,5% para *HC*, y 4% para el combustible), salvo en las emisiones medias de *PM* (6,4%) y *NO* (3,7%) que han resultado mayores que en *Málaga*.

Sin embargo, en el mejor escenario de *Málaga_{TV}*

se consiguen mejoras mucho mayores que en el caso de estudio *Málaga*. Esto se debe principalmente a que al haber menor diversidad de rutas porque todos los vehículos intentan seguir el camino más rápido a su destino (característica del caso de estudio *Málaga_{TV}*), los atascos son más propensos de ocurrir. Cuando estos atascos se dan, Yellow Swarm cobra aún más importancia como solución para redirigir el tráfico por caminos menos congestionados y de allí que las mejoras sean mayores en estos casos.

Otra observación relevante que se desprende de los datos de la Tabla V es referente a las distancias recorridas. Yellow Swarm por lo general provoca que los vehículos recorran una distancia levemente mayor (1% de media en *Málaga* y 2,8% en *Málaga_{TV}*) que cuando siguen las rutas originales que no incorporan los desvíos sugeridos. Esto, como se ha explicado anteriormente, se debe al hecho que estamos desviando a los vehículos de su ruta original, pero a cambio obtenemos tiempos de viaje menores, menores emisiones de gases y consumo de combustible, a cambio de unos pocos metros de más recorridos.

En la Fig. 4 se presentan las gráficas de densidad de tráfico (Fig. 4(a)) y de escalabilidad del sistema frente al número de vehículos (Fig. 4(b)). En la primera, se puede observar cómo el pico de vehículos en el escenario es menor cuando utilizamos Yellow Swarm y cómo los vehículos abandonan el escenario antes que en el caso en el que no se utilizan los paneles. Adicionalmente, en la Fig. 4(b), se aprecia como Yellow Swarm escala respecto al número de vehículos. En nuestros experimentos hemos comprobado su funcionamiento hasta con 4.000 vehículos obtenien-



(a) Densidad de Tráfico

(b) Escalabilidad del Sistema

Fig. 4. Densidad de tráfico y tiempos de viaje en *Málaga*.

do resultados satisfactorios, mientras que las mejoras respecto a nuestra métrica principal, el tiempo medio de viaje, se hacen efectivas cuando superamos el umbral de 1.500 vehículos en una hora, algo que es muy común en la zona analizada de Málaga. Por debajo de dicho umbral, Yellow Swarm sigue funcionando pero no se alcanzan mejoras sobre el tiempo medio de viaje, aunque tampoco el incremento de éste es demasiado considerable. Este umbral era esperado ya que el objeto de Yellow Swarm es prevenir la formación de atascos distribuyendo inteligentemente el tráfico rodado, lo cual no tiene sentido cuando las calles están tan poco transitadas.

A continuación en la Fig. 5 presentamos las mejoras obtenidas en cada métrica separadas por tipo de vehículo. En las mismas se puede observar que las mejoras en tiempo de viaje, el cual era nuestro principal objetivo, son similares para todos los tipos de vehículos (entre 21,7 % y 24,6 %), mientras que la reducción de CO , CO_2 , NO , y del consumo de combustible en los monovolúmenes está alrededor del doble de lo conseguido para los camiones. Por otro lado, las emisiones que más se han reducido en los camiones son HC y PM .

Cabe destacar que esta variaciones obedecen principalmente a la clase de emisión de cada tipo de vehículo, ya que no todos emiten por igual, llegando a particularidades como en la clase elegida para el tipo Furgón que no emite partículas (PM). Si bien para un estudio más meticuloso haría falta definir una diversidad mucho mayor de tipo de emisiones, para este trabajo se ha pretendido que no todos los vehículos sean iguales y que la cantidad de gases emitidos vaya en aumento según el peso y tamaño de los cuatro tipos de vehículos, dotando así de más diversidad y realismo al análisis realizado.

Por último, hemos abordado el estudio de cómo se ven afectados los resultados cuando sólo un porcentaje de los vehículos atiende a las indicaciones de los paneles LED, lo cual es realista porque toda solución tiene un grado de penetración (aceptación) en la ciudadanía. Para ello hemos analizado dos situaciones diferentes, el caso en que un porcentaje de conductores siguen siempre las indicaciones de todos los paneles (TP) y el caso en que lo hacen sólo con algunos de ellos (AP) de forma no determinista, lo cuál creemos que podría ajustarse mejor al caso de una ciudad real, con conductores reales.

En las Fig. 6 se visualizan los resultados para tasas de utilización desde el 10 % al 100 % en intervalos de 10 %. En la Fig. 6(a) puede verse el porcentaje de mejora media sobre las métricas correspondientes al tiempo de viaje (T.V.), emisiones, y consumo de combustible (C.C.) para el caso en que un porcentaje de conductores sigue siempre las indicaciones de los paneles (TP) y el resto no las sigue nunca. Si bien para una tasa de utilización del 10 % las mejoras son ínfimas (pero nunca perjudiciales), a medida que más conductores atienden a las indicaciones de los paneles LED las ventajas de nuestra propuesta van aumentando hasta llegarse a las mejoras reportadas en la Tabla V (discutidas con anterioridad) que se corresponden con el 100 % de utilización. Asimismo, en la Fig. 6(b) se visualiza el porcentaje de escenarios mejorados (sobre los 50 de *Málaga*) y la evolución de las diferentes métricas a medida que más conductores siguen los cambios de dirección propuestos.

Por otro lado en las figuras 6(c) y 6(d), se presentan la evolución de las métricas y el número de escenarios mejorados cuando un porcentaje de conductores sigue las indicaciones de los paneles en alguna ocasión (AP). Del análisis de este caso, más acorde

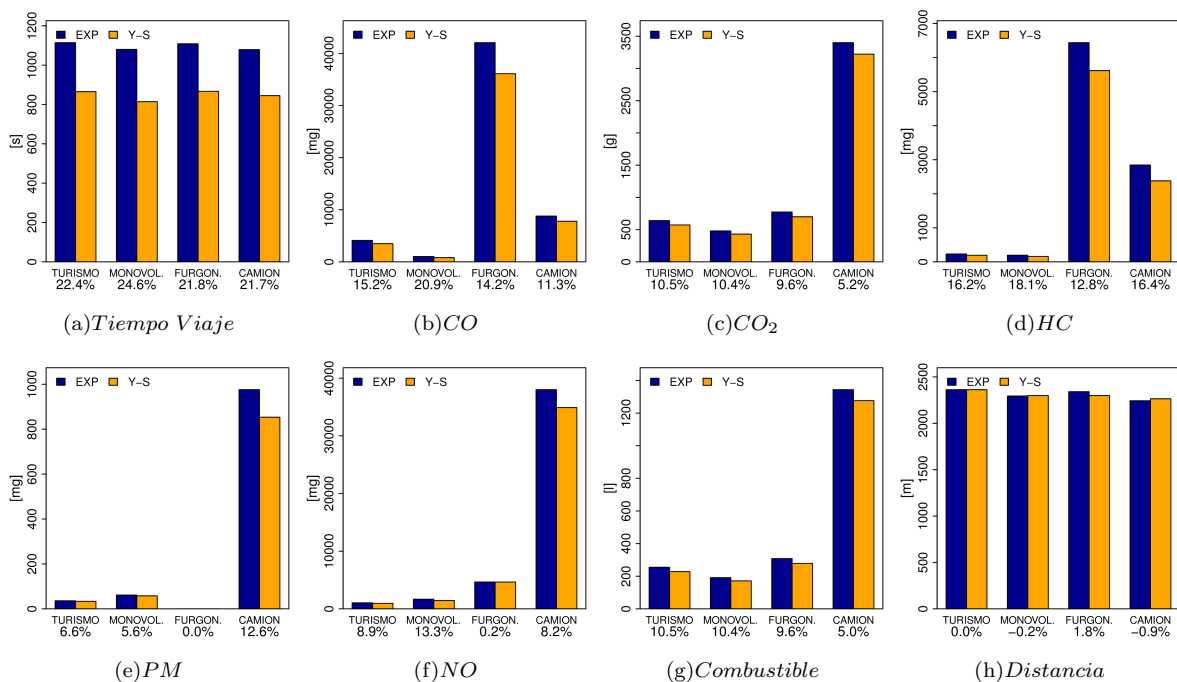


Fig. 5. Mejoras de Yellow Swarm sobre la solución de los expertos agrupadas por los cuatro tipo de vehículos.

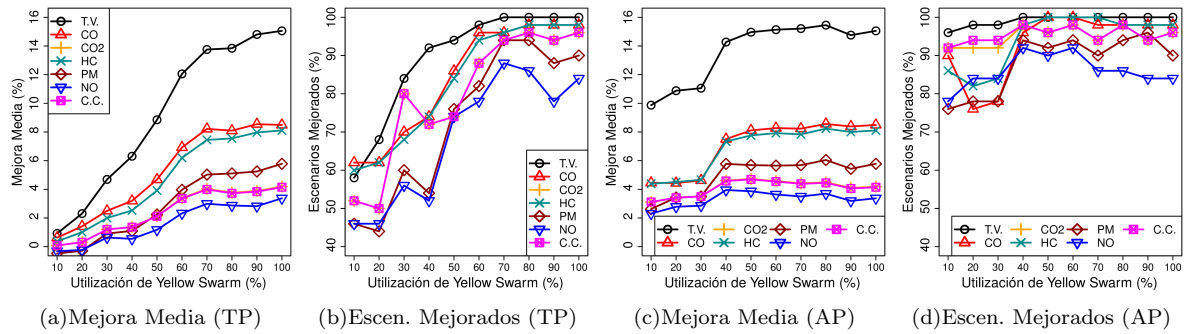


Fig. 6. Mejora media y escenarios mejorados vs. porcentaje de utilización para los casos: Todos (TP) y Algún Panel (AP).

al comportamiento de las personas, se desprenden unos resultados en los que se alcanzan reducciones mayores en las emisiones y tiempos de viaje que en el caso anterior (TP), siendo a partir del 40 % cuando Yellow Swarm comienza a comportarse notablemente bien, aunque en ningún caso las mejoras bajan del 2% incluso para una utilización del 10 %.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos afrontado la reducción de los tiempos de viaje de los vehículos que atraviesan la zona analizada de la ciudad de Málaga sugiriendo cambios de dirección mediante paneles LED en cuatro intersecciones predeterminadas. Hemos conseguido tiempos de viaje hasta un 24,6% más cortos y adicionalmente hemos reducido las emisiones de gases de efecto invernadero (24,1% máximo), y hasta un 12,6% el consumo medio de combustible, basándonos en la misma estrategia.

Los resultados muestran que nuestra propuesta de movilidad inteligente es útil a la vez que poco costosa en comparación con otras propuestas que requieren por lo general la utilización de algún dispositivo por parte de los conductores.

Actualmente estamos trabajando en el cálculo de diferentes configuraciones para adaptar el comportamiento del Yellow Swarm a distintas horas del día y también a la posibilidad de ajustes dinámicos en la configuración de los paneles basados en posibles incidencias e imprevistos en el tráfico.

A pesar de haberlo probado sólo con Málaga, en estudios anteriores hemos podido extender la metodología a ciudades arbitrarias, y esperamos que aquí de nuevo pase lo mismo (ya tenemos resultados preliminares que así lo indican).

AGRADECIMIENTOS

Daniel H. Stolfi es beneficiario de una beca FPU (FPU13/00954) otorgada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, Gobierno de España. Este trabajo está parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y FEDER dentro del proyecto TIN 2011-28194 y el proyecto número 8.06/5.47.4142 en colaboración con la VSB-Technical University de Ostrava. Universidad de Málaga. Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech.

REFERENCIAS

- [1] United Nations, "World Urbanization Prospects The 2011 Revision," Tech. Rep., 2011.
- [2] TNS Opinion & Social, "Attitudes of Europeans towards urban mobility," Tech. Rep. June, 2013.
- [3] Yuki Sugiyama, Minoru Fukui, Macoto Kikuchi, Katsuya Hasebe, Akihiro Nakayama, Katsuhiko Nishinari, Shinichi Tadaki, and Satoshi Yukawa, "Traffic jams without bottlenecks: experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam," *New Journal of Physics*, vol. 10, no. 3, Mar. 2008.
- [4] Cristina Guerreiro, Frank de Leeuw, and Valentin Foltescu, "Air quality in Europe - 2013 report," Tech. Rep., European Environment Agency, 2013.
- [5] Ole Hertel, Steen Solvang Jensen, Martin Hvidberg et al, "Assessing the Impacts of Traffic Air Pollution on Human Exposure and Health," in *Road Pricing, the Economy and the Environment*, Advances in Spatial Science, pp. 277–299. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [6] Sylvere Kwatirayo, Jalal Almhana, and Zikuan Liu, "Adaptive Traffic Light Control using VANET: A case study," in *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013 9th Int.*, July 2013, pp. 752–757.
- [7] Dave Mckenney and Tony White, "Distributed and Adaptive Traffic Signal Control Within a Realistic Traffic Simulation," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 26, no. 1, pp. 574–583, Jan. 2013.
- [8] Daniel H Stolfi and Enrique Alba, "Red Swarm: Reducing travel times in smart cities by using bio-inspired algorithms," *Applied Soft Computing*, vol. 24, no. 0, pp. 181–195, Nov. 2014.
- [9] Daniel H Stolfi and Enrique Alba, "Eco-friendly Reduction of Travel Times in European Smart Cities," in *Proceedings of the 2014 Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, New York, NY, USA, 2014, GECCO '14, pp. 1207–1214, ACM.
- [10] Takfarinas Saber, Anthony Ventresque, and John Murphy, "ROThAr: Real-Time On-Line Traffic Assignment with Load Estimation," in *Proceedings of the 2013 IEEE/ACM 17th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications*, Washington, DC, USA, 2013, pp. 79–86, IEEE Computer Society.
- [11] F Angius, M Reineri, C Chiasserini, M Gerla, and G Pau, "Towards a realistic optimization of urban traffic flows," in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on*, Sept. 2012, pp. 1661–1668.
- [12] Daniel Krajzewicz, Jakob Erdmann, Michael Behrisch, and Laura Bieker, "Recent Development and Applications of SUMO-Simulation of Urban Mobility," *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, vol. 5, no. 3, pp. 128–138, 2012.
- [13] Axel Wegener and M Piórkowski, "TraCI: An Interface for Coupling Road Traffic and Network Simulators," in *Proceedings of the 11th Communications and Networking Simulation Symposium*, New York, NY, USA, 2008, CNS '08, pp. 155–163, ACM.
- [14] Stefan Hausberger, Martin Rexeis, Michael Zallinger, and Raphael Luz, "Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3," Tech. Rep. I, 2009.