

Representación Macroscópica de la Operación Segregada del Transporte Público de Superficie

Alejandra Valencia V.
Escuela de Ingeniería de Transporte, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Av. Brasil 2147, Valparaíso, Chile
Fax: +56-32-218 854
E-mail: alejandra.valencia@ucv.cl

Rodrigo Fernández A.
Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes
Av. San Carlos de Apoquindo 2200, Las Condes, Santiago, Chile
Fax: +56-2-214 1752
E-mail: rfa@uandes.cl

RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo de simulación macroscópica que emula la operación de un corredor de transporte público de superficie con el suficiente detalle como para considerar todas las fuentes de demoras que afectan a los vehículos, tales como tiempo de recorrido en arcos, demoras en semáforos y demoras en paraderos. Los vehículos pueden ser tranvías, buses guiados, articulados o convencionales operando sobre una vía segregada del resto del tráfico. La metodología se basa en enfoques actuales de la teoría de tráfico que describen dichas fuentes de demora. Además se ha incorporando el espaciamiento óptimo de paraderos en el análisis. El modelo entrega índices de rendimiento que permiten evaluar estrategias de operación y diseño físico de corredores de transporte público de superficie a través de variables como la velocidad comercial, demoras y colas en cada uno de sus elementos. Las pruebas realizadas con el modelo han probado su efectividad sobre modelos analíticos simplificados y microsimuladores de tráfico usados de manera tradicional.

Palabras clave: simulación macroscópica, transporte público, vías segregadas, buses.

ABSTRACT

This paper presents a macroscopic simulation model of a public transport corridor. Vehicles may be trams, guided, articulated or conventional buses operating on a busway segregated from the rest of the traffic. The model considers all sources of delays, such as journey time between stops and junctions as well as the time spent at traffic signals and stops. Well-known models from the traffic theory were used for calculating such delays. A function for computing the optimum stop spacing on the corridor has been also incorporated. Outputs of the model are commercial speed, delays and queues at each physical component of the corridor. This will allow the user to evaluate operational and physical design scenarios. Tests with the model have shown its advantages over both simplified analytical models and conventional traffic microsimulators.

Keywords: macroscopic simulation, public transport, busways, buses.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos que tratan el transporte público de superficie son modelos que optimizan las frecuencias y el número de vehículos en circulación, los cuales definen como función objetivo el costo de operadores y usuarios en el sistema. Una buena revisión de

éstos es aportada por Gschwender (2000). Fernández et al (2003), por su parte, proponen un modelo heurístico para diseñar la red de transporte público de Santiago. El inconveniente de estos modelos, al tratar de usarlos para el diseño físico y gestión de la infraestructura, es que no incorporan con suficiente detalle las interacciones entre entidades físicas al interior del sistema (v.g., intersecciones y paraderos). Otro enfoque son modelos que tratan el tema como un problema de optimización de redes. Sin embargo, debido a la gran combinación de variables y datos en sus análisis se deben hacer simplificaciones que benefician más su capacidad analítica que el diseño de infraestructura; un ejemplo es el trabajo de Cominetti y Correa (2001). Una excepción es el trabajo de Lindau (1983), quien desarrolló un modelo de simulación microscópico para probar la implementación de pistas “sólo bus” y operaciones en convoy en Brasil. Lamentablemente, la modelación que hace de los paraderos de buses es simplificada.

Por otra parte, se han desarrollado modelos de operación detallada de operaciones en paraderos. Existen dos referencias en la literatura, IRENE (Gibson et al, 1989) y PASSION (Fernández, 2001), que junto con la interacción con los otros elementos de un corredor de transporte público de superficie (TPS) puede afectar su velocidad comercial (Fernández y Valenzuela, 2003). Se ha demostrado que los paraderos y semáforos definen la capacidad de un sistema de TPS.

Ortúzar y Willumsen (1990) definen corredores como “instalaciones de transporte importantes que pueden combinar vías de alta capacidad y arterias de limitado acceso, en conjunto con trenes ligeros o vías exclusivas para buses”. Señalan que estos corredores de transporte son básicamente lineales y que modelarlos bajo esta perspectiva es suficiente para estudiar sus principales características.

En tal contexto este trabajo presenta un modelo de simulación macroscópica, pero que emula la operación de un corredor de transporte público de superficie con el suficiente detalle como para considerar todas las fuentes de demoras que afectan a los vehículos, tales como tiempo de recorrido en arcos, demoras en semáforos y demoras en paraderos. Los vehículos pueden ser tranvías, buses guiados, articulados o convencionales operando sobre una vía segregada del resto del tráfico.

En el siguiente capítulo se especifican las funciones y relaciones constituyentes del modelo desarrollado. El Capítulo 3 describe algunos experimentos y resultados. Finalmente, se hacen comentarios sobre el trabajo realizado.

2. ESPECIFICACIÓN DE UN MODELO DE CORREDOR DE TPS

El modelo es formulado desde una perspectiva macroscópica. Está compuesto por un corredor segregado del resto del tráfico por el cual circulan vehículos de transporte público (tranvías, buses guiados, articulados o convencionales). La progresión de vehículos de transporte público en el corredor considera el tiempo de viaje que se compone de un tiempo en movimiento, un tiempo consumido en intersecciones semaforizadas y un tiempo gastado en las operaciones en paraderos. Esta especificación da origen a tres modelos: modelo de arco, modelo de intersecciones y modelo de paraderos.

2.1 Modelo de Arco

El comportamiento de los vehículos de transporte público en los arcos se describe a través del tiempo en movimiento en el arco k (t_{Mk}) considerando el largo del tramo (L_k) del corredor y una velocidad V_r en movimiento en los tramos, asumida no afectada por intersecciones o paraderos y constante en todo el corredor. Luego:

$$t_{Mk} = \frac{L_k}{V_r} \quad (1)$$

2.2 Modelo de Intersecciones

Las intersecciones son modeladas con funciones tradicionales de demora uniforme y excedente, a través de la siguiente relación.

$$N_{0k} = \frac{Q_k t}{4} \left[(x_k - 1) + \sqrt{(x_k - 1)^2 + \frac{12(x_k - x_{0k})}{Q_k t}} \right]; \quad x_k \geq x_{0k} = 0.67 + \frac{S_k v_{ek}}{600} \quad (4)$$

Donde x_k es el grado de saturación de la intersección k ; x_{0k} es el grado de saturación a partir del cual el efecto excedente comienza a ser relevante; v_{ek} es el verde efectivo de la intersección k ; y t es la duración del periodo de simulación.

La componente del tiempo medio perdido por aceleración y frenado (l_{ik}) de la ecuación (2) se describe como:

$$l_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_r}{a} + \frac{V_r}{f} \right) \quad (5)$$

Donde a y f son las tasa de aceleración y frenado de los buses, respectivamente [m/s^2].

Por último las detenciones en intersecciones (h_{ik}) de la ecuación (2) esta determinada por:

$$h_{ik} = \left(\frac{1 - u_k}{1 - y_k} \right) + \left(\frac{N_{0k}}{q_k C_k} \right) \quad (6)$$

2.3 Modelo de Paraderos

Gibson et al (1989) determinó que la demora media total en paraderos (d_p) ésta compuesta por: la demora por transferencia de pasajeros (d_p) la cual depende del tiempo detenido por pasajero (t_p) y el tiempo perdido por aceleración y frenado (t_f),

$$d_{ik} = (\delta_{ik} + l_{ik}) h_{ik} \quad (2)$$

Donde d_{ik} es la demora total de buses en intersección k [s]; δ_{ik} es la demora por vehículo detenido en la intersección k ; l_{ik} es el tiempo medio perdido por aceleración y frenado en la intersección k ; y h_{ik} es el número medio de detenciones por vehículo en la intersección k . Las demoras producidas por vehículo detenido en intersecciones (δ_{ik}) se producen principalmente por la programación de semáforos que puede explicarse mediante la teoría de tráfico tradicional con la siguiente expresión (Akçelik, 1981)

$$\delta_{ik} = \frac{C_k (1 - u_k)^2}{2(1 - y_k)} + \frac{N_{0k}}{Q_k} \quad (3)$$

Donde C_k es el tiempo de ciclo del semáforo de la intersección k [s]; u_k la razón de verde efectivo de la intersección k [s]; $y_k = q_k / S_k$ la razón de flujos para el movimiento, siendo q_k el flujo de buses [bus/h] y S_k el flujo de saturación de la pista de buses [bus/h]. Además, Q_k es la capacidad de la intersección k [bus/h] y N_{0k} la cola excedente en la intersección k [bus]. Para esta última se usa la expresión:

las demoras por esperas internas (d_e) y las demoras en cola (d_q), como lo señala la siguiente ecuación:

$$d_p = d_p + d_e + d_q \quad (7)$$

Los paraderos son modelados a través de funciones que relacionan su capacidad con sus principales índices de rendimiento, calibradas mediante el programa de microsimulación de paraderos IRENE (Fernández et al 2000; Jorquera, 2002). Así:

$$d_p = a + bT_s + cT_b + dT_s T_b \quad (8)$$

Donde T_s y T_b son tasa de subida y bajada de pasajeros, respectivamente [pax/bus] y a, b, c, d son parámetros calibrados por Gálvez (2002).

$$d_e = (aT_s + bT_b + c)\delta_1 + (dT_s + e)\delta_2 \quad (9)$$

Donde a, b, c, d, e son parámetros calibrados por Jorquera (2002); y:

$$\delta_1 = \begin{cases} 1 & \text{si no hay salida por pista adyacente} \\ 0 & \text{si hay salida por pista adyacente} \end{cases}$$

$$\delta_2 = \begin{cases} 1 & \text{si hay semáforo aguas abajo a menos de 15 m del paradero} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

En el caso de las demoras en cola para distintos grados de saturación, esta especificación está dada para paraderos de 1 y 3 sitios por las siguientes ecuaciones. Para sitio único:

$$d_q^x = c_0^x + \sum_{i=1}^2 \delta_i c_i^x + (d_0^x + \sum_{i=1}^2 \delta_i d_i^x) Q \quad (10)$$

Donde d_q^x es la demora media en cola, para el grado de saturación x [s]; Q es la capacidad del paradero [bus/h]; c_i^x, d_i^x son parámetros a estimar; y δ_i son variables mudas (ver Jorquera, 2002)

Para el caso de paraderos de 3 sitios la formulación es la siguiente:

$$d_q^x = a_0^x + \sum_{i=1}^5 \delta_i a_i^x + (b_0^x + \sum_{i=1}^5 \delta_i b_i^x) Q \quad (11)$$

Donde d_q^x y Q mantienen las definición dada anteriormente, a_i^x y b_i^x son parámetros a estimar y δ_i son variables mudas (ver Jorquera, 2002). Luego, la capacidad del paradero esta dada por:

$$Q = (aT_b + b)Ln(T_s) + cT_b + d(1 - 0.1\delta) \quad (12)$$

Donde a, b, c, d son parámetros calibrados y:

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{si paradero es de 3 sitios y no formal} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

El espaciamiento óptimo entre paraderos se obtiene según la demanda en distintos tramos del corredor, usando el enfoque de Gibson y Fernández (1995) que minimiza los costos sociales de usuarios y operadores. Actualizando sus parámetros la expresión queda:

$$d^* = 43,8 \sqrt{\frac{\lambda \cdot q}{P_d} (149,2 + TO \cdot d_p)} \quad (13)$$

Donde d^* es el espaciamiento óptimo entre paraderos [m]; q es el flujo de buses por el corredor [bus/h]; λ es la proporción del flujo que se detiene en paraderos; P_d es la demanda de pasajeros que sube y baja en el tramo [pax/h-km]; TO es la tasa de ocupación media de los buses en el tramo [pax/bus]; y d_p es la demora promedio total en el paradero [s].

El modelo entrega índices de rendimiento del corredor, principalmente de las demoras y colas antes descritas en cada uno de sus elementos y la velocidad comercial del corredor (V_c) dada por:

$$V_c = \frac{L}{T_i} \quad (14)$$

En donde el tiempo total es una expresión derivada de la propuesta por Gibson et al (1989) que se muestra a continuación, la cual permite capturar los tiempos consumidos en tramos, las intersecciones y paraderos.

$$T_i = \sum_{k=1}^{NA} \frac{L_k}{V_r} + \sum_{k=1}^{NI} p_{lk} d_{lk} + \sum_{k=1}^{NP} p_{pk} (d_{pk} + d_{ek} + d_{qk}) \quad (15)$$

En la ecuación, NA, NI, NP son el número de tramos, intersecciones y paraderos en el corredor, respectivamente; d_{lk} es la demora media en cada intersección [s]; d_{pk}, d_{ek} y d_{qk} son respectivamente las demoras medias por transferencia de pasajeros, esperas internas y cola en cada paradero [s]; p_{lk} y p_{pk} son las proporciones de buses que se detiene en intersecciones y paraderos, respectivamente.

El modelo es un modelo de simulación de alternativas de operación exógenas. Es decir, permite observar qué pasa cuando se simulan distintos escenarios, como por ejemplo, tamaño y maniobrabilidad de los vehículos, programación de semáforos, o diseño de paraderos. El modelo está codificado en C++ y posee un menú de entrada de datos por pantalla como: largo del corredor, tasas de aceleración y frenado, flujo de saturación de la vía exclusiva, flujo de buses, velocidad en movimiento, tasas de ocupación de los buses, proporción de buses que se detienen en paraderos e intersecciones, densidad de pasajeros que suben y bajan en el tramo, parámetros de programación de semáforos, número de sitios de los paraderos, etc.

Realizados todos los cálculos de los modelos descritos anteriormente, se calcula el tiempo total en el corredor y se determinan sus índices de rendimiento. El proceso es descrito en la Figura 1 y un ejemplo de las salidas del programa se puede ver en la Figura 2. Para más detalles, el lector podrá remitirse a Valencia (2007).

3. EXPERIMENTOS CON EL MODELO

El siguiente análisis se realizó con datos medidos en la punta mañana en la calzada oriente de Av. Vicuña Mackenna entre Departamental y la Alameda en Santiago de Chile durante el año 2006. Aunque este tramo no operaba como vía segregada, se ha podido establecer los beneficios de varias estrategias de gestión sobre ese tramo, en el caso de operarse como tal. Para todos los experimentos que se describen, se consideraron las características que se indican en la Tabla 1. En las secciones siguientes se describen algunos de los experimentos y análisis realizados con el modelo.

El objetivo de estos experimentos es evaluar distintas estrategias de gestión y diseño físico de corredores de TPS. Por ejemplo, ¿En cuánto mejora la velocidad comercial si los paraderos se encuentran óptimamente espaciados? ¿Qué tan influyente es que los buses puedan adelantarse unos a otros en los paraderos? ¿Cuál es el efecto de diversas estrategias de programación de los semáforos?

TABLA 1: Características del Corredor

Variable	Valor
Largo (L)	7332 m
Velocidad en movimiento (V_r)	40 km/h
Número de intersecciones (NI)	36
Número de sitios de paraderos	3
Tasa de aceleración (a)	1,2 m/s ²
Tasa de frenado (f)	1,3 m/s ²
Flujo de saturación (S)	1000 bus/h
Tasa de ocupación de los buses (TO)	64 pax/bus
Proporción de buses que para en paraderos (p_p)	0,85

Fuente: Elaboración Propia

3.1 Velocidad Comercial con y sin Espaciamiento Óptimo de Paraderos

Primero se analizó el efecto sobre la velocidad comercial y demoras en el corredor al considerar un espaciamiento óptimo de paraderos, para distintos niveles de flujo de buses y densidad de pasajeros que suben y bajan en el tramo. La comparación se hizo respecto de la situación actual de ubicación de los paraderos, espaciados en promedio cada 320 metros. El espaciamiento óptimo resultó ser 670 metros. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

TABLA 2: Rendimiento del Corredor con y sin Efecto de Espaciamiento Óptimo de Paraderos

Flujo bus (bus/h)	Demora semáforos (s)		Demora paraderos (s)		Velocidad comercial (km/h)		ΔV_c (%)
	SEO	CEO	SEO	CEO	SEO	CEO	
50	74,3	74,3	504,2	300,2	21,4	25,6	+20
100	106,0	106,0	504,2	300,2	20,8	24,8	+19
200	171,5	171,5	625,9	505,9	18,2	19,8	+9

SEO: Sin espaciamiento óptimo, 23 paraderos; CEO: Con espaciamiento óptimo, 10 paraderos
Fuente: Elaboración Propia

Se pudo cuantificar que una política de espaciamiento óptimo de paraderos puede mejorar la velocidad comercial en rangos de un 9 a un 20%. Cabe destacar que en el escenario de espaciamiento óptimo se consideraron paraderos formalmente diseñados y operacionalmente ordenados para absorber el flujo de buses y la demanda de pasajeros.

3.2 Efecto de Paraderos con Pista de Adelantamiento

En este experimento se analizó el efecto que sobre el rendimiento de un corredor de TPS puede tener el hecho que los buses, una vez terminada su operación en paraderos, puedan adelantar a otros que aún están tomando o dejando pasajeros. Para ellos se consideró paraderos no afectados por intersecciones semaforizadas cercanas. Se varió el flujo de buses en el corredor, pero la demanda de pasajeros se mantiene constante. En la tabla 3 se presenta un resumen de nuestros resultados, donde FIFO (First-In-First-Out) significa que no se puede adelantar y FIAO (First-In-Any-Out) lo contrario.

Un análisis parecido, usando un modelo el modelo de microsimulación de tráfico GETRAM, fue realizado por Siegel et al (2003).

TABLA 3: Rendimiento del Corredor con y sin Posibilidad de Adelantar en Paraderos

Flujo bus (bus/h)	Demora paraderos (s)		Velocidad comercial (km/h)		ΔV_c (%)
	FIFO	FIAO	FIFO	FIAO	
50	732,6	634,2	18,0	19,3	+7
100	420,8	368,3	22,3	23,3	+5
200	381,0	352,8	21,8	22,3	+2

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla se observa que la posibilidad que los buses puedan adelantar en el paradero incrementaría entre un 3 y 7 % la velocidad comercial, lo cual podría mejorar aún más si los buses se detuvieran en los sitios más próximos a la salida del paradero.

Los resultados son similares a los encontrados por Siegel et al (2003). Sin embargo, sugieren una tendencia distinta: mientras mayor sea el flujo de buses, menor es la ganancia. La diferencia se debe a que dichos autores consideraron un tiempo de detención en paraderos constante e igual a 20 segundos por bus. Esta es una de las limitaciones de los microsimuladores de tráfico tradicionales: la demora en paraderos no depende de la demanda de pasajeros (ver Burgos, 2004). Por el contrario, en nuestro análisis el tiempo detenido en paraderos sí varía según la

demanda de pasajeros y toma valores promedio de entre 21 y 43 segundos por bus.

3.3 Efecto de la Programación de los Semáforos

Este experimento busca corroborar distintos enfoques que señalan que la programación de los semáforos afecta la capacidad, demora y velocidad comercial en corredores de TPS (Fernández, 1996; Fernández y Peñailillo, 2000). El análisis se hizo para distintas programaciones de semáforos (tiempo de ciclo y razón de verde efectivo, u) con un flujo de 150 bus/h y una misma demanda en el corredor. Los paraderos están aislados de la influencia de los semáforos y espaciados óptimamente. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

TABLA 4: Rendimiento del Corredor para Diferentes Programaciones de Semáforos

Tiempo ciclo (s)	Demora semáforos (s)		Velocidad comercial (km/h)		ΔV_c (%)
	$u = 0,4$	$u = 0,6$	$u = 0,4$	$u = 0,6$	
60	70,9	31,8	23,4	24,2	+3
90	91,8	38,0	22,9	24,1	+5
120	112,6	44,2	22,5	23,5	+5

Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que la programación de semáforos influye en la velocidad comercial. Es así como se podría esperar aumentos de hasta un 5% en la velocidad comercial si los semáforos se programan según lo establecido por Gibson y Fernández (1996). El espaciamiento óptimo y una programación de semáforos de ciclos cortos y una razón del verde efectivo (u) igual o mayor a 0,6 entregan mejores índices de rendimiento por la disminución de las demoras al transporte público.

Siegel et al (2003) hicieron un análisis parecido, pero sensibilizando sólo respecto al tiempo de ciclo. La tendencia es la misma, pero obtuvieron menores velocidades comerciales. Esto se debe a que no consideraron el cálculo del espaciamiento óptimo de paraderos como se hizo en este estudio; ellos consideraron paraderos espaciados cada 400 metros.

4. RESUMEN Y COMENTARIOS

En este trabajo se ha mostrado un modelo que representa macroscópicamente la progresión de vehículos de transporte público en un corredor de transporte público de superficie (TPS) incorporando todas las potenciales fuentes de demoras (travesía en arcos, demoras en intersecciones y en paraderos). El modelo entrega índices de rendimiento tales como la velocidad comercial en el corredor y demoras y colas en cada uno de sus elementos.

Los experimentos con el modelo han permitido mostrar los beneficios de algunas estrategias de gestión de tráfico sobre un corredor de TPS, más allá de la sola segregación entre buses y autos. La velocidad comercial (V_c) es uno de los principales indicadores para evaluar el rendimiento global de un sistema de transporte público, ya que con él se pueden valorar impactos relacionados tanto con el nivel de servicio a los usuarios (tiempo de espera del vehículo, tiempo de viaje en el vehículo) como con los costos de los operadores (frecuencias, tamaño de flota, personal, consumo de combustible). Luego, considerando este índice nuestros resultados indican que:

- paraderos óptimamente espaciados logran incrementar la V_c entre un 9 a 20%;
- la facilidad para adelantar en paraderos eleva V_c entre un 2 a 7% adicional; y
- semáforos que favorezcan al transporte público aumentan V_c en un 3 a 5% más.

En resumen, si a la segregación se incorporan esquemas de gestión de paraderos y de intersecciones, V_c podría acrecentarse entre 14 a 32%. El mayor crecimiento se logra para flujos moderados (50 bus/h), en tanto que el menor es para flujos altos (200 bus/h).

Respecto al valor absoluto de V_c , se constató que ésta toma valores entre 18 y 26 km/h para diferentes escenarios. Este último resultado indica que no sería correcto usar un mismo valor de V_c para modelar cualquier corredor de TPS. Mayores detalles sobre los resultados de la modelación pueden encontrarse en Valencia (2007).

La ventaja del modelo desarrollado, por sobre otras herramientas de modelación más sofisticadas (v.g., microsimulación), radica en la sencillez del enfoque y facilidad de aplicación para probar estrategias de gestión al transporte público en la calle. En este sentido, es un análisis intermedio entre modelos analíticos basados necesariamente en supuestos simplificados (e.g., curvas flujo-velocidad) y modelos de microsimulación que demandan gran cantidad de datos, parámetros y recursos computacionales. Es más, el enfoque pudo demostrar mayor riqueza de resultados comparado con un microsimulador de tráfico usado de forma tradicional.

En resumen, este trabajo entrega una herramienta que, aunque simple, no es simplista. La clave radica en combinar adecuadamente las representaciones de las componentes más importantes. El modelo permitiría a operadores y tomadores de decisión en el campo del transporte público evaluar y orientar políticas de mejoramiento de manera sencilla y rápida. Por ejemplo, la sola medida de hacer de Av. Vicuña Mackenna una calle exclusiva para buses en el tramo estudiado no mejora por sí sola el rendimiento del TPS por esa vía. Para su flujo actual (120 bus/h) V_c será menor a los 20 km/h. Es bien sabido que si V_c está bajo los 20 km/h, la circulación de los buses debe ser apoyada por otras medidas de prioridad (ver Fernández, 1999; Fernández y Valenzuela, 2003).

AGRADECIMIENTOS

Este artículo y su exposición han sido posibles gracias al apoyo de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y al financiamiento del proyecto ICIV-002-07 de la Universidad de los Andes (Santiago, Chile).

REFERENCIAS

- Akçelik, R. (1981) Traffic signals – capacity and timing analysis. **Australian Road Research Board Ltd. Research Report 123**, Fifth Reprint, 1993.
- Burgos, V. (2004). **Revisión de la incorporación del transporte público en modelos microscópicos de tráfico**. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Cominetti, R. and Correa, J. (2001). Common-lines and passenger assignment in congested transit networks. **Transportation Science 35(3)**.
- Fernández, R. (1999). Medidas de prioridad al transporte público. **Actas del IX Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**. Santiago, 419-429.
- Fernández, R (1996). Análisis Ex post de la operación de la vía exclusiva para buses de Av. Grecia. **Informe final Comisión de Planificación de Inversiones en Infraestructura de Transporte**, Secretaria Ejecutiva, Santiago.
- Fernández, R. y R. Peñailillo (2000). Un modelo microscópico de interacción entre paraderos de buses urbanos. **Actas del XI Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte**, 235-248, Gramado.

Fernández, R., E. Valenzuela y T. Gálvez (2000). Incorporación de la capacidad y rendimiento de paraderos en el programa TRANSYT. **Actas del XI Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte**, 221-233, Gramado, Brasil

Fernández, R. (2001). **Modelling bus stop interactions**. PhD Thesis, University of London.

Fernández, R and E. Valenzuela (2003). A model to predict bus commercial speed. **Traffic Engineering and Control 44(2)**, 67-71.

Fernández, J., De Cea, J. Norambuena, I. (2003). Una metodología para el diseño topológico de sistemas de transporte público urbano de pasajeros. **Actas del XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, 219-231, Santiago.

Gálvez, T. (2000). **Incorporación explícita de la modelación de paraderos de buses en programas de simulación de tráfico**. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Chile.

Gibson, J., I. Baeza and L.G. Willumsen (1989). Bus-stops, congestion and congested bus-stops. **Traffic Engineering and Control 30(6)**, 291-302.

Gibson, J. y R. Fernández (1996). Efecto de una intersección semaforizada aguas abajo sobre la capacidad de un paradero de buses con sitios múltiples. **Apuntes de Ingeniería 19(4)**, 31-40.

Gibson, J. y R. Fernández (1995). Recomendaciones para el diseño de paraderos de buses de alta capacidad. **Apuntes de Ingeniería 18(1)**, 35-50.

Gschwender, A. (2000). **Caracterización microeconómica de la operación del transporte público urbano: Un análisis crítico**. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil y al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, mención transporte. Universidad de Chile.

Jorquera C. (2002) **Funciones de demora en paraderos de buses**. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

Lindau, L. A. (1983). **High-flow bus operation on urban arterial roads**. PhD Thesis, University of Southampton.

Siegel, J., A. Gschwender y L. de Grange (2003). Uso de un microsimulador de tráfico para la representación de corredores segregados de buses. **Actas del XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, Santiago, 1-13.

Valencia, A. (2007). **Modelo para planificación, operación y diseño físico de corredores de transporte público de superficie**. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Transporte, Universidad de Chile (no publicada).

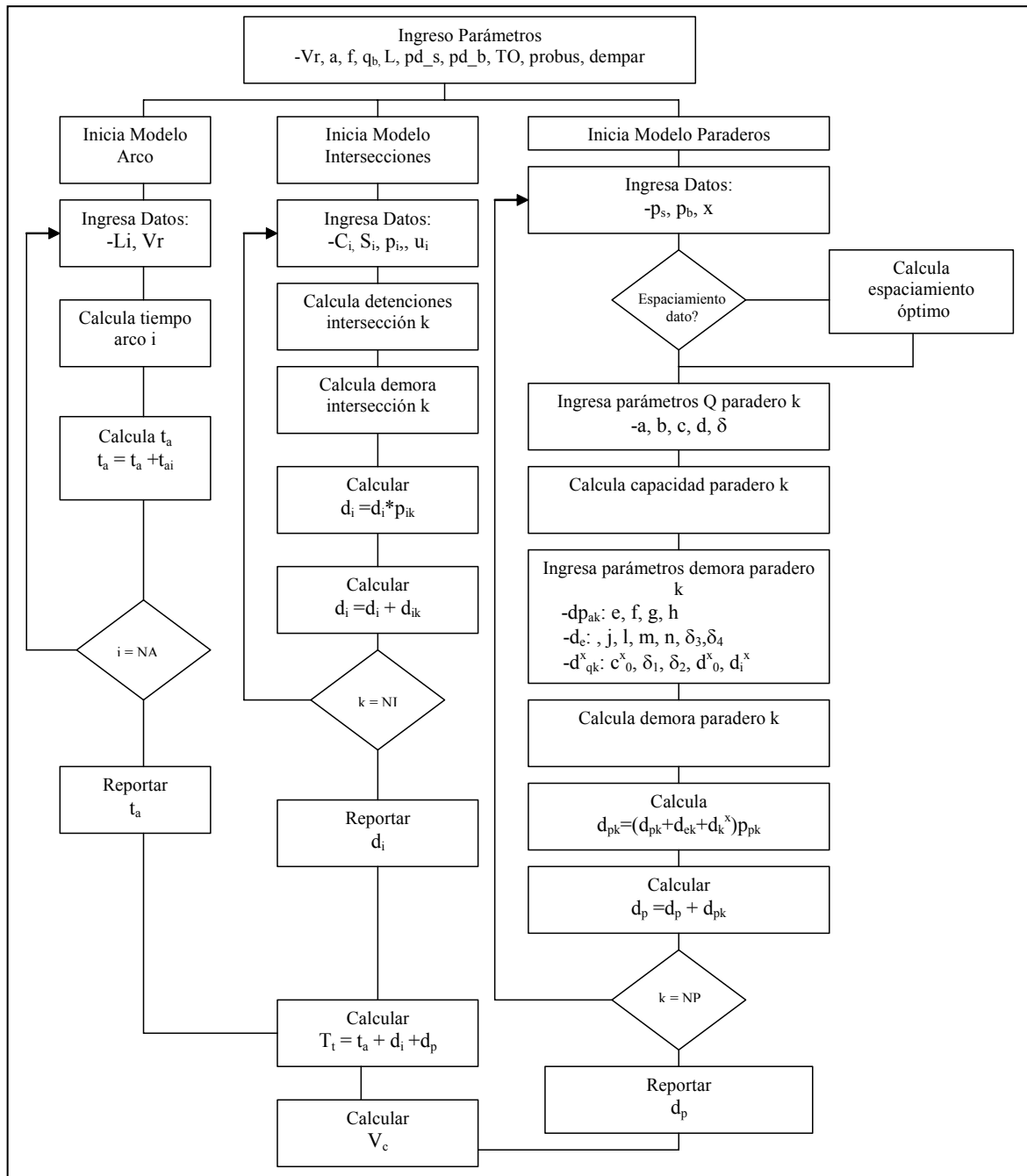


FIGURA 1: Diagrama de Flujo del Modelo de Corredor de TPS

Fuente: Elaboración Propia

Escenario 1: q=200 bus/h salida: FIAO, aislado, espaciamiento optimo
 Dda calculada con q=50bus/h

Resultados Generales

Velocidad Comercial :27.3188 km/h
 Tiempo de Viaje Total :966.194 segundos
 Flujo Buses Corredor :200 bus/h
 Flujo Buses que para en paradero :170 bus/h
 Flujo de saturación :1000 bus/h
 Densidad de Subida Corredor :877 pax/h-km
 Densidad de Bajada Corredor :3430pax/h-km
 Tasa de ocupación buses :64pax/bus
 Tasa de aceleración :1.2m/s²
 Tasa de frenado :1.3m/s²
 Longitud Corredor :7332 metros
 Numero de intersecciones :36
 Numero de Paraderos :5
 Numero de Tramos :73
 Demora en tramos :657 segundos
 Demora Intersecciones :171.522 segundos
 Demora Paraderos :137.672 segundos

Espaciamiento Optimo Calculado :1352.19 metros
 Espaciamiento Optimo Chequeado :1014.97 metros
 Espaciamiento Opt. Calc. Aprox. :1350 metros
 Espaciamiento Opt. Cheq. Aprox. :1010 metros
 Diferencia Espaciamento :340 metros

Resultados Parciales

Intersección	Demora Semáforo (seg.)	Tasa de Detención	Demora Total (seg.)	Grado saturación	Porcentaje de buses que paran
1	13.0208	0.520833	11.4187	34.2857	0.2
2	20.0208	0.645833	18.6801	41.3793	0.2
3	12.5052	0.510417	10.9272	33.8028	0.2
4	13.0208	0.520833	11.4187	34.2857	0.2
5	5.00521	0.322917	4.49124	26.9663	0.2
6	16	0.666667	16.6021	42.8571	0.2
7	21.0069	0.763889	22.848	51.4286	0.2
8	18.7778	0.722222	19.9918	47.3684	0.2
9	16.6736	0.680556	17.4064	43.9024	0.2
10	9	0.5	8.95157	33.3333	0.2
11	6.25	0.416667	6.31381	30	0.2
12	4	0.333333	4.30104	27.2727	0.2

FIGURA 2: Ejemplo de Salida Modelo de Corredor de TPS

Fuente: Elaboración Propia