

TÍTULO: POTENCIALIDAD DEL USO DE MODELOS DE ASIGNACION DINAMICA DE TRANSITO PARA ESTUDIO DE OPERACIÓN Y PLANIFICACIÓN EN REDES URBANAS

NOMBRE Y APELLIDO DE LOS AUTORES:

Ing. Pablo Esteban ZEBALLOS

Ing. Pablo ARRANZ

DIRECCIÓN POSTAL COMPLETA:

**Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba
Avenida Vélez Sarsfield 1611, Ciudad Universitaria, X5016GCA, Córdoba, Argentina**

NÚMERO DE TELÉFONO Y FAX:

TE/FAX: 54 – 351 – 4334149

DIRECCIÓN DE CORREO ELECTRÓNICO:

pablozeballos.89@gmail.com

parranz@unc.edu.ar

ÁREA TEMÁTICA PROPUESTA:

Movilidad Urbana

POTENCIALIDAD DEL USO DE MODELOS DE ASIGNACION DINAMICA DE TRANSITO PARA ESTUDIO DE OPERACIÓN Y PLANIFICACIÓN EN REDES URBANAS

RESUMEN

En una visión denominada “estática” de la asignación de tránsito en una red vial urbana se asume que los conductores eligen su ruta minimizando el tiempo de viaje (o costo generalizado) entre el origen y el destino (O-D). Por la congestión, este tiempo depende de las decisiones de otros viajeros, quienes también eligen su ruta intentando minimizar su tiempo de viaje. Cuando cada viajero tiene éxito en la búsqueda de tal ruta, cada camino utilizado tiene el tiempo o costo mínimo. La Asignación Dinámica de Tránsito (DTA por Dynamic Traffic Assignment) verifica en forma iterativa las nuevas rutas que van apareciendo a causa de la congestión. De esta manera, el viajero se ve enfrentado de una duración del viaje cambiante y diferente de la que percibía al partir.

La mayoría de los viajeros seleccionan el camino de mínimo tiempo de viaje en base a la experiencia (en lugar de aquel con mínimo tiempo de viaje instantáneo). El tiempo de viaje con experiencia se evalúa después del hecho. Así, la elección de una ruta con mínimo tiempo de viaje con experiencia al momento de la salida, consiste en la anticipación de la futura condición de tránsito a lo largo del viaje. Un proceso iterativo refleja el aprendizaje y el ajuste en la elección de ruta hasta que el viajero no puede encontrar una ruta mejor.

Se expone la evolución histórica de los enfoques del problema de asignación dinámica (desde sus albores en los '80 hasta las prácticas actuales y desafíos). Se realiza una descripción conceptual de la conformación de los modelos DTA y una explicación analítica resumida. Se plantean las ventajas de uso de estos modelos dinámicos y las aplicaciones mas beneficiadas. Se destacan las particularidades de aplicación al caso de la Ciudad de Córdoba.

POTENCIALIDAD DEL USO DE MODELOS DE ASIGNACION DINAMICA DE TRANSITO PARA ESTUDIO DE OPERACIÓN Y PLANIFICACIÓN EN REDES URBANAS

INTRODUCCIÓN

En los estudios de tránsito, el comportamiento común supuesto se basa en que la elección de rutas, entre su origen y destino, por parte de los usuarios de una red vial, depende fuertemente de los costos generalizados de viaje (percepción de los costos monetarios, tiempo de viaje y espera, entre otros). Esto refleja la idea de que el viaje no suele ser un objetivo en sí mismo, sino que implica una desutilidad que los viajeros prefieren evitar. La valoración y percepción de estos costos resulta diferente en función del grado de congestión en las rutas alternativas. Debido a ello, el tiempo de viaje de una ruta entre un O-D también depende de las decisiones tomadas por otros viajeros, quienes de igual forma intentan elegir la ruta de menor tiempo de viaje entre su propio O-D. Cuando cada viajero tiene éxito en la búsqueda de tal objetivo, cada ruta utilizada tiene el costo mínimo entre O-D. Además, para cada par O-D, cada camino utilizado tiene el mismo tiempo de viaje. Esta condición se conoce como *Equilibrio de Usuario* (UE por *User Equilibrium*). La Asignación Dinámica de Tránsito (DTA) verifica en forma iterativa las nuevas rutas que van apareciendo en la red a causa de congestión.

La asignación adecuada del tránsito a una red presenta interés para la planificación de transporte de una ciudad y para tomar conocimiento de la operación de redes de transporte. De esta forma, el desarrollo de un algoritmo validado para la Asignación Dinámica abre las posibilidades a mejoras de gestión en el sistema de tránsito. El uso de un modelo de estas características permite asistir al diseño de un nuevo modo o infraestructura, evaluar la operación ante condicionamientos en los elementos de la red o estudiar la tarificación. Así posibilita estudiar la operación de la red ante cortes de ruta, parciales o totales, permitiendo redirigir el tránsito de la manera más conveniente para el funcionamiento global del centro urbano.

La Asignación Dinámica de Tránsito (DTA), aunque todavía en un estado de progreso, ha evolucionado considerablemente desde el trabajo pionero de Merchant y Nemhauser (en 1978). Actualmente se ha incrementado el interés por los modelos DTA, particularmente en el desarrollo de enfoques que se pueden implementar a gran escala en tiempo real y para aplicaciones de planificación urbanística. Agencias y profesionales en la materia también se están dando cuenta, cada vez más, del potencial de la DTA para: abordar los problemas de larga duración (ante los supuestos poco realistas de los métodos de planificación estática), evaluar Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS por *Intelligent Transportation Systems*), y ser el principal mecanismo operativo de implementación.

ANTECEDENTES

La Asignación de Dinámica de Tránsito ha evolucionado sustancialmente desde el trabajo pionero de Merchant y Nemhauser en 1978 (3). Esta sección revisa brevemente la literatura

pasada de DTA, clasificando los diferentes enfoques en cuatro grandes grupos metodológicos.

Formulaciones de programación matemática

Los modelos DTA de programación matemática formulan el problema por períodos de tiempo discretizados. Merchant y Nemhauser realizan el primer intento de formular el problema DTA como un programa matemático. Las formulaciones están limitadas a un caso de optimización del sistema, para un evento determinístico, de demanda fija, de un solo destino, de un único producto (commodity).

En 1987 Carey (citado en 4) reformula el problema Merchant-Nemhauser como un programa no lineal convexo de buen comportamiento a través de la manipulación de las funciones de salida, que ofrece ventajas matemáticas y algorítmicas sobre la formulación original.

Jason (ya en 1991 citado en la misma fuente) representa uno de los primeros intentos de modelar el problema DTA por UE como un programa matemático. Una de las características de su enfoque es que busca un equilibrio en términos de tiempos de viaje ruta con experiencia, en lugar de los tiempos de viaje instantáneos, asumidos en estudios previos.

Dos años después Birge y Ho amplían el problema M-N para el caso estocástico al relajar el supuesto de que los deseos de O-D son conocidos en todo el horizonte de planificación.

Ziliaskopoulos, en 2000 (citado en 2) presenta una formulación de programación lineal para el problema DTA por Óptimo de Sistema (SO por *System Optimal*), con un destino único, basado en el modelo de transmisión de celda para la propagación del tránsito.

Formulaciones de Control Óptimo

En las formulaciones DTA de la teoría de Control Óptimo, las tasas de viajes O-D y los flujos de arco se asumen como funciones continuas de tiempo, con restricciones análogas a las de la programación matemática de tiempo discreto.

Friesz et al. (1989, citado en 4) discuten formulaciones de control óptimo con funciones de arco, para SO y UE, para el caso de destino único. Estos modelos asumen que pueden producirse ajustes del sistema (modificaciones en las decisiones de enrutamiento) de un estado a otro, al tiempo que cambian las condiciones de la red. Los modelos utilizan funciones de salida para propagar el tránsito y funciones de rendimiento de arco para determinar los costos de viaje.

El mismo año Ran y Shimazaki (citado en 4) utilizan el enfoque de control óptimo para desarrollar un modelo basado en SO para una red de transporte urbano con múltiples orígenes y destinos.

Boyce en 1995 (en 4) discute una metodología para resolver la versión discretizada del problema, utilizando el algoritmo de Frank-Wolfe, y una representación ampliada de la red.

Aunque es un enfoque atractivo para la descripción de los sistemas dinámicos, la formulación de DTA con control óptimo sufre de limitaciones tales como: la falta de restricciones explícitas para asegurar la condición FIFO (First in – First out), la imposibilidad de contener vehículos en los nodos, el modelado inadecuado, la posiblemente poco realista congestión del tránsito, y la falta de un procedimiento de solución para redes generales.

Formulaciones de Desigualdad Variacional

La Desigualdad Variacional (VI) proporciona una plataforma general para la formulación de varias clases de problemas en el contexto DTA y fomenta un mecanismo unificado para abordar los problemas de equilibrio y optimización. En 1980, Dafermos introduce el enfoque VI en el contexto de equilibrio de tránsito estático.

Friesz et al. en 1993 (citado en 1) formulan un modelo VI de tiempo continuo para resolver la elección hora de salida/ruta, equilibrando los tiempos de viaje con experiencia. El modelo utiliza funciones de desempeño de arco, funciones de penalización para las llegadas tempranas/tarde, demandas de viaje, horas de llegada deseadas, y todos los caminos posibles entre los orígenes y destinos. La formulación incorpora relativamente más realismo en términos de comportamiento de los viajeros, pero tiene problemas no resueltos, como la falta de pruebas de la existencia de una solución única.

Wie et al. (1995 citado en 4) introducen una formulación discretizada VI para el problema de equilibrio simultáneo de ruta/hora de salida, para permitir la viabilidad computacional, y proponen un algoritmo heurístico para resolverlo aproximadamente. Demuestran la existencia de solución bajo ciertas condiciones de regularidad.

Chen y Hsueh (en 1998 en 4) también proponen una formulación VI con funciones del arco para el problema DTA por UE. Ellos muestran el tiempo de viaje en un enlace se puede representar como una función del flujo de entrada al arco únicamente.

El enfoque VI proporciona una mayor flexibilidad analítica y comodidad en el tratamiento de diversos problemas DTA, sin embargo, son computacionalmente más intensivos, planteando interrogantes sobre su viabilidad para el despliegue en tiempo real.

Modelos basados en Simulación

Los modelos DTA basados en la simulación utilizan un simulador de tránsito para replicar la compleja dinámica de flujo vehicular. La abstracción matemática del problema es una formulación analítica típica, sin embargo, las restricciones fundamentales que describen la propagación del flujo del tránsito y las interacciones espacio-temporales, se abordan a través de la simulación en lugar de la evaluación analítica, durante la resolución del problema. Por lo tanto, el término "basado en la simulación" connota principalmente la metodología de solución en lugar de la formulación del problema.

A lo largo del tiempo se han desarrollado modelos DTA que utilizan un simulador de tránsito mesoscópico, DYNASMART, como parte de un algoritmo iterativo para resolver soluciones de SO y UE, para una demanda con horarios de salida fijos. La lógica de simulación adoptada combina un nivel microscópico para la representación de viajes y conductores individuales, con una descripción macroscópica de algunas de las interacciones que tienen lugar en el flujo de tránsito.

Posteriormente se extendieron los modelos a escenarios más realistas, donde existen múltiples clases de usuarios en términos de disponibilidad y estrategia de suministro de información, y la respuesta del conductor a dicha información.

Con el objetivo de generar una capacidad de despliegue en tiempo real, se desarrollaron modelos DTA de horizonte cambiante, de manera de incorporar explícitamente las variaciones en las condiciones de la red y fomentar la eficiencia computacional.

En 1997 se propone Dynamit, un sistema de asignación de tránsito dinámico compuesto de un simulador de oferta y uno de demanda, que interactúan para generar una guía de ruta de UE en horizontes cambiantes.

Posteriormente se introducen avances tecnológicos como un sistema de información geográfica basado en Internet, que integra datos y modelos en un solo marco. El modelo DTA utiliza RouteSim, un modelo mesoscópico basado en transmisión de celda para la propagación de tránsito, como simulador.

ASIGNACIÓN DINÁMICA DE TRÁNSITO

Los modelos de asignación dinámica de tránsito no reemplazan a los modelos utilizados hasta el momento, sino que los complementan en situaciones donde se requiera una visión detallada. Los modelos de predicción de viajes tienen una capacidad de análisis estática de los viajes regionales, mientras que los modelos de simulación de tránsito microscópicos son superiores para el análisis de los viajes a nivel de corredor dinámico. Los modelos DTA llenan el espacio entre modelos de microsimulación y modelos estáticos de mayor escala.

El tiempo de viaje y las medidas de costos determinados usando procedimientos de análisis de redes estáticos utilizan variables que son invariantes en el tiempo. Es cada vez más evidente que estos procedimientos son inadecuados como explicaciones sobre las opciones de viaje y, como medidas utilizadas para evaluar: los impactos de políticas de gestión en sistemas de transporte, la forma de financiar mejoras y los impactos ambientales relacionados con viajes en una red.

Algunos modelos de microsimulación permiten a los vehículos actualizar el camino seleccionado originalmente basándose en la ruta más corta, actualizada durante el viaje. Si bien existe esta conducta de elección de itinerarios en la realidad, debe destacarse que la

mayoría de los viajeros eligen la ruta que conduce al mínimo tiempo de viaje con experiencia, en lugar de un mínimo tiempo de viaje instantáneo. La elección de una ruta con tiempo de viaje con experiencia, al momento de salir, consiste en la anticipación de la futura condición de tránsito a lo largo del viaje. Esta anticipación es generalmente formada por aprender de la experiencia previa (por ejemplo, probar diferentes rutas). Para dar cuenta de esta situación, se necesita un proceso algorítmico iterativo. Éste refleja el aprendizaje y el ajuste en la elección de ruta de una iteración a la siguiente, hasta que el viajero no puede encontrar una ruta con un tiempo de viaje experimentado más corto.

La búsqueda de equilibrio del método DTA está dirigida al ajuste del tiempo de recorrido y a la relación de tales cambios en el rendimiento de la red, a través de la simulación.

Modelos Estáticos vs Modelos Dinámicos

En un modelo estático definido para un período relativamente largo de tiempo del día, como la hora pico, las propiedades de congestión de cada enlace se describen mediante una función volumen-demora o tiempo-rendimiento del arco, como un promedio estacionario. El volumen en el enlace se determina directamente mediante la matriz origen-destino, llevada a los arcos a través de rutas. Los tiempos de viaje de cada arco en una ruta se suman para determinar el tiempo de viaje de la ruta. Este enfoque tiene algunas limitaciones en cuanto al realismo con el que se representa el proceso real que da lugar a la congestión y al aumento del tiempo de viaje.

En estos modelos, el flujo de entrada a un enlace es siempre igual al de salida: el tiempo de viaje simplemente aumenta a medida que el volumen de entrada y salida aumentan. El volumen en un enlace puede aumentar indefinidamente y exceder la capacidad física del enlace ($V/C > 1$). Dado que el volumen del arco no se ajusta a un límite de flujo, el volumen asignado al enlace pueden ser considerado como la demanda de viajes. El inconveniente de la utilización de V/C es que no se correlaciona directamente con ninguna medida que describa físicamente la congestión (velocidad, densidad, propagación de cola). En los modelos dinámicos, como en la realidad, la modelización explícita de la dinámica del flujo de tránsito asegura la vinculación directa entre el tiempo de viaje y la congestión. Si el flujo de salida del arco es inferior al de entrada, la densidad de enlace aumentará (congestión), y la velocidad disminuirá (relación fundamental densidad-velocidad), y por lo tanto el tiempo de viaje se incrementará.

Enfoque de Equilibrio en la Red

La investigación de DTA, mediante la representación de variaciones en el tiempo de los flujos y las condiciones del tránsito, ha tratado de reflejar la realidad de que las redes de tránsito en general, no se encuentran en un estado de equilibrio. Para conservar las ventajas de un enfoque de equilibrio, la noción de equilibrio de usuario debe extenderse de dos maneras.

La *primera extensión* generaliza la información perfecta del viajero en criterio de asunción y elección de ruta en el modelo estático, reconociendo que los tiempos de viaje en los arcos

de la red varían con el tiempo. La *segunda extensión* reconoce que, en un enfoque dinámico, la condición de equilibrio de usuarios con igual tiempo de viaje en rutas utilizadas supone que sólo se aplica a los viajeros que parten al mismo tiempo entre el mismo par O-D. Estas dos extensiones, aunque aparentemente sutiles, marcan un cambio fundamental respecto a la asignación estática en la representación del tránsito y el diseño de algoritmos.

La necesidad de calcular la ruta más corta que reduce al mínimo el tiempo de viaje con experiencia real motivó el desarrollo del *algoritmo de la ruta más corta en función del tiempo* (TDSP – *Time-Dependent Shortest Path*).

La segunda extensión desagrega la condición de equilibrio, de modo que la condición de equilibrio debe ser establecida para el momento de salida en lugar de todo el período de análisis; este resultado se conoce como *equilibrio dinámico de usuario* (DUE – *Dynamic User Equilibrium*).

Encontrar una solución DUE es un ejercicio iterativo, porque la mejor elección de ruta de cada viajero depende de los niveles de congestión en todo el viaje, que a su vez dependen de las opciones de ruta y el progreso a través de la red de otros viajeros que salen antes, al mismo tiempo o después.

Algoritmo general

Como se muestra en la Figura 1, el método más común para encontrar el equilibrio en DTA es aplicar los tres componentes algorítmicos siguientes en una secuencia iterativa, hasta que se cumpla un criterio de parada definido:

Carga de red: Dado un conjunto de opciones de ruta (rutas y flujos de ruta), ¿cuáles son los tiempos de viaje de ruta resultantes?

Actualización de ruta: Teniendo en cuenta los tiempos de viaje de ruta actuales, ¿cuáles son las nuevas rutas más cortas (por par O-D e intervalo de tiempo de salida)?

Ajuste de la asignación de ruta: Dados los conjuntos de ruta actualizadas, ¿cómo deben ser asignados los vehículos (o flujos) a las rutas para aproximar mejor al equilibrio de usuario dinámico?

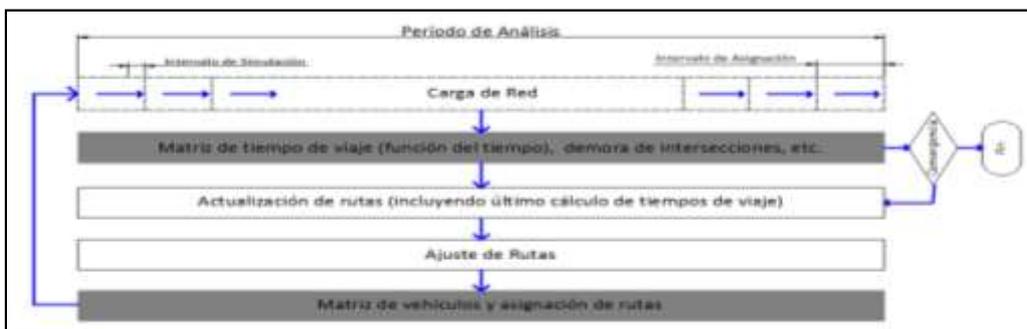


Figura 1. Procedimiento algoritmos general de DTA.

La calidad de los resultados del modelo DTA basados en la simulación puede ser juzgado por lo general a partir de la convergencia, la sensibilidad y estabilidad, y el realismo de la dinámica del tránsito.

CONFORMACIÓN DE MODELOS DTA

En el proceso de modelado, el objetivo de la asignación de tránsito es el de determinar los flujos de tránsito, las condiciones que resultan de las interacciones entre las opciones de ruta seleccionadas por los usuarios y la congestión que resulta de su recorrido sobre la red.

El desarrollo de un modelo DTA generalmente requiere un análisis cuidadoso de los datos con el fin de obtener un modelo exitoso del año base. Los datos de la red deben ser evaluados para asegurar consistencia y precisión, y por lo general requieren mejorarlos para incluir algún detalle de representación, que no se necesita en los modelos estáticos. Es necesario relevar volúmenes vehiculares o perfiles de velocidades del tránsito para la validación de modelos, recopilar información sobre el sistema de control, y observar los tiempos de viaje en las rutas de la región. Los elementos ITS existentes también deben ser incorporados en el modelo.

El proceso de calibración es típicamente un enfoque iterativo que requiere la experiencia de ajustar la capacidad, la demanda, y los parámetros de comportamiento, basado en las evaluaciones de las soluciones existentes. Esto incluye vincular los conteos relevados en campo y los puntos de embotellamiento en términos de extensión temporal y espacial (detectados a partir de la velocidad o la densidad, en lugar de los conteos).

El proceso de implementación de un modelo DTA requiere de los siguientes conjuntos de datos:

Datos de la demanda. Suelen emplearse tablas de viaje dinámicas o registros de actividad de viaje individuales, con información sobre las salidas dentro de un intervalo de tiempo relativamente corto.

Datos de la red. Se requiere de mayor cantidad de datos que para los modelos estáticos. Por ejemplo, dentro de una red se necesita datos tales como número de carriles en cada enlace, presencia de carriles de aceleración-deceleración, de giro y de confluencia. Este paso implica la definición de nodos y enlaces.

Datos de control. Se refiere a la codificación de los tiempos de semaforización y el control de las ramales de acceso, fundamentales tanto para la simulación como para la asignación. Los modelos DTA pueden representar típicamente el funcionamiento de semáforos fijos y la sincronización de las señales.

Caracterización de la solución

Un modelo DTA acepta diversas entradas y parámetros, que son utilizados por los distintos componentes del modelo de demanda y de la red e interactúan para predecir la evolución espacial y temporal de las condiciones de tránsito. Un modelo DTA genérico se ilustra en la Figura 2.

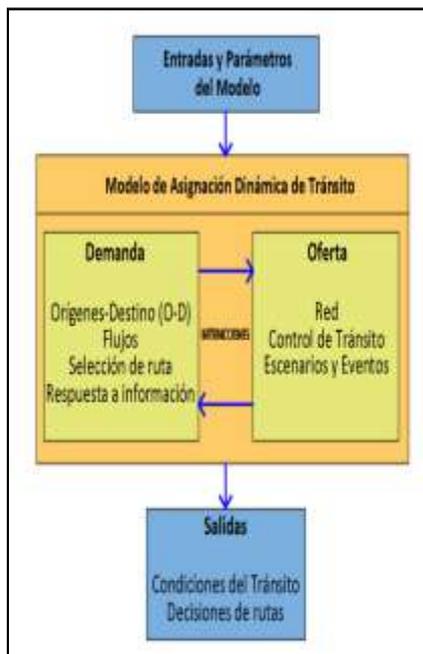


Figura 2. Modelo DTA genérico.

Estos modelos ofrecen una amplia gama de salidas detalladas que describen estados de red en función del tiempo, como por ejemplo el tiempo de viaje a nivel de sistema, la distancia recorrida, tiempos de detención, velocidades, densidades, colas y tiempos de detención a nivel de arco.

Las salidas de modelos DTA grandes y complejos dependen en gran medida de los valores de entrada seleccionados. Sin embargo, antes de analizar los resultados típicos del modelo, tales como medidas de flujo, velocidad y densidad en los arcos, existen medidas globales que se pueden utilizar para caracterizar los resultados de los modelos y ponerlos en contexto. Se trata principalmente de medidas de convergencia (como la brecha relativa) y ciertas medidas globales de la red que son particularmente importantes en la revisión de las corridas iniciales de una modelación DTA.

Calibración y Validación del Modelo

La calibración del modelo consiste en la identificación de un conjunto de datos y parámetros del modelo DTA, que se traduce en resultados de la modelación, de modo que éstos se encuentren razonablemente cerca de las observaciones de campo.

El proceso de validación compara los resultados del modelo con las condiciones de tránsito observadas, tales como conteos vehiculares y de velocidades, para evaluar la calidad de los resultados.

Los datos de tránsito medidos pueden representar una amplia gama de variables, como ser el conteo de vehículos por arco o por carril, la velocidad media, la densidad media del arco, longitudes de cola, tiempos de viaje en arcos y conteos de movimientos en intersecciones. Ya que las salidas del modelo DTA son variables en el tiempo, los datos utilizados para la calibración y validación también deben ser dinámicos.

Análisis de Escenarios

Los modelos DTA reflejan las condiciones observadas de la red de transporte, por lo que pueden desarrollarse y evaluarse modelos comparables de escenarios alternativos, en relación al modelo base. Además de los escenarios convencionales relacionados con cambios en la capacidad de la red, pueden evaluarse aquellos relativos a alternativas de controles de red (control de ramas de acceso o coordinación de semáforos), estrategias de información (señales de mensajes dinámicos, o mecanismos de información en ruta o antes de iniciado el viaje), fijación de precios, o gestión integrada del corredor.

Precauciones

Los modelos DTA toman más tiempo y recursos para construir y calibrar (en comparación con los modelos estáticos) y representan la dinámica del tránsito en una granularidad más gruesa (en comparación con los modelos de microsimulación). Por ello, debe hacerse coincidir el modelo elegido con el problema a resolver.

Los modelos DTA existentes simulan transporte público, pero la asignación dinámica de éste, por lo general no se incorpora en los modelos existentes.

Los modelos DTA pueden, hasta cierto punto, representar los efectos de la mayoría de las lógicas de semaforización existentes en un nivel de simulación mesoscópico, sin embargo, esta representación es relativamente simplista.

BASE ANALÍTICA DE LA MODELACION DTA

En este trabajo, se expone un algoritmo de solución basada en la descomposición de Dantzig-Wolfe, para la formulación de Programación Lineal (PL) introducida por Ziliaskopoulos, para el problema de Asignación Dinámica de Tránsito por Óptimo de Sistema (citado en 2). El algoritmo toma ventaja de la estructura de red, mediante el conjunto de restricciones de la formulación: el sub-problema se formula como un problema de minimización de costo-flujo y el problema principal como uno de programación lineal simple, que permite resolver la DTA de manera más eficiente. En esta formulación el tránsito se propaga de acuerdo con el modelo de transmisión de celda.

A continuación se describe el caso simplificado de redes con un destino único. La estructura de red del problema DTA por PL es explotado y se descompone en problemas de minimización de flujo-costos que son más fáciles de resolver.

Las notaciones utilizadas en esta formulación se enumeran en la Tabla 1.

Tabla 1. Notación empleada.

C, E	Conjunto de celdas y conectores de celdas, respectivamente
C_R, C_S	Conjunto de celdas de origen y destino, respectivamente
T	Conjunto de intervalos discretos de tiempo
$x_{r,s,i}^t$	Número de vehículos contenidos en la celda "i" en el intervalo "t" con origen en la celda "r" y destino en la celda "s"
$y_{r,s,ij}^t$	Flujo entre las celdas "i" y "j" desde el intervalo "t" al intervalo "t+1" con origen en la celda "r" y destino en la celda "s"
N_i^t	Número máximo de vehículos que pueden estar en la celda "i" en el intervalo "t"
Q_i^t	Máximo número de vehículos que pueden ingresar o salir de la celda "i" en el intervalo "t"
$P(i)$	Conjunto de celdas predecesoras a la celda "i"
$S(i)$	Conjunto de celdas sucesoras a la celda "i"
$d_{r,s}^t$	Demanda entre el origen "r" y el destino "s" en el tiempo "t"

La formulación de este problema es:

Minimizar

$$\sum_{\forall t \in T} \sum_{\forall i \in C \setminus C_S} x_i^t \quad (1)$$

Sujeto a las siguientes condiciones

$$x_i^t - x_i^{t-1} - \sum_{k \in P(i)} y_{ki}^{t-1} + \sum_{j \in S(i)} y_{ij}^{t-1} = 0, \quad \forall i \in C \setminus \{C_R, C_S\}, \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{j \in S(i)} y_{ij}^t - x_i^t \leq 0, \quad \forall i \in C, \forall t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{\forall i \in P(j)} y_{ij}^t + x_i^t \leq N_j^t, \quad \forall j \in C \setminus \{C_R, C_S\}, \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{\forall i \in P(j)} y_{ij}^t \leq Q_j^t, \quad \forall j \in C \setminus C_R, \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{j \in S(i)} y_{ij}^t \leq Q_i^t, \quad \forall i \in C \setminus C_S, \forall t \in T \quad (6)$$

$$x_i^t - x_i^{t-1} + y_{ij}^{t-1} = d_i^{t-1}, \quad j \in S(i), \forall i \in C, \forall t \in T \quad (7)$$

$$y_{ij}^0 = 0, \quad \forall (i,j) \in E \quad x_i^0 = 0, \quad \forall i \in C \quad (8)$$

$$x_i^t \geq 0, \quad \forall i \in C, \forall t \in T \quad y_{ij}^t \geq 0, \quad \forall (i,j) \in E, \forall t \in T \quad (9)$$

Un análisis detallado del conjunto de condiciones revela que todas, salvo la restricción de capacidad (4), son restricciones de red.

La conservación de flujo, la capacidad de enlace, y las limitaciones de no negatividad para la red expandida corresponden a las restricciones (2), (3) y (5) a (9) de la formulación original.

Para la aplicación del algoritmo de descomposición Dantzig-Wolfe, se define c_a y f_a como el costo y el flujo asociado con la celda "a", respectivamente. Basado en el análisis de la formulación y la representación de celda, la formulación de PL para el problema DTA por SO se puede presentar de la siguiente forma:

$$\text{Minimizar } \sum_a c_a f_a \quad (10)$$

$$\text{Sujeto a } f \in F \quad (11)$$

Donde F es el conjunto de soluciones factibles de "f" que satisfagan las limitaciones de conservación de flujo y capacidad de enlace en el problema del flujo-costo mínimo.

De esta forma puede implementarse el algoritmo de descomposición, donde el problema principal trata de encontrar la combinación óptima de soluciones disponibles en la actualidad y el sub-problema encuentra una nueva solución en cada iteración que potencialmente puede mejorar la función objetivo. La solución consiste en un patrón de flujo.

El problema principal se puede escribir como:

$$Z_M = \min_{\lambda} \sum_{j=1}^m (c f^{(j)}) \lambda_j \quad (13)$$

Sujeto a

$$\sum_{j=1}^m (A f^{(j)}) \lambda_j \leq N \quad (\pi_1) \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^m \lambda_j \leq 1 \quad (\delta) \quad (15)$$

$$\lambda_j \leq 0 \quad (16)$$

donde "m" es el número actual de los patrones de flujo disponibles, y π_1 y δ son las variables duales para las restricciones correspondientes.

El sub-problema es:

$$Z_S = \min_f (c - \pi_1 A) f - \delta \quad (17)$$

Sujeto a

$$f \in F \quad (\pi_2)$$

Por lo tanto, el sub-problema es un problema de minimización de flujo-costo en base a los costos modificados de arco $(c - \pi_1 A)$.

UTILIDADES Y APLICACIONES

La revisión de los últimos estudios de DTA proporciona indicadores de los retos y oportunidades en el dominio DTA en general, tanto en términos de líneas de investigación como de aplicaciones prácticas. Las tendencias recientes sugieren que puede abarcar a una amplia gama de problemas en operación, planificación e ingeniería de transporte. Cada una, a su vez, presenta una serie de desafíos y oportunidades para la investigación de DTA.

Las áreas de aplicación principales para modelos DTA se pueden identificar como la planificación operativa y el control operacional en tiempo real de los sistemas de tránsito vehicular.

La **planificación operativa** se dirige a la toma de decisiones de programación de las principales acciones de operación, construcción o gestión de la demanda, que puedan inducir a un cambio de patrón temporal o espacial en el tránsito, entre las diferentes instalaciones a nivel corredor, para toda la red. Estos tipos de proyectos incluyen, entre otros: (a) los cambios significativos de configuración de carretera (por ejemplo, cambio de las calles del centro de un sentido a dos sentidos), (b) la expansión de autopistas, (c) la construcción de una carretera de circunvalación de un centro urbano, (d) la adición o conversión de carriles exclusivos, (e) la mejora/construcción integrada de autopista o corredor vial, y (f) las estrategias de gestión de demanda de viajes, como propagación del pico de tránsito o la tarifa de congestión.

En los casos anteriores, la característica subyacente que motiva el uso de DTA es que el cambio en la demanda o en las condiciones de la red es lo suficientemente significativa para inducir cambios en el flujo de tránsito espaciales o temporales, como consecuencia de los viajeros que desean utilizar diferentes rutas u horarios de salida en respuesta a los cambios de la demanda o de la red. Por lo tanto, las nuevas rutas de vehículos necesitan ser reestimadas por el procedimiento DUE. Debido a que el modelo tiene que ser sensible a la congestión, la DTA parece ser más adecuado para abordar este problema que el enfoque de asignación de tránsito estático. Por otra parte, debido a que tales cambios de patrones de flujo de tránsito es probable que tengan lugar sobre un área geográfica más grande y en un período de tiempo más largo, la DTA basada en la simulación puede ser más rentable que la simulación de tránsito microscópica, para capturar el cambio del flujo vehicular de un área amplia.

En los últimos años, un creciente número de investigadores han aplicado DTA para apoyar las tareas de modelado relacionadas con las siguientes áreas:

- Gestión de corredor de autopistas interestatales.
- Gestión Integrada de corredor.
- Gestión de tránsito en interrupciones de la red de corto o largo plazo.
- Administración de carriles.
- Gestión del tránsito y configuración de las calles en el centro de la ciudad.
- Gestión de incidencias.

- Provisión de información y evaluación de sistemas ITS.
- Manejo de carriles exclusivos o tarifa de congestión.
- Gestión de emergencias.
- Análisis de inventario de la calidad del aire.
- Evaluación del plan maestro de transporte.
- Generación de modelos de tránsito regionales de multi-resolución (macro, DTA y micro).
- Integración con modelos de demanda de viajes existentes o modelos basados en la actividad.
- Confiabilidad de la red

En el contexto del ***control de las operaciones en tiempo real***, los modelos DTA son relevantes para los ingenieros de transporte que trabajan con problemas de gestión del tránsito o de suministro de información en tiempo real, a gran escala. Los modelos DTA en tiempo real son adecuados para abordar este tipo de problemas de una manera sistemática, ya que proporcionan capacidades para estimar las condiciones de red futuras (patrones de flujo) que resultarán de una estrategia en particular. Aunque hay modelos DTA avanzados en tiempo real, todavía es necesario abordar algunas cuestiones importantes para alcanzar plenamente un despliegue eficaz. Por ejemplo, los modelos a implementarse deben ser computacionalmente eficientes para proporcionar soluciones oportunas.

CONCLUSIONES

La Asignación Dinámica de Tránsito se ha desarrollado rápidamente en las últimas décadas, impulsada por las necesidades de dominio de aplicaciones que van desde operaciones de tránsito en tiempo real hasta la planificación a largo plazo. Aun caracterizado por su indocilidad matemática inherente y su complejidad desafiante, ha dado lugar a un vasto material de literatura que abarca una amplia gama de problemas con diferentes supuestos subyacentes y objetivos funcionales. Mientras que la investigación desarrollada ha llevado a los rápidos avances en la comprensión de las características del problema, también ha puesto de relieve las dificultades que implica el desarrollo de un enfoque de aplicación universal para las redes generales en el ámbito operativo. Por ejemplo, un modelo analítico matemática y computacionalmente viable, adecuadamente sensible al realismo tránsito frente a las operaciones en tiempo real, sigue siendo difícil de alcanzar. En consecuencia, la investigación actual todavía se centra en las características fundamentales del problema, mientras se aventura en cuestiones de implementación que están motivadas por necesidades operativas actuales y futuras.

Las investigaciones de los últimos años tratan y debaten la factibilidad de DTA para aplicaciones de planificación. Los primeros intentos fueron llevados a cabo para evaluar comparativamente los modelos estáticos y dinámicos aplicados a la misma red y la demanda total; este es un esfuerzo inútil, ya que nunca se sabrá la verdad de fondo como para comparar la realidad con el resultado de los modelos. Debatir sobre si los modelos

dinámicos son mejores que los estáticos no es el problema; los modelos dinámicos son obviamente superiores, ya que se relajan más supuestos y capturan más realidades que los enfoques estáticos. Los modelos dinámicos son simplemente la evolución natural en el campo de transporte que como cualquier otro nuevo esfuerzo sufre de deficiencias de desarrollo temprano; es sólo una cuestión de tiempo antes de que sean mejorados y finalmente adoptados por la industria.

Las tendencias recientes sugieren que puede abarcar a una amplia gama de problemas en operación, planificación e ingeniería de transporte. Cada una, a su vez, presenta una serie de desafíos y oportunidades para la investigación de DTA.

Las áreas de aplicación principales para modelos DTA se pueden identificar como la planificación operativa y el control operacional en tiempo real de los sistemas de tránsito vehicular.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chiu Yi-Chang, Bottom Jon, Mahut Michael, Paz Alex, Balakrishna Ramachandran, Waller Travis, Hicks Jim; 2011; Dynamic Traffic Assignment – A Primer; Washington DC.
2. Li Yue, Waller Travis, Ziliaskopoulos Thanasis; 2003; A Decomposition Scheme for System Optimal Dynamic Traffic Assignment Models; Países Bajos.
3. Merchant, D.K. and G.L. Nemhauser. (1978). "A Model and an Algorithm for the Dynamic Traffic Assignment Problems." *Transportation Science* 12(3), August 1978, 183-199.
4. Peeta Srinivas, Ziliaskopoulos Thanasis; 2001; Foundations of Dynamic Traffic Assignment: The Past, the Present and the Future; Países Bajos.