

TRÁFICO Y MEDIOAMBIENTE: UN MODELO PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE TRANSPORTE URBANO

Cortínez, Víctor Hugo, Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada Facultad Regional Bahía Blanca Universidad Tecnológica Nacional, Dto. de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), vcortine@frbb.utn.edu.ar

Dominguez, Patricia Neri, Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada Facultad Regional Bahía Blanca Universidad Tecnológica Nacional, Dto. de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, pdoming@uns.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta una revisión de las investigaciones realizadas por los autores sobre métodos de diseño óptimo de redes de transporte urbano, buscando minimizar el tiempo de permanencia en la red y contemplando simultáneamente restricciones económicas y ambientales.

El enfoque propuesto integra una técnica de optimización no lineal denominada “Recocido Simulado” con modelos de predicción de tráfico, contaminación atmosférica y nivel sonoro. Como aspecto destacado la asignación de tráfico se formula como un problema de difusión no lineal en un medio poroso. Tal modelo puede ser resuelto ventajosamente mediante el “Método de Elementos Finitos”.

Palabras clave: Optimización de tráfico, Contaminación urbana, MEF.

ABSTRACT

This paper presents a review of the research carried out by the authors about methods for the optimal design of urban transportation network seeking to minimize the total travel time spent in the network, and simultaneously taking into account economic and environmental constraints.

The proposed approach integrates a nonlinear optimization technique known as “Simulated Annealing” with prediction models for traffic, atmospheric pollution and noise levels. As special topic, the traffic assignment is formulated as a non linear diffusion problem in a porous medium. Such a model may be advantageously solved by “Finite Element Method”.

Keywords: Traffic optimization, urban pollution, FEM.

1 INTRODUCCIÓN

En las grandes ciudades uno de los problemas más acuciantes es la congestión de tráfico. Esto se debe a la pérdida de tiempo que ocasiona, como así también a los efectos asociados de contaminación acústica y atmosférica.

Tal problemática ha dado lugar a una importante labor de investigación sobre métodos adecuados para el diseño de redes de transporte. En particular el objetivo de tal diseño es la minimización de la congestión, evaluada a través del tiempo de permanencia de todos los usuarios en la red (Estado óptimo de sistema, Wardrop, 1952).

Para lograr dicho objetivo se dispone de una serie de variables de diseño tales como la capacidad de las arterias, la velocidad máxima de circulación o los tiempos de los semáforos.

Si bien es esperable que la minimización de la congestión ocasione mejoras desde el punto de vista ambiental, no es claro si los diseños ideados logran cumplir con las correspondientes restricciones ambientales.

Entre los primeros trabajos que abordan el problema de contaminación debida al tráfico urbano y realizan un llamado de atención sobre el tema, se pueden mencionar el de Guldmann y Kim (1996) y el de Nagurney (2000). En este último, la autora demuestra, que las llamadas “mejoras” a la red de transporte pueden resultar en aumento de las emisiones totales generadas, y determina que es imprescindible tener en cuenta la topología de la red, la estructura de costos y la estructura de la demanda de viajes en cualquier sistema de políticas dirigidas hacia la reducción de las emisiones debidas a los vehículos de motor. Más recientemente, algunos aspectos del problema de la contaminación atmosférica debida al tránsito vehicular, fue tratado por otros autores (Tang y Wang, 2007; Zhang et al, 2010). Sin embargo, tales trabajos no abarcan la problemática en su conjunto.

Cuando las modificaciones son menores o dependen de pocas variables puede resultar suficiente efectuar un proceso de prueba y error, consistente en la simulación de distintos escenarios para los cuales deben determinarse los correspondientes estados de equilibrio de la red con las modificaciones propuestas. La selección del mejor diseño, en tal caso, la realiza el analista mediante la visualización de las magnitudes de cada uno de los escenarios evaluados.

Sin embargo, cuando las variables que intervienen en el proceso de diseño (económicas, ambientales, etc.) aumentan, es necesario recurrir a otras técnicas para evaluar las posibles alternativas y obtener la mejor configuración de manera automática en un tiempo de cálculo razonable. Tal enfoque se denomina diseño óptimo. En este tema se ha trabajado intensamente en los últimos años y en tal sentido resultan interesantes los trabajos de Poorzahedy y Rouhani (2007) y Babazadeh et al. (2011) en los cuales se plantea el diseño óptimo de redes de tráfico sujeto a restricciones de costo. Sin embargo, en los mismos no se consideran los efectos ambientales.

En este trabajo se presenta un modelo de diseño óptimo que tiene como objetivo la minimización

del tiempo de permanencia en la red considerando simultáneamente restricciones económicas y ambientales.

El modelo se basa en la integración de los diferentes aspectos involucrados en el mismo (asignación de tráfico, predicción de ruido urbano y de contaminación atmosférica) en un marco computacional de diseño óptimo.

Un aspecto especialmente novedoso del presente enfoque es la formulación del problema de asignación de tráfico. A diferencia del enfoque clásico basado en la metodología de Frank Wolfe (Poorzahedy y Rouhani, 2007), aquí se propone sustituir la red discreta de transporte correspondiente a las arterias de la ciudad por un medio poroso continuo, lo cual conduce a un sistema de ecuaciones diferenciales de difusión no lineal que permiten obtener los tiempos de viaje así como los flujos en cada arteria. Tales ecuaciones pueden ser eficientemente resueltas mediante el Método de los Elementos Finitos. La ventaja de este enfoque es la importante reducción del tiempo de cómputo con respecto a aquel insumido mediante la metodología de asignación discreta clásica. Este hecho es muy importante teniendo en cuenta que en un proceso de optimización, el problema de asignación debe resolverse muchas veces para considerar las diferentes alternativas de diseño posibles. Por otra parte, con la misma metodología computacional (MEF) es posible analizar el problema de dispersión de contaminantes.

El esquema de optimización utilizado se basa en una técnica heurística denominada Recocido Simulado.

La metodología se programa en ambiente Matlab[®] (2010) a efectos de conducir la optimización invocando desde el mismo a un programa de Elementos Finitos (FlexPDE[®], 2010) para resolver los problemas de asignación y de contaminación para cada uno de los escenarios posibles.

Se muestra la eficiencia de tal enfoque en un ejemplo de diseño de una red de transporte urbano contemplando la existencia de autopistas.

En el capítulo siguiente se formula el problema de diseño óptimo y se detallan los modelos involucrados en el mismo: asignación de tráfico, ruido urbano y contaminación atmosférica. En el capítulo 3 se presentan los métodos utilizados para resolver dicho problema, luego, en el capítulo 4, se muestra un ejemplo numérico de aplicación y finalmente, en el capítulo 5, se exponen las conclusiones y futuras líneas de investigación.

2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

2.1. Problema de diseño óptimo

El problema propuesto consiste en lograr el estado óptimo de un sistema de transporte urbano mediante la incorporación de nuevos arcos a una red de autopistas existente. La construcción de los nuevos tramos debe cumplir con restricciones de diseño en cuanto a la cantidad de carriles y

está sujeto a un monto máximo de inversión. Asimismo la adición de los nuevos arcos debe asegurar que no se superen límites establecidos de nivel sonoro y concentración de contaminantes atmosféricos. La solución del problema debe contemplar además la elección de ruta del usuario de acuerdo al primer principio de Wardrop (1952).

Tal problema se plantea mediante un modelo de optimización con restricciones de diseño, económicas y ambientales que debe cumplir con el equilibrio de usuario. Matemáticamente dicho problema se puede expresar de la siguiente manera (Ho et al., 2003):

$$\min F(h) = \sum_c \sum_s \int_{\Omega} u^{*c,s}(x, y, h) q^{c,s}(x, y) d\Omega \quad (1a)$$

s.a.:

$$u^{*c,s} \in \Lambda(h, u) \quad (1b)$$

$$h^{\min} \leq h \leq h^{\max} \quad (1c)$$

$$Cc(h) \leq Cc^{\max} \quad (1d)$$

$$L_{eq}(x^*(u^*), v^*(u^*), h) \leq L_{eq}^{\max} \quad (1e)$$

$$C(x^*(u^*), v^*(u^*), h) \leq C^{\max} \quad (1f)$$

donde F es la función a minimizar, en este caso el tiempo empleado por todos los usuarios de la red de transporte en toda la ciudad, $u^{*c,s}$ es la solución del problema de equilibrio de usuario (1b) que se detalla en la sección 2.2 y corresponde al tiempo mínimo de viaje para que un usuario de clase c llegue a su destino s desde la localización (x, y) y $q^{c,s}(x, y)$ corresponde a la tasa de generación de viajes de los usuarios de clase c que se dirigen al destino s , por unidad de área. En este caso, la variable de diseño h representa los carriles de las autopistas a construir y está sujeta a valores máximos y mínimos establecidos en la restricción (1c). La restricción (1d) establece el valor máximo del costo de construcción Cc de nuevos carriles y las restricciones (1e) y (1f) fijan los valores máximos de nivel sonoro y de concentración de contaminantes atmosféricos respectivamente. Las restricciones ambientales, que dependen a su vez de los flujos vehiculares $x^*(u^*)$ y velocidades de circulación $v^*(u^*)$ pueden aplicarse a determinadas zonas o al dominio completo.

2.2. Modelo espacial continuo-discreto de tráfico urbano

En los modelos discretos tradicionales la red de tráfico se representa mediante un grafo dirigido $G(N, A)$ donde N es un conjunto de nodos (intersecciones, puntos de origen o destino de viajes, cambio en las condiciones de circulación) y A un conjunto de arcos (tramos de vía entre nodos). Asimismo, los arcos tienen funciones asociadas que permiten calcular el tiempo de viaje a través de ellos. Éstas son funciones crecientes del flujo vehicular en el arco que tienen un valor mínimo denominado tiempo a flujo libre t_{a_0} y que corresponde al tiempo requerido para recorrer el arco cuando no existe congestión. La expresión empírica de tal función depende de varios parámetros

que consideran características específicas del arco, tales como el tipo de calle, la cantidad de carriles, la pendiente, el tipo de semaforización, la capacidad máxima, etc. Una de las funciones más conocidas es la función BPR (U.S. Bureau of Public Roads, 1964) cuya expresión es la siguiente:

$$t_a = t_{a_0} \left(1 + \alpha_a (x_a / C_a)^{\varphi_a} \right) \quad (2)$$

En esta función C_a representa la capacidad del arco, medida en vehículos/hora, α_a y φ_a son coeficientes que tienen en cuenta las características específicas de la arteria considerada y x_a es el flujo en el arco.

Por otra parte, en los modelos continuos, se tiene en cuenta que el tiempo de viaje hacia un mismo centro sufre variaciones pequeñas entre puntos cercanos dentro de la ciudad y, en consecuencia, se puede representar mediante una función continua de las coordenadas espaciales (Sasaki et al., 1990). Asimismo la demanda de viajes es representada también de manera distribuida en forma continua. Los modelos continuos resultantes de estas ideas son muy adecuados para la modelización del tráfico en el sistema denso de calles comunes.

Sin embargo, en la mayoría de las grandes ciudades los sistemas de transporte consisten en una red de autopistas superpuesta a un sistema denso de calles comunes. En las rampas de acceso, los viajeros pueden optar por ingresar al sistema de autopistas para bajar en algún otro punto o continuar su camino por las calles de la ciudad. Luego, el sistema de autopistas puede ser modelado como un sistema de arcos discretos que interactúa con la red densa de calles las que son idealizadas mediante un sistema continuo. Este tipo de formulación continua-discreta fue propuesta inicialmente por Yang et al., (1994). Sin embargo, el modelo continuo por ellos utilizado no presentaba una vinculación teórica directa con el correspondiente modelo discreto, razón por la cual la calibración en casos de aplicación real podría verse dificultada.

Un modelo continuo mejorado que se obtiene a partir de la representación discreta como pasaje al límite fue obtenido por Cortínez y Dominguez (2011, 2013). Tal enfoque conduce a un problema de difusión no lineal en el cual el entramado de calles se considera como un medio poroso. En este trabajo se presenta un modelo mixto continuo-discreto que utiliza la formulación espacialmente continua mencionada para el sistema de calles y un enfoque discreto para el conjunto de autopistas. Se adoptan como variables fundamentales del problema los tiempos de viaje de los usuarios de la red hacia los correspondientes destinos. El presente modelo, que se expone brevemente a continuación, fue desarrollado y validado anteriormente por los autores (Dominguez y Cortínez, 2011a, 2011b, 2012a, 2012b).

Para desarrollar el modelo continuo se considera la ciudad como una región Ω en la cual la tasa de viajes $q^{c,s}$ hacia cada destino s y para clase de usuario c , se genera de manera distribuida en la superficie de la misma. Se asume asimismo que la ciudad está delimitada por un borde exterior Γ_0 donde se conoce el flujo que lo atraviesa (particularmente puede ser cero si el borde está alejado). Se divide el dominio completo de la ciudad Ω en M celdas de área $L_x L_y$, donde las

longitudes L_x y L_y son pequeñas con respecto a las dimensiones de la ciudad y se supone que en el área que se examina existe un sistema de calles paralelas de tal manera que para cada calle en una dirección y sentido, existe otra en igual dirección y sentido contrario (Figura 1).

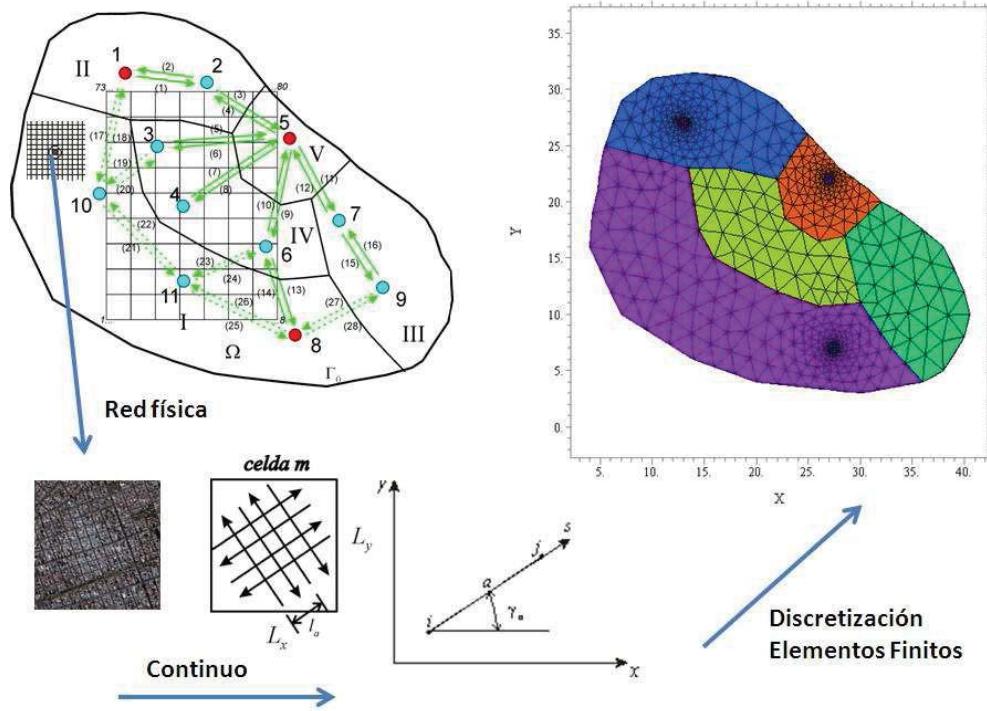


Figura 1: Características del modelo espacial continuo.

Se asume que el tiempo de viaje desde cualquier localización (x, y) de la ciudad hasta el punto de destino s , para determinada clase de usuario c se puede calcular mediante una función potencial continua $u^{c,s}(x, y)$, de manera que el tiempo de viaje en un determinado arco a se puede obtener mediante la diferencia entre los valores de dicha función calculados en los extremos del arco, es decir:

$$t_a^{c,s} = -\Delta u^{c,s} \cong -\frac{\partial u^{c,s}}{\partial s} l_a = -l_a \left(\frac{\partial u^{c,s}}{\partial x} \cos \gamma_a + \frac{\partial u^{c,s}}{\partial y} \sin \gamma_a \right) \quad (3)$$

A partir de la formulación dual del tradicional modelo discreto correspondiente al primer principio de Wardrop (1952) (Cortínez y Dominguez, 2013) donde las incógnitas son los tiempos de viaje, aplicando cálculo variacional y a través de un paso al límite cuando el tamaño de las celdas tiende a cero, se llega a la formulación del sistema continuo.

Cuando el sistema continuo interactúa con el sistema discreto de las autopistas, el modelo general se expresa mediante un sistema de ecuaciones diferenciales (calles comunes) con sus correspondientes condiciones de borde, acoplado a un sistema de ecuaciones algebraicas (autopistas) que cumplen condiciones de continuidad en los puntos de encuentro. El sistema de ecuaciones diferenciales es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x^{c,s} \frac{\partial u^{c,s}}{\partial x} + k_{xy}^{c,s} \frac{\partial u^{c,s}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{xy}^{c,s} \frac{\partial u^{c,s}}{\partial x} + k_y^{c,s} \frac{\partial u^{c,s}}{\partial y} \right) + q^{c,s} - \sum_{J=1}^N Q_J^{c,s} \delta(x - x_J) = 0 \quad (4)$$

$$\forall (x, y) \in \Omega, \quad s = 1, 2, \dots, M \quad c = 1, 2, \dots, C$$

donde

$$k_x^{c,s} = \sum_{a \in m} \frac{x_a^{c,s}}{t_a^{c,s}} \frac{l_a^2 \cos^2 \gamma_a}{L_x L_y} \quad k_y^{c,s} = \sum_{a \in m} \frac{x_a^{c,s}}{t_a^{c,s}} \frac{l_a^2 \sin^2 \gamma_a}{L_x L_y} \quad k_{xy}^{c,s} = \sum_{a \in m} \frac{x_a^{c,s}}{t_a^{c,s}} \frac{l_a^2 \cos \gamma_a \sin \gamma_a}{L_x L_y} \quad (5)$$

$$x_a^{c,s} = \left(\frac{t_a^{c,s} - t_{a_0}^{c,s}}{t_{a_0}^{c,s}} \frac{C_a^{\phi_a^c}}{\alpha_a^c} \right)^{\frac{1}{\phi_a^c}} - \left(\sum_{i, i \neq s} \sum_{j, j \neq c} x_a^{j,i} + x_{Ra} \right) \quad y \quad t_a^{c,s} = -l_a \left(\frac{\partial u^{c,s}}{\partial x} \cos \gamma_a + \frac{\partial u^{c,s}}{\partial y} \sin \gamma_a \right) \quad (6)$$

$\delta(x - x_r^s)$ es la distribución delta de Dirac y $Q_J^{c,s}$ es la cantidad de viajes que, para cada clase de usuario c , con destino s , ingresan a la autopista en el acceso J .

$$Q_J^{c,s} = - \sum_{I=1}^{M_J} \lambda_{IJ} x_I^{c,s} (U_I^{c,s}, U_J^{c,s}) \quad J = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

La condición a cumplir en el borde de la ciudad es:

$$f_x^{c,s} n_x + f_y^{c,s} n_y = \tilde{f}_n^{c,s} \quad o \quad u^{c,s}(x_c, y_c) = \tilde{u}^{c,s} \quad (8)$$

donde:

$$f_x^{c,s} = - \left(k_x^{c,s} \frac{\partial u^{c,s}}{\partial x} + k_{xy}^{c,s} \frac{\partial u^{c,s}}{\partial y} \right) \quad f_y^{c,s} = - \left(k_{xy}^{c,s} \frac{\partial u^{c,s}}{\partial x} + k_y^{c,s} \frac{\partial u^{c,s}}{\partial y} \right) \quad (9)$$

Y además debe cumplirse la ecuación de compatibilidad en los accesos:

$$U_J^{c,s} = u^{c,s}(x_J, y_J) \quad (10)$$

Como se puede apreciar, en las ecuaciones los coeficientes $k_x^{c,s}$, $k_y^{c,s}$ y $k_{xy}^{c,s}$ son función del flujo vehicular $x_a^{c,s}$ (calculado a partir de la inversión de la ecuación (1) expresada para este caso general) y del tiempo de viaje $t_a^{c,s}$ en los arcos de la red que se obtiene de la ecuación (3). Obsérvese que las ecuaciones presentadas son idénticas a un flujo en un medio poroso con permeabilidades no lineales. Por otra parte, $U_J^{c,s}$ corresponde al tiempo de viaje desde el acceso J

hasta el destino s para la clase de usuario c a través de las autopistas y $Q_j^{c,s}$ a la cantidad de vehículos que ingresan a la autopista por dicho acceso. λ_{IJ} vale 1 si el flujo va de I hacia J y vale -1 si va desde J hacia I (Figura 1).

Cabe destacar que el modelo mixto continuo-discreto presentado permite considerar la demanda variable. En tal caso $q^{c,s}(x, y) = D^{c,s}(u(x, y), x, y)$, donde $D^{c,s}(u(x, y), x, y)$ es una función decreciente capaz de reflejar el comportamiento elástico de la demanda.

El problema se puede resolver utilizando el método de Elementos Finitos, el cual requiere una nueva discretización del dominio. Entonces, cabe preguntarse ¿cuál es la ventaja de este tipo de modelación?. La respuesta es que, en el problema original, la cantidad de nodos y arcos de la red crece acorde al crecimiento de la ciudad, mientras que en la solución por elementos finitos, la cantidad de incógnitas se corresponde con la cantidad de nodos de la malla que es independiente de la representación física de la red.

2.3. Modelo de ruido urbano

Un modelo de ruido de tráfico urbano permite predecir el nivel sonoro continuo equivalente L_{eq} o algún otro indicador acústico (Gerges y Arenas, 2004) en relación a parámetros elegidos que se puedan obtener con relativa facilidad. Estos parámetros son usualmente el flujo y la composición del tráfico vehicular, la potencia acústica de las diferentes categorías de vehículos (autos, camiones, colectivos, motos), la velocidad de circulación y las características de las calles.

Tales modelos predictivos se han utilizado y verificado en diversas ciudades del mundo. En este sentido se pueden nombrar los trabajos de Gonzalez, A. (2000) en Montevideo, Sommerhoff et al. (2006) en Chile, Cortínez et al. (2006) y Cortínez y Dominguez (2011) en Argentina, entre otros.

A los efectos de ilustrar acerca de las características generales de tales modelos, se utiliza aquí el modelo desarrollado por la Administración General de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA TNM®, 2012) para determinar el ruido originado por el tránsito en las autopistas. El modelo considera también diferentes tipos de vehículos: automóviles (a), vehículos medianos (m) y vehículos pesados (p). La expresión del nivel sonoro equivalente en el punto de inmisión L_{eqi} es la siguiente:

$$L_{eqi} = 10 \log \left(10^{L_{eqi_a}/10} + 10^{L_{eqi_m}/10} + 10^{L_{eqi_p}/10} \right) \quad (11)$$

donde, para cada categoría vehicular n :

$$L_{eqi_n} = L_{eqe_n} + (10 \log (x_l / v_l) - 13,2) + 10 \log \left(\frac{d_0}{d} \frac{\alpha}{180} \right) + \Delta s_n \quad (12)$$

x_l y v_l corresponden al flujo vehicular (veh/h) y a la velocidad de circulación (km/h) en el tramo l de autopistas respectivamente, d_0 es la distancia de referencia (15 m), d es la distancia al centro

del carril y α es el ángulo sustentado por el segmento de vía que se estudia. Los niveles de emisión L_{eqe_n} se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$\text{automóviles: } L_{eqe_a} = 38,1 \log(v_l) - 2,4 \text{ dB} \quad (13a)$$

$$\text{vehículos medianos: } L_{eqe_m} = 33,9 \log(v_l) + 16,4 \text{ dB} \quad (13b)$$

$$\text{vehículos pesados: } L_{eqe_p} = 24,6 \log(v_l) + 38,5 \text{ dB} \quad (13c)$$

La corrección por efecto de barreras y tipo de terreno Δs_n puede consultarse en la referencia citada. Una expresión similar es utilizado para estimar niveles de ruido en calles comunes (Cortínez et al., 2006).

2.4. Modelo de contaminación atmosférica

Los vehículos emiten contaminantes a través de sus escapes, cuyas cantidades E (g/km h) pueden calcularse en función de factores de emisión FE (g/veh km) que dependen del tipo de vehículo, velocidad de circulación, combustible, etc.; de la proporción pm de cada categoría vehicular M y del flujo total x (veh/h) estimado por el modelo de tráfico.

$$E = \sum_{i=1}^M FE_i \cdot x \cdot pm \quad (14)$$

Una vez emitidos, tales contaminantes se dispersan siguiendo leyes físicas en función de las características climáticas. La concentración media C (g/m^3) de determinada sustancia, supuesta inerte, se puede estimar mediante la ecuación de transporte:

$$\frac{\partial(V_x C)}{\partial x} + \frac{\partial(V_y C)}{\partial y} + \frac{\partial(V_z C)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(H_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(H_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (15)$$

$$H_z \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0} = -D, \quad H_z \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0, \quad C \rightarrow 0 \quad x, y \rightarrow \pm\infty \quad (16)$$

donde V_x, V_y, V_z son las velocidades medias del viento según las direcciones x, y, z , respectivamente y H_x, H_y, H_z corresponden a los coeficientes de dispersión turbulenta en las mismas direcciones (Espert Alemani y López Giménez, 2004). Para resolver esta ecuación es necesario conocer las condiciones de contorno del problema (16) y las formas funcionales de la velocidad del viento.

3. SOLUCIÓN COMPUTACIONAL DEL PROBLEMA

El esquema general de la solución del problema de diseño óptimo se muestra en la Figura 2. La optimización se resuelve con una técnica heurística denominada método de Recocido Simulado (Dominguez y Cortínez, 2012a) que se implementa en Matlab® (2010). El problema de asignación de viajes se resuelve mediante el Método de Elementos Finitos lo que permite obtener los flujos de tráfico en cada arco. Con tal información se resuelve a continuación el modelo de contaminación atmosférica mediante el MEF y se calculan los niveles sonoros utilizando las fórmulas apropiadas. Los cálculos de elementos finitos se realizan utilizando el software FlexPDE® (2010).

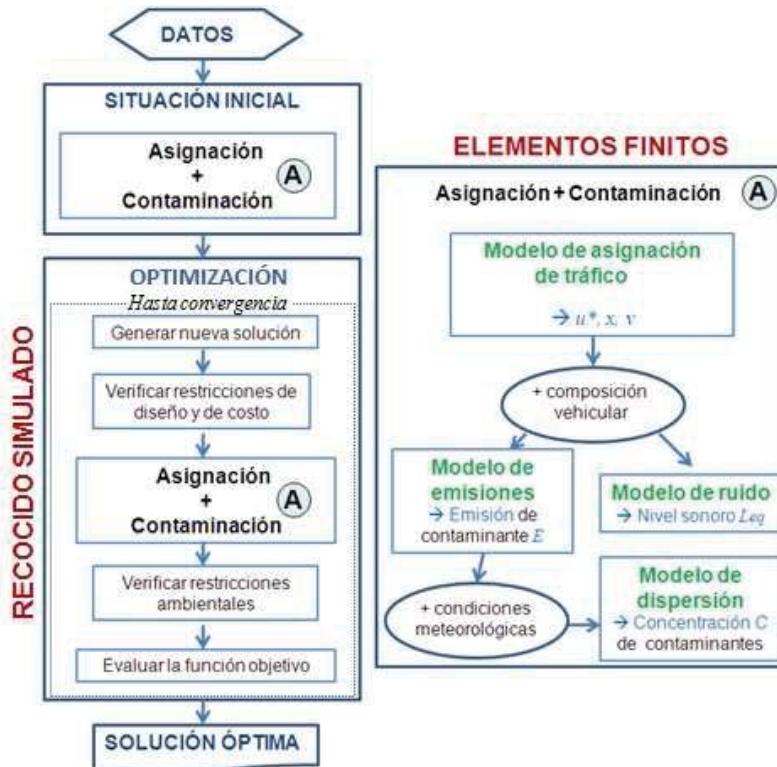


Figura 2: Esquema general del problema de diseño óptimo.

4. EJEMPLO NUMÉRICO

El ejemplo que se presenta a continuación para ilustrar la utilización del modelo propuesto corresponde a una parte del ejemplo presentado en el trabajo de Dominguez y Cortínez (2012a) de manera tal que se puede recurrir al mismo para mayores detalles.

Se estudia una ciudad de aproximadamente 710 km^2 (Figura 1) dividida en 5 zonas de diferentes características viales y de generación de viajes (Tabla 1). En la ciudad existe una red de autopistas, marcadas con trazo lleno, cuya función fundamentalmente es mantener el tráfico fluido hacia el centro de la misma (nodo 5).

Se analiza el comportamiento de la red en una hora pico de la mañana cuando el flujo vehicular originado en los hogares se dirige hacia los centros 1, 5 y 8. Se considera además, un flujo de 10000 vehículos/hora que ingresan desde el norte por el nodo 1 y se dirigen hacia el nodo 8 en el sur. La misma cantidad de vehículos cruzan la ciudad de sur a norte ingresando por el nodo 8 con destino al nodo 1. Se asume asimismo que existe un flujo residual que no se dirige hacia ninguno de estos destinos equivalente a un tercio de la capacidad de las calles. Para el cálculo del tiempo de recorrido del arco en las calles de la ciudad se adoptan $\alpha_a = 0,15$ y $\varphi_a = 4$ y para las autopistas $\alpha_l = 0,85$ y $\varphi_l = 5$. La velocidad máxima permitida en las autopistas es de 120 km/h, la capacidad de los tramos 1 a 12 es de 7500 vehículos/hora y la de los tramos 13 a 16 es de 5000 vehículos/hora. Se asume que el 70% de los vehículos que transitan por la ciudad son autos nafteros, el 20% son automóviles gasoleros y el 10% restante son vehículos pesados gasoleros. Para este ejemplo los factores de emisión se extraen de EMEP/CORINAIR (2009).

Tabla 1: Características de las zonas de la ciudad.

Zona	Q_1 (viajes/km ²)	Q_5 (viajes/km ²)	Q_8 (viajes/km ²)	$C1-C2$ (veh/h)	v_I-v_2 (km/h)	$\gamma_I-\gamma_2$
I	100	120	100	600-600	50-50	0-90
II	80	100	80	500-500	50-50	0-90
III	80	100	80	500-500	50-50	0-90
IV	60	80	60	500-500	40-40	45-135
V	80	50	80	450-450	40-40	45-135

Para el cálculo de la concentración de CO se asume estabilidad atmosférica clase C, con viento en la dirección NO-SE a 3 m/s medido a 10 m de altura. Se adopta una capa de mezcla de 1 km de altura y un perfil logarítmico de velocidad de acuerdo a la siguiente expresión $V = (\tilde{u}/0,4)(\ln(z/z_0) + (1 - (1 - 22z/(L_m))^{1/4})$ donde la velocidad de corte $\tilde{u} = 1,106 \text{ m/s}$, el coeficiente de rugosidad $z_0 = 2 \text{ m}$ y la longitud de Monin-Obukov $L_m = -50 \text{ m}$. El coeficiente de dispersión turbulenta en la dirección vertical se calcula con la expresión $H_z = 0,4\tilde{u}(z + z_0)/(1 - (1 - 22z/(L_m))^{-1/4})$ y para los correspondientes coeficientes en la dirección del viento y la dirección perpendicular al mismo se adopta el doble del valor anterior. Con estos datos se determina la situación original de la red de transporte y para comparar este estado con el correspondiente a la configuración óptima se establecen 80 puntos de control dentro de la ciudad, formando una grilla de 8 por 10 puntos (Figura 1).

Para evitar el tráfico pasante de norte a sur y viceversa en las calles de la ciudad y fundamentalmente disminuir el tiempo de viaje entre los nodos 1 y 8 se prevé la construcción de nuevos tramos de autopistas (líneas discontinuas en la Figura 1) y dos accesos principales (10 y 11). La capacidad de cada carril a construir es de 2500 veh/h y se estima que el costo de construcción es de un millón de pesos por carril y kilómetro.

Restricciones: límite máximo de costo de construcción \$390 millones, $L_{eq} \leq 78 dBA$ en las calles y concentración de CO menor a 1 mg/m^3 en los puntos de control.

Solución: el diseño óptimo se logra con la construcción de 3 carriles en los tramos 19, 20, 23, 24 y 4 carriles en el resto. Costo de construcción: \$381 millones. Función objetivo: 127470 (original: 164020).

En las Figuras 3 y 4 se muestran, simplemente a título ilustrativo, el tiempo de viaje desde los puntos de acceso a las autopistas hasta el nodo 1 y el flujo vehicular en los puntos más comprometidos de la red, correspondientes a la situación original y al diseño óptimo.

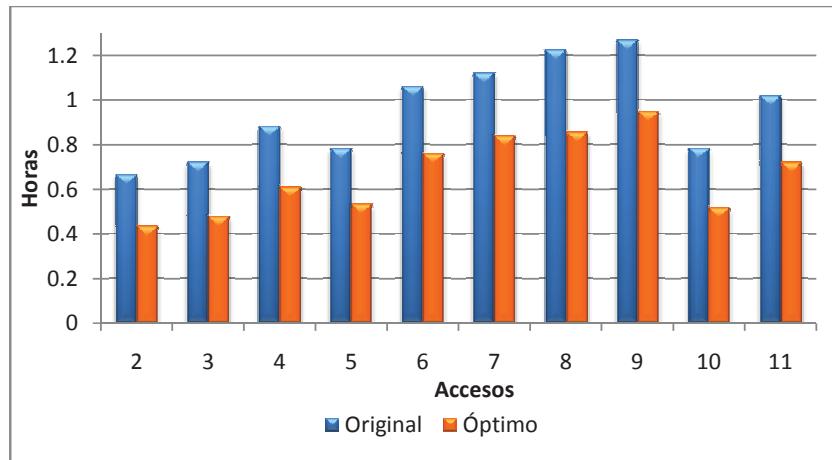


Figura 3: Tiempo de viaje hasta el nodo 1.

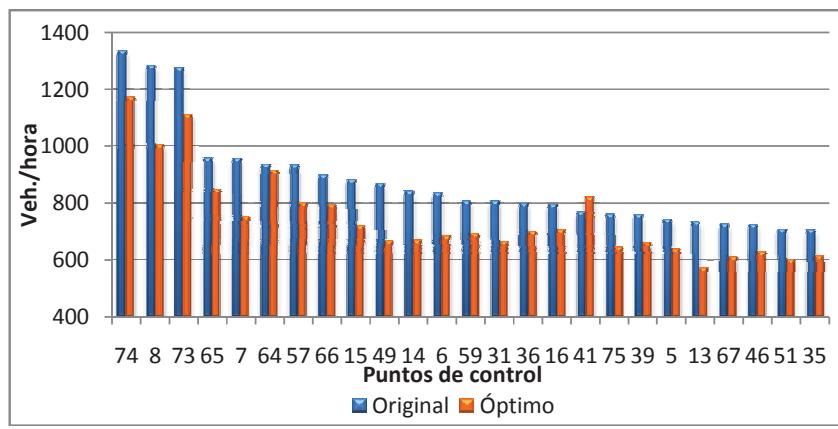


Figura 4: Flujo vehicular en puntos de control significativos de la ciudad.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una reseña de las investigaciones realizadas por los autores sobre la aplicación de la optimización matemática como instrumento para lograr el diseño óptimo de redes de transporte urbano. El modelo desarrollado contempla la superposición de una red de autopistas a un sistema denso de calles urbanas. El enfoque, además de considerar restricciones de diseño, de costo y ambientales, cumple con el equilibrio de usuario de Wardrop en la asignación de viajes a la red.

El modelo de tráfico se formula mediante un sistema de ecuaciones diferenciales de difusión anisótropa no lineal y un conjunto de ecuaciones algebraicas que se resuelven, en forma simultánea, mediante el método de Elementos Finitos. Tal modelo permite obtener en forma detallada el flujo vehicular, la velocidad de circulación y el tiempo de recorrido de cada tramo de las autopistas y de las calles de la ciudad. Con estos valores, mediante modelos de contaminación urbana, acústica y atmosférica, se estiman los niveles de ruido y concentración de contaminantes en cualquier punto de la ciudad para evaluar el cumplimiento de las restricciones medioambientales. El problema de optimización no lineal se resuelve utilizando el algoritmo de Recocido Simulado.

Mediante un ejemplo numérico sobre una red de transporte hipotética se ha mostrado la efectividad del método de diseño, en particular se han obtenido reducciones en los tiempos de viaje del orden del 25% respecto a la configuración original. Asimismo se ha mostrado una clara disminución de la congestión medida por la reducción del tiempo de permanencia en la red del orden de 22% respetando tanto las restricciones ambientales como económicas.

Estudios no mostrados en este trabajo han demostrado que la técnica presentada puede reducir los tiempos de cálculo en veinte veces respecto a los demandados por las técnicas clásicas, aunque por supuesto, tales reducciones dependen del tipo de software utilizado. Ejemplo de tales comparaciones pueden encontrarse en Cortínez y Dominguez (2013).

Cabe destacar que el modelo presentado puede ser utilizado en diferentes alternativas de diseño óptimo modificando las correspondientes funciones objetivo. Tales objetivos pueden ser por ejemplo, minimizar la concentración de contaminantes o el ruido en determinadas áreas, maximizar el ingreso por peaje, optimizar la ubicación de nuevos emprendimientos, etc. Asimismo, es posible trabajar sobre diferentes variables, tales como la velocidad máxima de circulación o el tiempo de verde de los semáforos. Futuros trabajos están orientados en este sentido, como así también a la consideración de aspectos no estacionarios del tráfico urbano.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es parte del proyecto “Modelos Matemáticos en Ingeniería Ambiental: Problemas Directos e Inversos” (Secyt, Universidad Tecnológica Nacional) y del proyecto “Problemas de optimización en Ingeniería Civil” (Departamento de Ingeniería, Universidad

Nacional del Sur).

REFERENCIAS

- Babazadeh, A., Poorzahedy, H. y Nikoosokhan, S. (2011) Application of particle swarm optimization to transportation network design problem. **Journal of King Saud University Science**, 23, 293-300.
- Cortínez, V., Stoklas, C., Girón, P., Azzurro, A. y Ercoli L. (2006) Modelos de predicción de ruido de tránsito para la ciudad de Bahía Blanca, Argentina. **Actas del V Congreso Iberoamericano de Acústica**, Santiago de Chile.
- Cortínez, V. y Dominguez, P. (2011) Un modelo de difusión anisótropa de tráfico urbano: Impacto Acústico. **Contaminación atmosférica e hídrica en Argentina**, 103-112, http://sicyt.scyt.rec.utn.edu.ar/scyt/proimca/LIBRO_PROIMCA_2011.pdf.
- Cortínez, V. y Dominguez, P. (2013) Un modelo de difusión anisótropa para el estudio del tráfico urbano. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, 29(1), 1-11.
- Dominguez, P. y Cortínez, V. (2011) Un Nuevo Modelo Continuo-Discreto para el Estudio del Tráfico Urbano con Autopistas. **Mecánica Computacional**, ISSN 1666-6070, XXX, 3543-3560.
- Domínguez, P. y Cortínez, V. (2011) Un modelo combinado continuo-discreto para el diseño de autopistas. Impacto ambiental. **Actas del III Congreso de Matemática Aplicada, Computacional e Industrial, MACI (3)**, 347-350.
- Dominguez, P. y Cortínez, V. (2012) Un método continuo-discreto para el diseño óptimo de sistemas de transporte urbano. **Mecánica Computacional**, XXXI, 3335-3355.
- Dominguez, P. y Cortínez, V. (2012) Un modelo continuo-discreto de tráfico urbano para el estudio de impacto ambiental. **Actas del XVII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística PANAM 2012**, 24 al 27 de Septiembre de 2012, Santiago de Chile, paper 62.
- EMEP/CORINAIR (2009) **EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook** <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>.
- Espert Alemani V. y López Jimenez P. (2004) **Dispersión de Contaminantes en la Atmósfera**. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, primera edición.
- FHWA TNM®. (2012) **Federal Highway Administration's Traffic Noise Model**, Version 2.5. http://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/traffic_noise_model/tnm_v25/.
- FlexPDE®. (2010) **FlexPDE V.6.08** PDE Solutions Inc. <http://www.pdesolutions.com>.

Gerges S. y Arenas J. (2004) **Fundamentos y control del ruido y vibraciones**. 1^{era} Ed. NR Editora, Florianópolis, Brasil.

González, A. (2000). **Contaminación sonora en ambiente urbano: optimización del tiempo de muestreo en Montevideo y desarrollo de un modelo predictivo en un entorno atípico**. Tesis doctoral, Montevideo, Uruguay.

Guldmann, J. y Kim, W. (1996) Urban transportation network design, traffic allocation and air quality control: an integrated optimization approach. **36h European Congress, European Regional Science Association**.

Ho, H.; Wong, S. y Loo, B. (2003) A continuous traffic equilibrium model with multiple user classes. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, 5.

Matlab® (2010) **Matlab V.7.10.0.499** (R2010a). The Mathworks Inc.

Nagurney, A. (2000) Congested Urban Transportation Networks and Emission Paradoxes. **Transportation Research Part D**, 5, 145-151.

Poorzahedy, H. y Rouhani, O. (2007) Hybrid meta-heuristic algorithms for solving network design problem. **European Journal of Operational Research**, 182, 578-596.

Sasaki, T., Iida, Y., Yang, H. (1990) User equilibrium traffic assignment by continuum approximation of network flow. **Actas del 11th International Symposium of Transportation and Traffic Theory**, Yokohama, Japan, pp. 233-252.

Sommerhoff, J., Recuero, M., y Suárez, E. (2006) Relationship between loudness perception and noise indices in Valdivia, Chile. **Applied Acoustics**, 67, 892-900.

Tang, U. y Wang, Z. (2007) Influences of urban forms on traffic-induced noise and air pollution: Results from a modelling system. **Environmental Modelling & Software**, 22, 1750-1764.

U.S. Bureau of Public Roads (1964) **Traffic assignment Manual**. U.S. Department of Commerce, Washington D.C.

Wardrop, J. G. (1952) Some Theoretical Aspects of Road. **Traffic Research Proceeding, Institution of Civil Engineers II**, 1, 325-378.

Yang, H., Yagar, S. y Iida, Y. (1994) Traffic assignment in a congested discrete/continuous transportation system. **Transportation Research Part B**, 28, 161-174.

Zhang, Y., Lv, J. y Ying, Q. (2010) Traffic assignment considering air quality. **Transportation Research Part D**, 15, 497-502.