

MARCO DE INTEGRACIÓN MESO-MICROSCÓPICA ENFOCADA EN LA SIMULACIÓN DE TRÁFICO DE BUSES DE TRANSPORTE PÚBLICO

Benjamín Ulloa, Directorio de Transporte Público Metropolitano, benjamin.ulloa@ug.uchile.cl

Cristián E. Cortés, Universidad de Chile e Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI),
ccortes@ing.uchile.cl

Raúl Espinoza, Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI),
raul.espinoza.muirhead@gmail.com

Pablo A. Rey, Universidad Tecnológica Metropolitana, prey@utem.cl

Resumen

En este trabajo se propone un nuevo modelo de simulación enfocado en la operación de transporte público, que incorpora el comportamiento de buses, pasajeros y resto del tráfico, combinando distintos niveles de simulación dentro de una misma red. Dentro de la red representada, la simulación permite definir zonas microscópicamente, representando de forma detallada la interacción en lugares críticos, como paraderos o ejes de mayor congestión. Por otro lado, el resto de zonas se simplifica a un nivel mesoscópico, interactuando ambos niveles en tiempo real a lo largo de la simulación. En la modelación mesoscópica se propone una modificación del modelo de transmisión de celdas en la cual se mantiene una representación discreta para los buses representando un cuello de botella en movimiento. En la evaluación de cada escenario se analizan indicadores de interés para operadores y usuarios: velocidades, regularidad, frecuencia y tiempo de ciclo de los servicios y tiempos de viaje, de espera y hacinamiento de los pasajeros.

Palabras clave: simulación híbrida, transporte público, microsimulación, cell transmission model

Abstract

In this work, we propose a new simulation model focused on the operation of public transport systems. It incorporates the behavior of buses and passengers with the rest of the traffic, combining different levels of simulation within the same network. In the same network, the simulation allows the modeling of some zones microscopically to represent with much detail the interaction in critical places, such as bus stops or high-congestion corridors. On the other hand, the remaining zones are simplified and modeled at a mesoscopic level, and both levels interact over the simulation execution. For the mesoscopic level, we propose a modified cell transmission model in which the buses are still represented individually as a bottleneck under motion. In evaluating each scenario, key indicators for operators and users are analyzed: speeds, regularity, frequency, cycle time, travel and waiting times, and crowding of people on bus stop zones.

Keywords: hybrid simulation, public transport, microsimulation, cell transmission model

1. Introducción

Una pieza clave en el desarrollo y funcionamiento de las ciudades es el transporte público, dado que si se diseña, planifica y gestiona de manera adecuada, es el soporte fundamental para un desarrollo urbano sostenible al permitir de forma eficiente el transporte de un gran volumen de personas. La operación del sistema impacta directamente en la calidad de vida de las personas, donde contar con un alto nivel de servicio permite mantener satisfechos a los usuarios del sistema, además de ser atractivo para potenciales usuarios nuevos.

En este sentido, garantizar un buen nivel operacional del sistema de transporte público urbano de Santiago, ha requerido incluir indicadores de cumplimiento en la evaluación de la operación. Así, debido a que el sistema es operado exclusivamente por empresas privadas, las medidas y políticas adoptadas durante los últimos 15 años han estado enfocadas en evaluar el cumplimiento de cada operador con respecto a los planes de operación comprometidos (Beltrán et al., 2013; Muñoz et al., 2014).

Los servicios de buses tienden a ser inestables al estar insertos en un contexto urbano dinámico, con demandas y tiempos de viaje inciertos y variables en el tiempo e influenciados por los efectos del resto de los modos de transporte en la infraestructura vial. Para este fin, la simulación de tráfico representa uno de los enfoques más utilizados dentro de la evaluación de sistemas de transporte y su

análisis. Esto se debe a que tiene la capacidad de emular la temporalidad en los fenómenos del tráfico recogiendo correctamente la complejidad que los caracteriza. Además, una evaluación del sistema de transporte público permite analizar mejoras futuras en la operación y mejorar los indicadores de calidad del servicio, al permitir encontrar soluciones a problemas de tráfico, tales como la congestión o la seguridad de tráfico.

Los modelos de simulación de tráfico de un solo nivel de detalle han sido ampliamente usados en la decisión de políticas de transporte. Sin embargo, estos enfoques presentan limitaciones en casos de estudios muy extensos, al ser impracticable la calibración de simuladores microscópicos, o simuladores macroscópicos poco útiles en zonas que requieren modelar la complejidad del fenómeno de tráfico. Así, existe un interés para desarrollar modelos híbridos combinando aspectos microscópicos y de alguna escala mayor: el principal es adaptar la representación del tráfico al nivel de detalle conveniente según el fenómeno a modelar. De igual forma, fenómenos con interacciones complejas, como paraderos de transporte público e incidentes en pistas, pese a ser locales, pueden tener consecuencias en la red global, siendo más acertada una modelación detallada para su representación. De esta forma, zonas con comportamientos homogéneos pueden ser simplificados a modelos de menor granularidad y más sencillos computacionalmente.

El principal objetivo de esta trabajo es el desarrollo de un nuevo simulador de tráfico híbrido mesoscópico - microscópico, que permita analizar las ventajas y limitaciones que se generan en simuladores de un solo nivel, con el fin de proponer futuros usos del modelo para la evaluación del sistema de transporte público. El modelo híbrido propuesto está constituido por un servidor TCP comunicando en tiempo real ambos simuladores. Para el presente trabajo se propone un simulador mesoscópico basado en un cell transmission model implementado en Simio, mientras que como simulador microscópico se utiliza Paramics.

2. Literatura

2.1. Cell Transmission Model

El *modelo de transmisión de celdas* (CTM) (Daganzo, 1994, 1995) es una representación de las ecuaciones diferenciales del modelo hidrodinámico derivado por Lighthill-Whitham-Richards (LWR), describiendo la dinámica del tráfico mediante una discretización espacial y temporal. En el modelo cada arco de la red se representa como un conjunto de celdas de menor tamaño por el que circula un flujo homogéneo con iguales valores de velocidad a flujo libre, densidad y capacidad. Al ser una representación física de colas permite seguir de forma precisa su comportamiento espacial, la propagación del tráfico y sus fenómenos derivados, como la congestión y shockwaves, además pese a asumir una relación lineal entre flujo y densidad, captura a nivel de arcos fenómenos no lineales entre tiempo de viaje - densidad.

Debido a su baja complejidad computacional, este enfoque ha sido ampliamente utilizado, desarrollándose distintas extensiones y modificaciones para la evaluación de políticas de transporte, como por ejemplo modelos de asignación de tráfico dinámico (Ziliaskopoulos, 2000), coordinación de semáforos (Almasri y Friedrich, 2005), control de velocidad variables (Hadiuzzaman y Qiu, 2013), planes de evacuaciones ante emergencias (Xie et al., 2010), entre otros usos.

Una de las mayores limitaciones del modelo CTM original es que no hace distinción entre modos, simplificando todos los vehículos a un vehículos equivalentes homogéneos con iguales características físicas, comportamientos y relaciones flujo-densidad. Sin embargo, esta restricción ignora las interacciones entre distintos tipos de vehículos y simplifica fenómenos de tráfico para ciertos vehículos, generando imprecisiones y modelos poco realistas. En este sentido, Lebacque et al. (1998) modelan de forma sencilla la interacción entre buses y flujo adyacente siguiendo el modelo de LWR. Pese a considerar únicamente el efecto de un único bus, incorpora la ocupación del bus, y reducción de capacidad para el resto de tráfico debido a la presencia del bus.

Posterior a este trabajo, se han formulado diversos *modelos CTM* para tráfico heterogéneo. Tuerprasert y Aswakul (2010) proponen el *multiclass cell transmission model (M-CTM)* permitiendo incorporar clases de vehículos de distintos largos y velocidades de flujo libre. La diferencia en el avance de cada clase de vehículo se modela por medio de una división de cada celda en dos subceldas *inicio* y *final*,

de esta forma los vehículos con menores velocidades pueden mantenerse en la misma celda entre saltos de tiempos. Pese a modelar un flujo heterogéneo, la interacción entre modos se considera de forma simplificada.

Trabajos posteriores, como Mesa-Arango y Ukkusuri (2014) y Liu et al. (2015) presentan modelos CTM bi-modos, donde al compartir infraestructura el vehículo más lento son representados como cuellos de botella en movimiento, modificando dinámicamente la capacidad y flujo de vehículos, y siendo capaces de bloquear y afectar al resto del tráfico por la presencia de estos.

En estos modelos se definen factores de equivalencias entre clases de vehículos que pueden producir inconsistencias en la transmisión del flujo de los vehículos lentos al obtener flujos fraccionales entre celda. Por esta razón, Islam y Hajbabaie (2021) plantea el modelo *Enhanced Multi-Class CTM Signal Control*, manteniendo un seguimiento de cada bus de la red, junto a calcular su posición y velocidad para cada salto de tiempo. La velocidad del bus se determina considerando el espacio disponible de la celda en que se encuentra el bus.

2.2. Microsimulador de tráfico Paramics

Durante la ejecución del simulador resulta imprescindible conocer en tiempo real la transmisión de información desde el nivel microscópico al resto de la integración, y viceversa. Este manejo de datos se puede realizar a partir de la comunicación entre el software y los componentes externos vía una API (*application programming interface*). El desarrollo de una conexión mediante API permite al modelador desarrollar funciones no integradas por defecto en la operación del sistema dentro del simulador. Esto es particularmente necesario al querer describir la operación de transporte público, ya que la mayor parte de simuladores comerciales están orientados en la modelación de vehículos de tráfico privado. Cortés et al. (2005) presentan la modelación en PARAMICS de dos sistemas de transporte distintos. Fernandez et al. (2010) desarrollan para la ciudad de Santiago la API MISTRANSIT usando el software PARAMICS con el fin modelar las operaciones de tránsito y estudiar la implementación de políticas de transporte enfocadas en la operación de transporte público. Esta aplicación cuenta con tres avances principales: (1) los buses de transporte público incluyen nuevas características (2) se definen individualmente los pasajeros como entidades independientes (3) se describe explícitamente la interacción entre vehículos y pasajeros en las paradas de bus. Posteriormente, la investigación en torno a esta API se continua en (Martin, 2014) aplicando el modelo a políticas de operación de un corredor genérico de transporte público con el fin de optimizar la velocidad comercial, el flujo de buses y los tiempos de espera.

2.3. Integraciones híbridas

A partir del modo en que se relacionan las distintas partes del sistema, el mecanismo de intercambio de datos y la arquitectura del sistema, los sistemas de simulación de tráfico híbridos pueden dividirse en dos categorías: sincrónico u *online* y asincrónico u *offline* (Li et al., 2015).

En los modelos sincrónicos cada submodelo representa zonas distintas de la red a modelar, cubriendo en conjunto el total de la red por únicamente un simulador. Las zonas clave se simulan con un alto nivel de detalle, con modelos de seguimiento vehicular y cambio de pista, mientras que en el resto de la red se utilizan modelos de tráfico agregados para lograr una mayor eficiencia y velocidad de simulación. Los mayores desafíos para estos simuladores corresponde a cumplir la continuidad de las condiciones del sistema en tiempo real: asegurar la consistencia a lo largo de la red, la coherencia de las elecciones de ruta de los vehículos entre simuladores, la coherencia de la dinámica del tráfico en los límites y la coherencia en velocidades y rendimiento del tráfico entre los simuladores.

Los modelos basados en agentes determinan el movimiento de cada vehículo individualmente a partir de las variables discretas de cada vehículo: posición, velocidad, headway entre vehículos, etc, mientras que para definir el movimiento los modelos continuos utilizan variables continuas como la densidad o flujo, las que describen el estado de un grupo de vehículos. Por esta razón se hace necesario compatibilizar la corriente de flujo en las interfaces de los simuladores. La corriente de tráfico continuo requiere una densidad y velocidad de entrada, mientras que una simulación discreta precisa información de cada vehículo que ingresa, como su posición o velocidad.

Esta situación hace de los modelos de simulación híbridos y su técnica para compatibilizar el comportamiento entre bordes un tópico interesante de investigación y no del todo resuelto. En esta línea, Sewall et al. (2011) proponen para la interfaz microscópica un algoritmo de inicialización vehicular discreta dada la densidad en el borde y una distribución Poisson de llegadas. En esta transición es necesario además tener en cuenta que a nivel macroscópico se trabaja con partículas y no con vehículos con dimensiones Lesort et al. (2005).

Los modelos asincrónicos ejecutan de forma iterativa los distintos simuladores. El simulador menos preciso considera la totalidad de la red a simular, mientras que la red microscópica considera únicamente las zonas de interés. La interacción entre ambos simuladores se utiliza progresivamente con el fin de actualizar los parámetros o situación de la red. Cuando el simulador macroscópico (mesoscópico) se ejecuta durante un tiempo se pausa y se ejecuta el simulador microscópico a partir de los datos generados en el simulador macroscópico (mesoscópico). Después de ejecutar por un tiempo el simulador microscópico, se re-ejecuta el simulador macroscópico con la información microsimulada, repitiendo el proceso. Existen varios casos en la literatura de integraciones asincrónicas por ejemplo PARAMICS y DYNASMART (Jayakrishnan et al., 2001), ESTRAUS y AIMSUM (Siegel y Coeymans, 2005), DTALite y PTV VISSIM (Li et al., 2015), CUBE y AIMSUM. (Zitzow et al., 2015)

2.3.1. Integraciones híbridas sincrónicas.

En Bourrel y Lesort (2003) se presenta un modelo híbrido sincrónico combinando una representación de flujo y una vehicular, ambos basados en el modelo de Lighthill-Whitham-Richards (LWR) (Lighthill y Whitham, 1955; Richards, 1956)]. La modelación microscópica se implementa un modelo de velocidad óptima, desarrollado por Newell, basado en un comportamiento derivado de LWR, donde la velocidad de cada vehículo está determinada según el espaciamiento entre vehículos. Para la modelación macroscópica se utiliza el modelo STRADA, modelo discretizado en celdas del modelo LWR.

Para realizar el acoplamiento entre modelos de tráfico se define en cada borde celdas de transición donde ambos submodelos coexisten (Figura 1). A esta zona se trasladan las condiciones de bordes en ambos sentidos: en la dirección en que la corriente vehicular cruza desde el simulador macroscópico al microscópico se generan vehículos distribuidos uniformemente según el flujo de vehículos que llega. Para la generación se tiene en cuenta un espaciamiento mínimo calculado con respecto al último vehículo generado. Por otro lado, considerando el caso de los vehículos que va desde la representación microscópica a macroscópica, el vehículo que se encuentra próximo a abandonar la zona discreta no cuenta con un vehículo predecesor que influya su comportamiento y velocidad. Para solucionar esto, proponen incluir vehículos fantasmas en el tramo macroscópico correspondiente al último vehículo que entra a esta zona, con una velocidad definida según las condiciones de flujos continuos. La densidad a la entrada del modelo macroscópico se calcula en base a la definición de densidad, como vehículos dentro de una vía de largo L , utilizando como tramo la celda de transmisión.

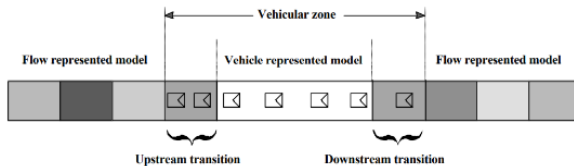


Figura 1: Posición celdas de transmisión en las interfaces. (Fuente: Bourrel y Lesort, 2003).

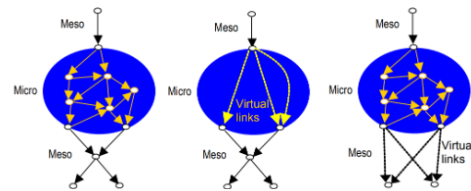


Figura 2: Representación de la red completa y por simulador con la inclusión de arcos virtuales (Fuente: Burghout et al., 2005)

Similar a este trabajo, Ma et al. (2011) desarrollan una integración sincrónica del modelo macroscópico LWR junto al simulador microscópico de seguimiento vehicular PTV VISSIM. Para determinar los parámetros en los límites de cada submodelo, y asegurar las consistencia a lo largo de la red, se considera en sentido macroscópico a microscópico que en condiciones estacionarias la velocidad del

vehículo viene dada por las condiciones globales $V = Q/K$. Para determinar las condiciones de entrada al simulador macroscópico, la densidad se puede definir a partir del espaciamiento s_i entre dos vehículos como $k_i = 1/s_i$. Al igual que [Bourel y Lesort \(2003\)](#), las aplicaciones no son con datos de tráfico reales, sino únicamente para vías teóricas, con el fin de estudiar la transmisión de shockwaves a lo largo de la calle.

El modelo integrado propuesto por [Burghout et al. \(2005\)](#) corresponde a una de las integraciones de mayor interés. Este trabajo presenta una integración sincrónica meso-microscópica (MiMe), implementada utilizando el mesosimulador Mezzo, simulador de tráfico basado en colas y MITSIMLAB como simulador microscópico. Esta integración híbrida está principalmente enfocada en estudiar los problemas de consistencia que se generan en estos modelos: (1) consistencia en elección de rutas y representación de la red, (2) consistencia de la dinámica de tráfico en los bordes y (3) consistencia del rendimiento del tráfico en cada submodelo. La red total de estudio se divide en zonas simuladas a nivel mesoscópica o microscópica según el detalle deseado. Esto genera en cada submodelo zonas inconexas a simular bajo un mismo nivel de detalle, no siendo posible determinar directamente una asignación de tráfico en las redes de cada programa. Con el fin de solucionar esto, se agregan arcos virtuales uniendo los segmentos mesoscópicos (microscópicos) representando estos arcos los segmentos simulados en el otro programa. Los tiempos de viaje en los arcos virtuales son determinados a partir de los arcos originales en el otro simulador. Esta consideración permite formar en cada submodelo una red simplificada de la original dando la posibilidad de representar correctamente la elección de ruta de los vehículos en ambos niveles.

En la Figura 2 se ejemplifica el concepto de arcos virtuales. En el primer grafo se encuentra la red original, donde los segmentos se simulan microscópica o mesoscópicamente. El segundo grafo representa la red desde el simulador mesoscópico: el segmento microscópico es reemplazado por arcos virtuales que dan la continuidad a las dos zonas mesoscópicas circundantes. Finalmente el último grafo corresponde a la red microscópica, simplificando la zona mesoscópica a arcos virtuales que dan la conexión a próximos segmentos microscópicos.

Esta integración es evaluada para un caso real, donde la zona norte de la red se modela de forma mesoscópica y la parte sur con MITSIMLAB. El modelo se compara con datos reales, además de modelos construidos completamente en Mezzo y MITSIMLAB. Los resultados muestran que los flujos, densidad y velocidad se propaga correctamente en los bordes, además de ser consistentes las elecciones de ruta.

[Storani et al. \(2021\)](#) realizan una comparación de un modelo híbrido con simuladores únicamente microscópicos y macroscópicos. La integración híbrida desarrollada, contempla un Cell Transmission Model como modelo macroscópico, y un Cellular Automata microscópico. La comparación entre modelos considera el tiempo de viaje de los vehículos, largos máximos y promedios de colas y tiempos de ejecución para aplicaciones ficticias de redes con semáforos e intersecciones y tráfico homogéneo, estando principalmente enfocada la investigación en analizar la propagación de la cola formada. Concluyen que el ajuste de los indicadores del tráfico dependen en gran medida del nivel de congestión que se considera, mientras que el tiempo de ejecución del modelo híbrido se acerca bastante a las representaciones macroscópicas.

3. Bus-Discrete Cell Transmission Model

La clase de simuladores mesoscópicos reproduce interacciones con un detalle limitado si se compara a una simulación microscópica, donde se implementa el comportamiento individual de cada vehículo e interacciones entre vehículos, pero contiene representaciones más precisas en relación a un macrosimulador que modela de forma agregada mediante una corriente de flujos. Así en el nivel mesoscópico se definen las características necesarias a implementar que permita darle continuidad a la modelación microscópica de PARAMICS sin ser costoso computacionalmente.

Los buses comparten infraestructura en gran parte de las vías con el resto de vehículos, teniendo comportamiento distinto al resto, como velocidad y aceleración inferiores. Por otro lado, la finalidad de la investigación, corresponde a representar la operación del transporte público, siendo el resto del tráfico únicamente modelado con el fin de representar condiciones de tráfico y niveles de congestión consistente a las dinámicas de tráfico para los buses.

Bajo esta lógica se introduce el simulador es propuesto para representar de forma realista el movimiento de los buses en un contexto urbano con interacción de otros modos de transporte. La principal ventaja del modelo presentado es realizar una integración de dos modelos distintos: por una parte el tráfico mixto es descrito por las variables y condiciones del modelo CTM correspondiente a un simulador a saltos de tiempos fijos, mientras los buses son representados siguiendo una simulación basada en eventos.

3.1. Movimiento corriente de flujo privado

En la Tabla 1 se encuentra la notación y variables utilizadas.

Tabla 1: Variables		
Notación		
n_i^ζ	Ocupación de la celda i en el time-step ζ .	veh
y_{ij}^ζ	Número de vehículos viajando a la celda j desde i en el time-step ζ .	veh
S_i^ζ	Número máximo de vehículos que puede enviar la celda i en el time-step ζ .	veh
R_i^ζ	Número máximo de vehículos que puede recibir la celda i en el time-step ζ .	veh
ρ_i^ζ	Ajuste de capacidad en la celda i en el time-step ζ .	-
d_i^ζ	Demanda de vehículos en la celda $i \in C_F$ en el time-step ζ .	veh
α_m	Factor de ocupación de bus tipo m a vehículo equivalente.	veh/bus

La **influencia del bus sobre el resto del tráfico** se incorpora de dos formas: por un lado en la ecuación (1) en la capacidad disponible de la celda i se considera el espacio siendo utilizado por los buses en el time-step ζ ($\sum_m \alpha_m x_{mi}(t_\zeta)$). Por otro lado en las ecuaciones (1) y (2) se añade una disminución de la capacidad Q_i^ζ por la variable ρ_i^ζ , que representa la interacción dentro de la celda, afectando el número máximo de vehículos que pueden salir de la celda. Este valor es 1 si no existen buses en la celda, en caso contrario es necesario calcular un valor para el ajuste.

El parámetro ρ_i^ζ de cada celda se aproxima en base las ecuaciones propuestas por Laval (2006). Esta investigación fue desarrollada para la estimación de la reducción en la capacidad en vías compartidas con camiones, sin embargo, es válido en cualquier modelo en que coexisten dos clases de vehículos con velocidades distintas.

$$R_i^\zeta = \min \left\{ \rho_i^\zeta Q_i^\zeta; \frac{w}{v_f} \left(N_i^\zeta - n_i^\zeta - \sum_{m \in M} \alpha_m x_{mi}(t_\zeta) \right) \right\} \quad \forall i \in C \quad \forall \zeta \in \mathbb{Z} \quad (1)$$

$$S_i^\zeta = \min \left\{ n_i^\zeta; \rho_i^\zeta Q_i^\zeta \right\} \quad \forall i \in C \quad \forall \zeta \in \mathbb{Z} \quad (2)$$

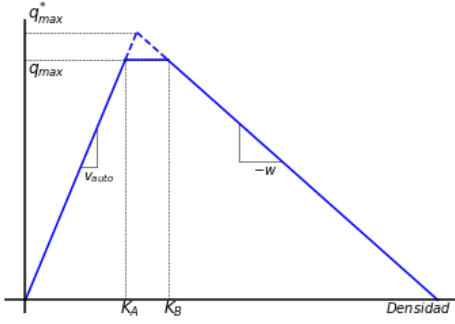
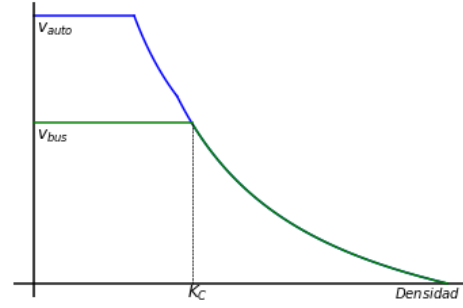
3.2. Movimiento de buses

La **influencia del resto del tráfico sobre el bus** se modela dentro de tres características de los buses: en la velocidad de avance del bus, imponiendo condiciones en el cambio de celda del bus y al equivaler la ocupación a una cola ficticia dentro de la celda.

Velocidad del bus

La velocidad del bus se define a partir de las condiciones de la celda i en que se encuentra. Siendo conocidos los parámetros del modelo fluidodinámico v_{auto} , w , q_{max} y k_{jam} , el modelo de celdas asume una relación entre flujo y densidad trapezoidal, según la Figura 3. Se define la velocidad del bus siguiendo un comportamiento análogo, Figura 4. Para niveles bajos de flujo ($q \leq q_{max}$) cada modo sigue una velocidad correspondiente a su velocidad de flujo libre. Debido a que la velocidad de flujo libre es menor en los buses con respecto al resto de tráfico, no disminuirán su velocidad a la misma densidad k_A que los autos, sino a una densidad $k_C \geq k_A$, en que se igualan la velocidad de la corriente con la del bus. Para densidades mayores a k_C ambos modos tendrán la misma velocidad.

k_C se define de distinta manera según la velocidad de flujo libre de los buses, ya que dependiendo de esta ambos modos igualan sus velocidades en el segundo o tercer tramo del trapecio, dado en la ecuación (3).

Figura 3: Relación $q(k)$.Figura 4: Relación $v(k)$.

$$\begin{aligned} k_B &= \frac{k_{jam} - \frac{q^{max}}{w}}{w} \\ k_C &= \begin{cases} \frac{q^{max}}{u_f} & \text{si } u_f \geq \frac{q^{max}}{k_B} \\ k_{jam} \frac{w}{w+u_f} & \text{si } u_f < \frac{q^{max}}{k_B} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

Se define N_{Ci} y N_{Bi} como la ocupación correspondiente a una densidad k_C y k_B respectivamente en la celda i . Así la velocidad del bus b en la celda i en el tiempo t se define según la ecuación (4).

$$\hat{v}_b(t) = \begin{cases} u_f & \text{si } n_i^{\zeta_t} + \sum_{m \in M} \alpha_m x_{mi}(t) \in [0, N_{Ci}] \\ \frac{L_i \cdot l_i \cdot q^{max}}{n_i^{\zeta_t} + \sum_{m \in M} \alpha_m x_{mi}(t)} & \text{si } n_i^{\zeta_t} + \sum_{m \in M} \alpha_m x_{mi}(t) \in (N_{Ci}, N_{Bi}] \quad \wedge \quad u_f \geq \frac{q^{max}}{k_{Bi}} \\ -w \left(1 - \frac{N_i}{n_i^{\zeta_t} + \sum_{m \in M} \alpha_m x_{mi}(t)} \right) & \text{si } n_i^{\zeta_t} + \sum_{m \in M} \alpha_m x_{mi}(t) \in (N_{Bi}, N_i] \quad \wedge \quad u_f \geq \frac{q^{max}}{k_{Bi}} \\ -w \left(1 - \frac{N_i}{n_i^{\zeta_t} + \sum_{m \in M} \alpha_m x_{mi}(t)} \right) & \text{si } n_i^{\zeta_t} + \sum_{m \in M} \alpha_m x_{mi}(t) \in (N_{Ci}, N] \quad \wedge \quad u_f < \frac{q^{max}}{k_{Bi}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\forall b \in B, \quad i \in C \quad \forall t \in T$$

Cambio de celda

Un bus b puede pasar de la celda i a la j en un tiempo t arbitrario si es que su posición llega hasta el final de la celda. La condición que se impone para realizar el cambio de celda, es que la celda j debe tener capacidad suficiente para recibir el bus, $R_j^{\zeta_t} \geq \alpha_m$. En caso contrario el bus queda en el límite en la celda i , suspendiendo su movimiento hasta que la celda j tenga capacidad para recibirlo. Esto implica que necesariamente en caso de que un bus este bloqueado para cruzar, permanecerá en la respectiva celda hasta un time-step ζ futuro.

Cola generada adelante del bus.

Dentro de la celda se restringe el movimiento a un punto máximo determinado por la ocupación de la celda. Para esto, se define la variable $dist_{ib}^{\zeta}$ correspondiente a la posición en que termina la cola generada por los vehículos adelante del bus b , $adel_{ib}(t)$. En caso de existir cola, el bus b puede desplazarse en la celda únicamente hasta el final de la cola ficticia, debiendo suspender su movimiento hasta que la cola se empiece a liberar. $adel_{ib}(t)$ se calcula al ingresar el bus a la celda, y en cada salto de tiempo. Cuando el bus b ingresa a la celda i en un tiempo t los $n_i^{\zeta_t}$ vehículos dentro de la celda se encuentran adelante, con lo que $adel_{ib}(t) = n_i^{\zeta_t}$. En cada time-step ζ se calcula el número de vehículos adelante del bus según la ecuación (5).

$$adel_{ib}(t_{\zeta+1}) = adel_{ib}(t_{\zeta}) - \sum_{j \in \Gamma(i)} y_{ij}^{\zeta} \quad \forall b \in B, \quad i \in C \quad \forall \zeta \in Z \quad (5)$$

Esta variable toma relevancia en los time-step en que se acumula flujo en la celda. La celda $i \in C$ acumula flujo en el time-step ζ si se cumple que $n_i^{\zeta} > \sum_{j \in \Gamma(i)} y_{ij}^{\zeta}$. En esta situación se calcula la posición máxima en la celda según la ecuación (6). Al llegar el bus a esta posición de la celda, pasa a

tener velocidad 0. En el próximo salto de tiempo se vuelve a calcular la distancia y en caso de poder continuar su movimiento, lo hace a velocidad $\hat{v}_b(t)$, según la ecuación (4).

$$dist_{ib}^\zeta = \frac{N_i^\zeta - adel_{ib}(t_\zeta)}{N_i^\zeta} L_i \quad \forall b \in B, \quad i \in C \quad \forall \zeta \in Z \quad (6)$$

3.3. Celdas de transferencia

Con el fin de integrar el modelo BD-CTM con un simulador microscópico, se consideran dos clases nuevas de celdas, las que se encuentran en contacto con el otro submodelo y que transfieren (reciben) el tráfico según su naturaleza. Por un lado C_T^S corresponden al conjunto de celdas de transferencias de tráfico desde el modelo BD-CTM al microscópico ó de salida y por otro C_T^E al conjunto de celdas que reciben vehículos del otro simulador ó de entrada.

Por las interfaces entre simuladores se compatibiliza el tráfico desde una representación vehicular con tiempo continuo a una de flujo a pasos de tiempo Δt (y viceversa), además a diferencia de las celdas sumideras las celdas de transferencias de salida pueden encontrarse bloqueadas dependiendo de la situación aguas abajo del borde, siendo necesario comunicar estas condiciones entre simuladores para propagar la situación del tráfico, y finalmente las celdas de transferencia de entrada deben comunicar su estado al otro simulador.

Celdas de transferencia de entrada

Para efectos del modelo de celdas la entrada de un vehículo de tráfico privado es representado por el contador $\bar{d}_i(t)$, el que aumenta en 1 con cada nueva llegada. En el time-step ζ , $\bar{d}_i(t_\zeta)$ corresponde al flujo de entrada en la celda $i \in C_T^E$. De esta forma el ingreso del tráfico a las celdas se realiza únicamente en los time-step. Por otro lado, el ingreso de buses tiene asociado una mayor cantidad de información relacionada al bus y servicio: tipo de bus, id, recorrido, ocupación, entre otros atributos. La entrada del bus se realiza instantáneamente en el tiempo t que se recibe el mensaje, sobre la celda de transferencia de entrada.

Se definen condiciones de bloqueo sobre la celda de entrada, lo que genera un aviso al microsimulador para pausar el ingreso de cualquier clase de vehículo. Para las celdas de transferencia de entrada es necesario redefinir R_i^ζ a tiempo continuo $R_i(t)$. Ya que los avisos y llegadas ocurren en tiempos discretos, es requerido conocer el estado de la celda en cualquier tiempo.

Teniendo en cuenta el flujo $R_i(t)$ que puede recibir la celda de entrada i , y los $\bar{d}_i(t)$ autos por entrar, se dirá que en el tiempo t aún se pueden recibir vehículos de tráfico si se cumple la restricción (7). En el caso de los buses, la restricción (8) considera tanto los vehículos que están por ingresar, como que el espacio requerido por buses es mayor:

$$R_i(t) - \bar{d}_i(t) \geq 1 \quad \forall i \in C_T^E \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$R_i(t) - \bar{d}_i(t) \geq \alpha_m \quad \forall i \in C_T^E \quad \forall t \in T \quad \forall m \in M \quad (8)$$

Las restricciones (7) y (8) no son excluyentes, ya que se relacionan a distinto tipo de vehículos que llegan a la interfaz. La restricción (7) además de significar que el contador de vehículos no supera la capacidad de entrada implica que al actualizar las variables del flujo cada time-step, no quedan vehículos entre simuladores por entrar. De esta forma, en cada time-step se reinicia $\bar{d}_i(t_\zeta)$ una vez se actualiza n_i^ζ .

Celdas de transferencia de salida

En el caso de las celdas de transferencia de salida existen dos variables importantes: por un lado el número de vehículos que salen de la celda $i \in C_T^E$, y por otro el tiempo entre envío de mensajes para comunicar la transferencia.

Si se considera una interfaz con condiciones de tráfico tal que no se bloquean los bordes, de la celda $i \in C_T^S$ salen S_i^ζ vehículos entre los time-steps ζ y $\zeta + 1$. Asumiendo que esta cantidad cruza uniformemente entre los tiempos t_ζ y $t_\zeta + \Delta t$ se pueden considerar tiempos entre salida de vehículos según la ecuación $\Delta t_{Vi}^\zeta = \frac{\Delta t}{S_i^\zeta}$. En cada salto de tiempo Δt_{Vi}^ζ se aumenta el contador $\bar{s}_i(t)$ y envía un aviso al simulador microscópico, así al final del time-step se cumple que $\bar{s}_i(t) = S_i^{\zeta t}$:

En el caso de que aguas abajo de la celda se encuentre bloqueada la vía, se recibe un aviso desde el otro simulador para suspender el envío de cualquier tipo de vehículos, el envío no se reanuda hasta recibir un nuevo mensaje de que se encuentra libre. Esta información externa se utiliza para definir la variable booleana $\bar{b}_i(t)$.

A partir de ambas consideraciones, en cada celda de transferencia de salida i la salida de vehículos se realiza de la siguiente forma: para el time-step $\zeta \in Z$ se definen tiempos entre salidas de tráfico $\Delta t_{V_i}^\zeta$ a partir del flujo máximo que se puede enviar. Entre t_ζ y $t_{\zeta+1}$ en cada intervalo $\Delta t_{V_i}^\zeta$ se revisa el estado del borde \bar{b}_i y en caso de no estar bloqueado se envía un aviso y se actualiza $\bar{s}_i(t)$.

Para los buses se conoce explícitamente el tiempo en que abandona la celda $i \in C_T^S$, siendo instantáneo el aviso de transferencia al simulador microscópico. En el caso de que la interfaz se encuentre bloqueada, $\bar{b}_i(t) = 1$, el bus no abandona la celda hasta que se libere.

Considerando las diferencias de comportamiento en las celdas de transferencia de entrada y salida con respecto a las celdas de la sección anterior, la ocupación de vehículos de tráfico para estas celdas viene dado por:

$$n_i^\zeta = \begin{cases} n_i^{\zeta-1} + \bar{d}_i(t_\zeta) - \sum_{j \in \Gamma(i)} y_{ij}^{\zeta-1} & \forall i \in C_T^E \quad \forall \zeta \in \mathbb{Z} \\ n_i^{\zeta-1} + \sum_{k \in \Gamma^{-1}(i)} y_{ki}^{\zeta-1} - \bar{s}_i(t_\zeta) & \forall i \in C_T^S \quad \forall \zeta \in \mathbb{Z} \end{cases} \quad (9)$$

4. Arquitectura de Integración Híbrida

El simulador mesoscópico es implementado en Simio, un simulador de eventos discretos basado en objetos, software con escasos antecedentes en la simulación de tráfico en la literatura. Simio permite a partir de procesos representar la lógica detrás del modelo, en que coexisten eventos discretos y continuos. Una de las principales ventajas en la implementación realizada corresponde al entorno gráfico incluido en Simio, donde se representan directamente los buses y su avance a lo largo de las celdas.

Entre ambos programas es necesario establecer un puente de comunicación para la interacción entre modelos e intercambio de información de los simuladores. En ese sentido al contar ambos programas con APIs en distintos lenguajes de programación (en el caso de Simio la API está en C#, Paramics en C++) se levanta un servidor encargado de crear las conexiones siguiendo un protocolo de control de transmisión (TCP), utilizando IP de Host común entre ambas plugin. Se consideran tres puertos comunes: un puerto en sentido microscópico - mesoscópico, un segundo en sentido mesoscópico - microscópico, y un tercero bidireccional utilizado cuando un bus llega a una parada de transporte público.

Para representar la red, cada tramo se modela bajo un único nivel de simulación, ya sea microscópico o mesoscópico. Así en cada nivel se definen una serie de subredes independientes e inconexas según la segmentación escogida. La topología original de la red viene dada al unir todos los subtramos de ambos simuladores. La extensión de cada subred puede ser arbitrariamente pequeño o grande según el caso, abarcando desde una intersección o un eje completo, considerando la necesidad de la simulación.

Por un lado, el nivel mesoscópico representa un esqueleto de la red original, rodeando y dando continuidad a los segmentos simulados microscópicamente. los que permiten analizar de forma más precisa los puntos definidos como críticos. Como cada tramo de la red se simula únicamente con un enfoque, y cada subred está rodeado por zonas simuladas desde el otro simulador, el marco propuesto debe centrarse en asegurar la consistencia del tráfico entre las interfaces.

La generación de vehículos en la red solo ocurre en las celdas fuentes del simulador mesoscópico, a partir de un vector de viajes de tráfico privado en cada corte temporal para la generación de demanda (\vec{d}_i), dando dinámica a lo largo de la simulación.

De la misma forma, los buses son generados dentro del modelo mesoscópico en la celda en que se encuentra el cabezal del recorrido. La generación puede ser a partir de horarios fijos de salida o a partir de una distribución para los tiempos entre despachos.

Considerando que el ingreso de vehículos a Paramics se realiza en los tiempos determinados en el mesosimulador, se decide modelar los vehículos de tráfico privado a partir del template de buses de transporte público incluido en Paramics. Se añade el tipo de vehículo *Tráfico* con características

y atributos correspondientes a un automóvil representativo, pero ingresando a la red en un paradero cabezal y siguiendo una ruta fija.

Por otro lado, un mismo recorrido de buses puede ingresar a segmentos en Paramics en más de una ocasión dependiendo de la red representada. Así para realizar el ingreso de un vehículo a la red de Paramics es necesario conocer tres parámetros: el nodo de salida del simulador mesoscópico, su nodo de regreso al simulador y el recorrido o ruta que sigue.

En la Figura 5 se esquematiza un ejemplo para un recorrido. En este caso para el servicio original 507 se definen dos subrecorridos distintos según el nodo en que ingresa. Para efectos de la simulación en Paramics los recorridos $507.n_1.n_2$ y $507.n_3.n_4$ son independientes, sin embargo se utilizan identificadores comunes para los vehículos para recuperar la información de cada vehículo una vez terminada la simulación.

De forma similar para el tráfico privado se definen y enumeran todas las rutas a utilizar (Figura 6). En este ejemplo desde el nodo n_1 se consideran tres rutas (R1, R2 y R3) y desde el nodo n_2 una única ruta. Desde el punto de vista del simulador mesoscópico al transferir un automóvil este selecciona la ruta que seguirá. En caso de existir más de una ruta desde un nodo de entrada se asigna un peso para cada ruta, valor que pueden ser modificados a lo largo de la simulación. Ya que fuera del simulador microscópico el tráfico privado se define como un flujo, no existe un seguimiento entre las rutas seguidas en zonas microscópicas distintas.

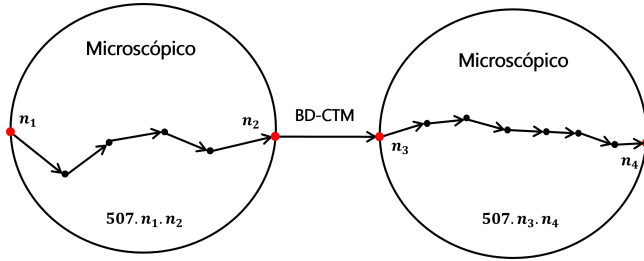


Figura 5: Subrecorridos.

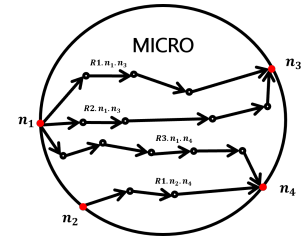


Figura 6: Subrutas.

En las interfaces además de realizarse la agregación y desagregación del flujo, se debe traspasar las condiciones de la red al otro lado de los límites en ambos sentidos.

Cuando un vehículo llega al simulador microscópico desde el mesoscópico requiere contar con condiciones de entrada consistentes con la situación del tráfico actual: velocidad de entrada, pista y ruta dentro de la subzona. En el caso del tráfico privado la entrada del vehículo se realiza por defecto en la pista de más a la izquierda, imponiendo instantáneamente un cambio de pista en caso de que hayan menos vehículos en otra pista del arco de entrada. Por otro lado, la entrada del bus es en la pista derecha, sin considerar un cambio de pista de entrada.

Las velocidades de entrada para ambos modos se considera igual a su velocidad de flujo libre respectiva, siendo ajustada posteriormente por PARAMICS en caso de niveles altos de flujo. Finalmente la ruta de los buses viene definida según el recorrido correspondiente, mientras que en el caso del tráfico se define la ruta a seguir a partir de las ya dibujadas.

En la red mesoscópica no se modela de independientemente cada pista ni de forma discreta los vehículos de tráfico, con lo que la llegada de vehículos particulares se realiza según lo definido en la sección anterior. Con lo que, al cruzar un bus al simulador mesoscópico únicamente es necesario determinar su velocidad de entrada y ruta. La velocidad de entrada corresponde a la determinada por la ecuación (4) según las condiciones de la celda de entrada, mientras que la ruta viene determinada por el servicio al que corresponde.

Junto a determinar las variables de entrada ya mencionadas al momento del cruce de los vehículos se almacena la información propia del vehículo, utilizada durante la simulación y como output de la ejecución. En el caso de los buses esta información contiene el id del vehículo, que se mantiene a lo largo de toda la red, recorrido y horas de paso por nodos de control.

Para el tráfico, al no ser representado explícitamente en el modelo mesoscópico, se genera únicamente información dentro de cada zona microsimulada, sin almacenar las trayectorias seguidas por los

vehículos.

Otro aspecto fundamental a tener en cuenta en los límites entre simuladores corresponde a la representación del bloqueo y la formación-disipación de la cola generada a lo largo de la interfaz. Para cada arco de entrada y salida de PARAMICS se define una variable *bool* representando el estado del borde. La condición de bloqueo en el arco de salida es determinada por las condiciones en la celda de transferencia de entrada respectivo del simulador mesoscópico, mientras que un bloqueo en un arco de inicio de PARAMICS es transmitido al modelo de celdas para pausar la transferencia de vehículos.

En las ecuaciones (7) y (8) se plantean condiciones en que la celda de transferencia de entrada del modelo de celdas se bloquea. Al ocurrir esto, se genera el aviso desde el simulador mesoscópico para actualizar la variable *bool* en el arco de salida respectivo de PARAMICS, pausando el envío de vehículos. Una vez la celda de entrada puede volver a recibir vehículos se genera un nuevo aviso hacia el microsimulador para reanudar la transferencia de vehículos. Esto puede ocurrir tanto en el time-step ζ al actualizar la ocupación de la celda como en un tiempo t al abandonar un bus la celda de entrada.

Para definir un bloqueo en el arco de entrada de Paramics, se define una distancia límite en el arco en que se encuentra el cabezal de entrada de los vehículos, comparándose en cada unidad de tiempo la distancia del último vehículo del arco con este valor para determinar una saturación dentro del arco. Por otro lado, desde el mesosimulador se realiza cada un segundo la consulta del estado de cada arco de entrada de Paramics actualizando la variable de bloqueo de la celda de salida.

La sincronización entre los programas es fundamental dentro del framework para evitar que un modelo avance más rápido que el otro. Durante la simulación, ambos modelos se encuentran constantemente enviando y recibiendo información de vehículos y pasajeros con sus respectivos tiempo.

Cada programa cuenta con su propio reloj, el que puede configurar la velocidad del avance del tiempo durante la simulación. En los vehículos y pasajeros para unificar y compatibilizar los tiempos de cada simulador se define un *tiempo ajustado* entre un punto de control y el tiempo de ingreso a la subred por medio de las diferencias de tiempos en el reloj propio. Estos puntos de control son utilizados para registrar el tiempo de paso de los vehículos al cruzar una interfaz, llegar a un paradero o pasar por un nodos específicos.

Así se utiliza el reloj del simulador mesoscópico como referencia, tanto para cálculo de tiempo de los agentes como las horas de generación de vehículos y pasajeros, mientras que el reloj de PARAMICS es utilizado para el cálculo de tiempos relativos al estar los vehículos dentro de ese simulador.

5. Evaluación

Con el fin de analizar el rendimiento y ahondar en la eficiencia y limitaciones dentro del modelo híbrido y framework desarrollado se propone en este trabajo una evaluación con respecto a datos de laboratorio generados en PARAMICS, permitiendo encontrar posibles brechas en el rendimiento entre simuladores.

Los parámetros utilizados en el modelo mesoscópico para la ejecución híbrida corresponden a los calibrados en Ulloa (2023), mientras que las condiciones del simulador microscópico para ambos casos se utiliza la configuración por defecto de PARAMICS. Por otro lado se consideran dos tipos de vehículos, *Auto* y *Bus*, donde los *autos* tienen un largo de 4 metros y velocidad máxima de 50 km/hr, y *buses* de 12 metros de largo y 35 km/hr de velocidad máxima.

Uno de los escenarios más interesantes por analizar corresponde al rendimiento en casos de congestión de las interfaces. En un caso ideal de simulación híbrida se esperaría que tanto las condiciones de los vehículos (como su velocidad) como las de la de red (formación y disipación de colas) no se vean alterados por la influencia en el cambio de simulador.

Para analizar el comportamiento del simulador en situaciones de congestión se propone la red de la Figura 7. Esta consiste en una vía unidireccional de dos pistas de $1,54[km]$ de largo, dividida en 11 arcos de largos entre 70 y 350 [m]. Por la red los vehículos ingresan en el arco 1 y salen de la red al final del arco 11 con llegadas distribuidas exponencialmente a partir de una demanda de $1440[veh/hr]$.

Se consideran dos casos de estudios considerando en ambos casos un escenario microscópico y uno híbrido. En el primer caso de estudio se busca estudiar el tráfico a través de la interfaz en sentido micro a mesoscópico. Para esto se modela la red de forma híbrida donde únicamente los arcos 4, 5 y

6 se simulan microscópicamente, mientras el resto de arcos se modelan en el simulador mesoscópico BD-CTM.

En el modelo BD-CTM se consideran celdas de largo $l = 70[m]$ y $\Delta t = 5[seg]$, estando la red compuesta por 8 celdas en la subred previa a la zona microscópica, y 7 celdas aguas abajo de esta. Durante el horizonte de simulación se genera un incidente que bloquea el avance de todo el tráfico desde el arco 9 al 10 durante $5[min]$.

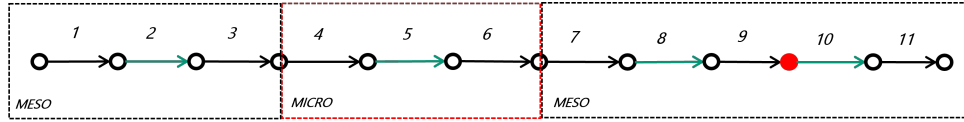


Figura 7: Red propuesta incidente en zona mesoscópica.

Como indicadores del estado del sistema, y para analizar la transmisión de la corriente del tráfico se definen cuatro secciones de estudio a lo largo la red (arcos 2, 5, 9 y 10 de la red). Cada sección es coincidente entre escenarios, en el caso del modelo híbrido puede corresponder a una celda del modelo de celdas o un tramo de la vía microscópica, de esta forma tres de cuatro de las secciones se encuentran simuladas microscópicamente. Estas secciones son utilizadas para comparar la ocupación a lo largo del horizonte de simulación, por otro lado también se compara el número de vehículos que llegan al final del tramo.

Durante la simulación se introduce un incidente entre los arcos 9 y 10, generando una cola de vehículos y posterior liberación de esta. Para este caso de estudio, en la Figura 8 se muestra el número acumulado de vehículos que han salido de la red a lo largo de la simulación, mientras que en la Figura 9 se presentan el número de vehículos que se observa en las cuatro secciones elegidas,

Analizando los gráficos, se observan impactos prácticamente iguales en ambos escenarios al momento de producirse el incidente, aumentando el tráfico en las secciones 2 y 3 en tiempos y en magnitudes iguales. Al momento de disiparse la cola generada, siguen comportamientos similares, liberándose completamente en tiempos iguales. Además se observa cercano a los 20:00 minutos de simulación se vuelve a presentar una pequeña congestión, la cual se observa a través de las secciones 4, 3 y 2, pero no es replicado en el modelo híbrido. Por otro lado, el impacto del incidente no alcanza a influir en la sección 1, manteniéndose la ocupación constante en toda la simulación y presentando ambos modelos pequeñas oscilaciones.

Considerando la salida de los vehículos de la red, se observa que al momento de la liberación de la cola, el flujo de vehículos en el simulador híbrido ocurre en menor tiempo que el simulador microscópico, lo que también se observa en los tiempos en que ocurre la disminución de la ocupación en la sección 2 (Figura 7). Pese a esta diferencia, se observa que al regularizarse el tráfico, y volver a una situación de flujo ininterrumpido el comportamiento entre simuladores es similar.

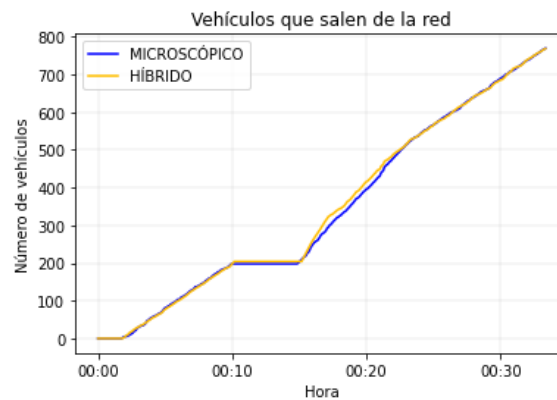


Figura 8: Llegadas acumuladas.

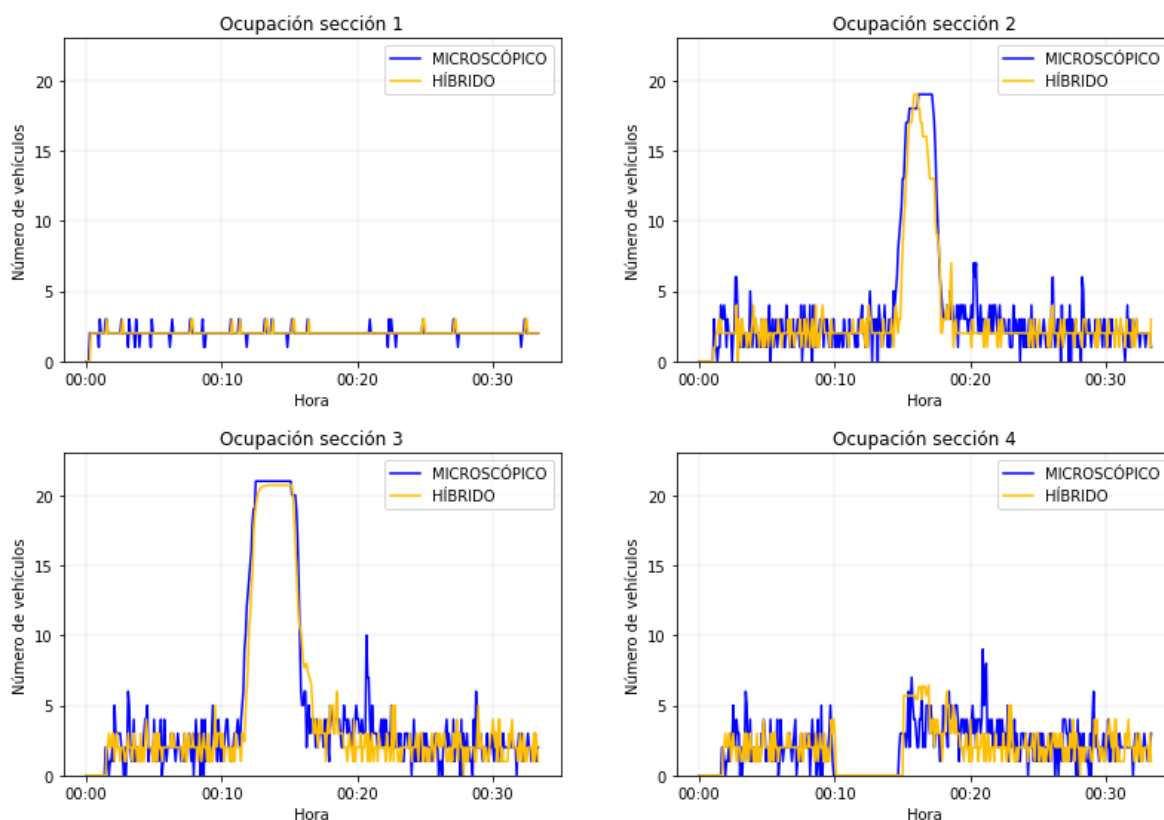


Figura 9: Nivel de ocupación de distintas secciones de la red para ambos simuladores

En la Tabla 2 se encuentran los valores correspondiente a la bondad de ajuste root-mean-square error (RMSE) de cada indicador considerado para este caso de estudio. Con respecto a las ocupaciones, se observa que el ajuste empeora a medida que se avanza en la red, siendo el ajuste de la última sección analizada tres veces peor que el de la primera, lo que se explica en la estocasticidad y dinámica propia del tráfico. Por otro lado, en el caso de las llegadas del tráfico, se observa un error de un orden bajo para la variable analizada, lo que confirma los comentarios anteriores.

Tabla 2: RMSE bloqueo en red mesoscópica

Variable	RMSE [veh]
Llegada de tráfico	8.718
Ocupación Sección 1	0.342
Ocupación Sección 2	1.674
Ocupación Sección 3	1.69
Ocupación Sección 4	1.55

6. Conclusiones e investigación futura

Se ha desarrollado un simulador híbrido que combina modelos mesoscópicos y microscópicos para representar el movimiento de buses, pasajeros y automóviles en dos niveles de detalle, permitiendo ajustarse de mejor forma a los requisitos de análisis que varían entre zonas de una misma red. El buen desempeño del modelo y su ajuste a la simulación microscópica permite justificar futuras investigaciones del simulador híbrido para nuevos casos de estudio, ampliando el análisis a situaciones de tráfico reales.

Una de las mayores limitaciones evidenciadas corresponden a la sincronización temporal entre simuladores, producto de usar relojes independientes en cada programa. A pesar de que se obtiene consistencia en las trayectorias de los vehículos y tiempos a lo largo de la red, en los casos en que la velocidad de avance del tiempo es muy dispar entre simulador las condiciones del tráfico que se generan no son consistentes con la situación que se modela.

Esto puede ser solucionado desarrollando la plataforma de implementación del simulador mesoscópico, lo que permitiría un mayor control del avance del reloj del simulador y un mejor ajuste con el reloj de Paramics.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte de los proyectos ANID/FONDECYT/REGULAR 1191200 y del Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería ANID PIA/PUENTE AFB220003.

Referencias

- E. Almasri y B. Friedrich. Online offset optimisation in urban networks based on cell transmission model. **ITS Hanover**, 2005.
- P. Beltrán, A. Gschwender, y C. Palma. The impact of compliance measures on the operation of a bus system: The case of Transantiago. **Research in Transportation Economics**, 39(1):79–89, 2013.
- E. Bourrel y J.-B. Lesort. Mixing microscopic and macroscopic representations of traffic flow: Hybrid model based on Lighthill–Whitham–Richards theory. **Transportation Research Record**, 1852(1):193–200, 2003.
- W. Burghout, H. N. Koutsopoulos, y I. Andreasson. Hybrid mesoscopic–microscopic traffic simulation. **Transportation Research Record**, 1934(1):218–225, 2005.
- C. E. Cortés, L. Pagès, y R. Jayakrishnan. Microsimulation of flexible transit system designs in realistic urban networks. **Transportation Research Record**, 1923(1):153–163, 2005.
- C. F. Daganzo. The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. **Transportation Research Part B: Methodological**, 28(4):269–287, 1994.
- C. F. Daganzo. The cell transmission model, part II: network traffic. **Transportation Research Part B: Methodological**, 29(2):79–93, 1995.
- R. Fernandez, C. E. Cortes, y V. Burgos. Microscopic simulation of transit operations: policy studies with the MISTRANSIT application programming interface. **Transportation Planning and Technology**, 33(2):157–176, 2010.
- M. Hadiuzzaman y T. Z. Qiu. Cell transmission model based variable speed limit control for freeways. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 40(1):46–56, 2013.
- S. Islam y A. Hajbabaie. An enhanced cell transmission model for multi-class signal control. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, 23(8):11215–11226, 2021. doi: 10.1109/TITS.2021.3101838.
- R. Jayakrishnan, J.-S. Oh, y A.-E.-K. Sahraoui. Calibration and path dynamics issues in microscopic simulation for advanced traffic management and information systems. **Transportation Research Record**, 1771(1):9–17, 2001.
- J. A. Laval. Stochastic processes of moving bottlenecks: Approximate formulas for highway capacity. **Transportation Research Record**, 1988(1):86–91, 2006.

- J.-P. Lebacque, J.-B. Lesort, y F. Giorgi. Introducing buses into first-order macroscopic traffic flow models. **Transportation Research Record**, 1644(1):70–79, 1998.
- J.-B. Lesort, E. Bourrel, y V. Henn. Various scales for traffic flow representation: some reflections. In **Traffic and Granular Flow'03**, pages 125–139. Springer, 2005.
- P. Li, P. Mirchandani, y X. Zhou. Hierarchical multiresolution traffic simulator for metropolitan areas: architecture, challenges, and solutions. **Transportation Research Record**, 2497(1):63–72, 2015.
- M. J. Lighthill y G. B. Whitham. On kinematic waves II. a theory of traffic flow on long crowded roads. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, 229(1178):317–345, 1955.
- H. Liu, J. Wang, K. Wijayarathna, V. V. Dixit, y S. T. Waller. Integrating the bus vehicle class into the cell transmission model. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, 16(5):2620–2630, 2015.
- J. Ma, J. Sun, K. Li, y L. Zhang. A study on multi-resolution scheme of macroscopic-microscopic traffic simulation model. In **2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)**, pages 1421–1426. IEEE, 2011.
- A. C. J. M. Martin. Análisis comparativo de diseños para un corredor de transporte público usando microsimulación. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/115453>, 2014. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/115453>.
- R. Mesa-Arango y S. V. Ukkusuri. Modeling the car-truck interaction in a system-optimal dynamic traffic assignment model. **Journal of Intelligent Transportation Systems**, 18(4):327–338, 2014.
- J. C. Muñoz, M. Batarce, y D. Hidalgo. Transantiago, five years after its launch. **Research in Transportation Economics**, 48:184–193, 2014.
- P. I. Richards. Shock waves on the highway. **Operations research**, 4(1):42–51, 1956.
- J. Sewall, D. Wilkie, y M. C. Lin. Interactive hybrid simulation of large-scale traffic. In **Proceedings of the 2011 SIGGRAPH Asia Conference**, pages 1–12, 2011.
- J. Siegel y J. E. Coeymans. An integrated framework for traffic analysis combining macroscopic and microscopic models. **Transportation Planning and Technology**, 28(2):135–148, 2005.
- F. Storani, R. Di Pace, F. Bruno, y C. Fiori. Analysis and comparison of traffic flow models: a new hybrid traffic flow model vs benchmark models. **European Transport Research Review**, 13(1): 1–16, 2021.
- K. Tuerprasert y C. Aswakul. Multiclass cell transmission model for heterogeneous mobility in general topology of road network. **Journal of Intelligent Transportation Systems**, 14(2):68–82, 2010.
- B. Ulloa. Marco de integración meso-microscópica enfocada en la simulación de buses de transporte público, 2023.
- C. Xie, D.-Y. Lin, y S. T. Waller. A dynamic evacuation network optimization problem with lane reversal and crossing elimination strategies. **Transportation research part E: logistics and transportation review**, 46(3):295–316, 2010.
- A. K. Ziliaskopoulos. A linear programming model for the single destination system optimum dynamic traffic assignment problem. **Transportation science**, 34(1):37–49, 2000.
- S. Zitzow, D. Lehrke, y J. Hourdos. Developing a large-scale hybrid simulation model: Lessons learned. **Transportation Research Record**, 2491(1):107–116, 2015.