

Consolidación de Modelos de Tiempo de Servicio de Pasajeros para Transantiago

Cristóbal Ogaz S. y Rodrigo Fernández A.
Universidad de los Andes, Santiago-Chile
Tel: +56-2 4129321, Fax: +56-2 2141752
rfa@uandes.cl

Abril, 2011

Resumen

El tiempo de servicio de pasajeros (TSP) es el tiempo durante el cual un vehículo de transporte público está detenido transfiriendo pasajeros en una parada. Está compuesto de 3 elementos: el tiempo de subida de pasajeros, el tiempo de bajada de pasajeros y el tiempo muerto por detención. Los 2 primeros dependen del número de pasajeros que suben y bajan, respectivamente, y de la rapidez con que lo hacen. Ésta última está determinada, entre otros factores, por la forma de cobro de tarifa, las dimensiones de las puertas y la congestión dentro del vehículo y en el andén. Existen numerosos trabajos que estudian el impacto que tienen estos factores en los tiempos marginales de transbordo, sin embargo, pocos han tratado de entender cómo estos 3 elementos interactúan entre sí de forma desagregada. El objetivo de este trabajo es obtener un modelo de TSP que represente el comportamiento real de los usuarios y que pueda ser aplicado a cualquier tipo de vehículo.

Se propuso dos modelos desagregados de TSP para Transantiago: secuencial y simultáneo, que fueron calibrados con observaciones en terreno. Se encontró que el modelo simultáneo es más apropiado para buses, mientras que el secuencial se comporta mejor en trenes de metro. Se obtuvo resultados satisfactorios para los parámetros asociados a los pasajeros que suben y a los pasajeros que bajan, no así para el parámetro asociado a la ocupación del vehículo. Asimismo, los modelos desagregados mostraron un desempeño igual o mejor que modelos anteriores de Transantiago.

PALABRAS CLAVE: modelación, transporte público, tiempo de servicio de pasajeros
NÚMERO DE PALABRAS: 4.937

1. Introducción

El Tiempo de Servicio de Pasajeros, en adelante TSP, es un componente fundamental para determinar el desempeño y la calidad de servicio de un sistema de transporte público urbano. El Highway Capacity Manual (HCM) de Estados Unidos lo define como “*el tiempo en que una unidad de transporte público (vehículo o tren) permanece en una estación o parada, medido desde que se detiene hasta que comienza a moverse*” (TRB, 2000). El TSP depende de numerosas variables, entre las cuales se encuentra el número de pasajeros que suben y bajan, el tiempo de apertura y cierre de puertas, la tasa de ocupación del vehículo y la distribución y congestión de pasajeros en el andén o paradero.

En resumen, se puede decir que el TSP está compuesto básicamente de 3 elementos: un término en función del número de pasajeros que suben al vehículo (P_s); otro en función a los pasajeros que bajan (P_b); y una constante que representa los tiempos muertos (D), como apertura y cierre de puertas. Si consideramos una relación lineal de primer orden entre estas variables, el TSP se puede expresar como:

$$TSP = t_s \cdot P_s + t_b \cdot P_b + D \quad (1)$$

Donde t_s y t_b representan el tiempo marginal de subida y bajada por pasajero, respectivamente. Esta forma funcional es ampliamente utilizada en el mundo, incluyendo las especificaciones del HCM de 1985 y 2000. Sin embargo, este modelo resulta ser demasiado simplista pues los tiempos marginales de transbordo dependen de varios factores, como la tasa de ocupación del vehículo y la congestión en el andén. Es por esto que estudios más recientes los han considerado como funciones de otras variables explicativas:

$$\begin{aligned} TSP &= f(\star) \cdot P_s + g(\star) \cdot P_b + D \\ \star &= \text{tasa ocupación, congestión andén, etc} \end{aligned} \quad (2)$$

Las funciones f y g corresponden a los tiempos marginales de transbordo y pueden ser no lineales. Finalmente, para incluir las variables físicas en estos modelos, se suele representar las distintas situaciones por separado para luego combinarlas en una sola expresión que prediga el TSP total del vehículo. Por ejemplo, cuando el vehículo tiene más de una puerta, el tiempo de detención total estará dado por aquella puerta que tenga un TSP mayor:

$$TSP = \max \{TSP_1, \dots, TSP_i, \dots, TSP_n\} \quad (3)$$

Donde TSP_i corresponde al tiempo de servicio de pasajeros para la puerta i del vehículo con n puertas. Sin embargo, este método es poco práctico para el diseño de paraderos en donde confluyen numerosos tipos de buses, cada uno con su especificación de TSP distinta. El mismo problema genera la inclusión de otras características físicas u operacionales, como el ancho y alto de las puertas, o la forma de pago de tarifa. Estas son difíciles de representar sin recurrir a la segmentación, lo que provoca discontinuidad en los modelos.

Por otro lado, un modelo lineal como el que se ha presentado implica que los pasajeros que suben esperan a que descendan todos los pasajeros que bajan para abordar. Esto pocas veces es así pues se ha observado que la mayoría de las veces hay pasajeros que transbordan simultáneamente, especialmente cuando el vehículo no tiene puertas exclusivas para subir o bajar. Lo anterior genera que cuando se calibran los modelos, los valores obtenidos de t_s y t_b no representan necesariamente el tiempo unitario de subida y bajada, haciendo al TSP dependiente del tipo de vehículo y de la muestra. Para desagregar estas variables de las fórmulas y obtener así mejores ajustes, se debe examinar más exhaustivamente el comportamiento de los usuarios y proponer una forma funcional de acuerdo a eso. Un modelo obtenido a partir de este enfoque permitirá tener estimaciones más realistas de los TSP cuando no se disponga de observaciones para realizar una calibración y se deban utilizar parámetros estándar (como los que se podrían obtener en un laboratorio).

El objetivo de este trabajo es obtener un modelo desagregado del tipo de vehículo y de la muestra usada para calibrarlo, cuyas variables sean lo más independientes posible e incluyendo la tasa de ocupación como una variable continua. También se espera consolidar los modelos ya propuestos para Transantiago, de modo de obtener una o dos formas funcionales genéricas que puedan ser utilizadas tanto para el diseño de infraestructura como para el diseño de operación de los sistemas de transporte público de Santiago.

Esta investigación se fundamenta en las siguientes hipótesis, que se esperan validar o desechar a la luz de los resultados obtenidos:

1. El TSP depende de 3 variables independientes: el número de pasajeros que suben (P_s), el número de pasajeros que bajan (P_b) y la carga u ocupación del vehículo (L).
2. Un modelo desagregado obtendrá mejores resultados (mayor valor de R^2 en los ajustes) que un modelo agregado.

En este artículo se hará en primer lugar una revisión de los modelos de TSP usados en Chile y el resto del mundo, con especial énfasis en las últimas publicaciones sobre el tema. Luego se presentarán y estudiarán los elementos que componen el TSP. A continuación se propondrán y calibrarán formas funcionales para buses y metro de Santiago, para lo cual se cuenta con observaciones en paraderos y estaciones de transporte público. Finalmente se expondrán las conclusiones del presente estudio.

2. Revision bibliográfica

El modelo de TSP para buses publicado en el Highway Capacity Manual de Estados Unidos (TRB, 1985, 2000), es uno de los más conocidos y utilizados en el mundo. En éste se define el TSP como el tiempo requerido para el servicio de pasajeros por la puerta más solicitada durante los 15 minutos punta, más el tiempo ocupado en abrir y cerrar las puertas:

$$TSP = t_s \cdot P_s^* + t_b \cdot P_b^* + t_{oc}^* \quad (4)$$

donde,

- t_s = tiempo promedio de subida por pasajero (s/pax)
- P_s = número de pasajeros que suben al bus por la puerta más solicitada (pax)
- t_b = tiempo promedio de bajada por pasajero (s/pax)
- P_b^* = número de pasajeros que bajan del bus por la puerta más solicitada (pax)
- t_{oc}^* = tiempo de apertura y cierre de puertas de la puerta más solicitada (s)

Junto con el de Cundill & Watts (1973) y el del HCM (1985), el modelo desarrollado por Pretty & Russel (1988) es uno de los más antiguos que reporta la literatura, e intenta modelar el TSP considerando las subidas y bajadas de cada pasajero como eventos independientes:

$$TSP = D + \max \left\{ \sum_{j=1}^{P_s} (t_s^j) ; \sum_{i=1}^{P_b} (t_b^i) \right\} \quad (5)$$

donde,

- t_s^j = tiempo de subida del pasajero j (s)
- P_s = número total de pasajeros que suben al bus (pax)
- t_b^i = tiempo de bajada del pasajero i (s)
- P_b = número total de pasajeros que bajan del bus (pax)
- D = tiempo muerto por apertura y cierre de puertas (s)

Notar que, a diferencia del propuesto en el HCM, este modelo sí considera que las actividades de subida y bajada pueden ocurrir de forma simultánea. En esta misma línea, York (1993) actualizó los estudios previos realizados por Cundill & Watts (1973), proponiendo 2 nuevas formas funcionales para el TSP en buses de Londres y Exeter:

$$TSP = D_{(b+s)} + t_b \cdot P_b + \sum_{k=1}^m t_s^k \cdot P_s^k \quad (\text{buses de 1 puerta}) \quad (6)$$

$$TSP = \max \{ D_b + t_b \cdot P_b ; D_s + \sum_{k=1}^m t_s^k \cdot P_s^k \} \quad (\text{buses de 2 puertas}) \quad (7)$$

donde,

- P_s^k = número de pasajeros que suben usando la forma de pago k (pax)
- t_s^k = tiempo de subida por pasajero usando la forma de pago k (s/pax)
- $D_{(.)}$ = tiempo muerto por subida (s), bajada (b), o ambos (b+s) (s)
- m = cantidad de formas de pago de la tarifa

Lin & Wilson (1991) desarrollaron una serie de modelos para estimar el TSP en trenes urbanos incluyendo como variable el número de pasajeros de pie dentro del vehículo. Asumiendo que los pasajeros que suben

y bajan se distribuyen equitativamente por todas las puertas, analizaron 3 tipos de modelos lineales de los cuales el que presentó el mejor comportamiento fue el siguiente:

$$TSP = \beta_0 + \beta_1 \cdot P_s + \beta_2 \cdot P_b + \beta_3 \cdot (L_p^a \cdot P_s + L_p^l \cdot P_b) \quad (8)$$

donde,

$$\begin{aligned} L_p^a &= \text{número de pasajeros de pie con los que el tren llega (pax)} \\ L_p^l &= \text{número de pasajeros de pie con los que el tren parte (pax)} \\ \beta_0, \beta_1, \beta_2 \text{ y } \beta_3 &= \text{parámetros del modelo} \end{aligned}$$

Continuando con este trabajo, Puong (2000) presentó nuevas especificaciones para el TSP de trenes urbanos. De la ecuación 8 obtuvo el siguiente modelo:

$$TSP = \beta_0 + \beta_1 \cdot P_s + \beta_2 \cdot P_b + \beta_3 \cdot (L_p^t)^3 \cdot P_s \quad (9)$$

Donde el término L_p^t corresponde al número pasajeros de pie que llegan en el tren, pero que no bajan en la parada. Este modelo se ajusta mejor a los datos ($R^2 = 0,89$) y sus variables tienen una mayor significancia. Resultados similares obtuvieron Rajbhandari et al. (2004), quienes descubrieron que para altas tasas de ocupación ($L_p > 9$), un modelo de la forma de la ecuación 8 alcanza niveles de ajuste casi perfectos. Uno de los estudios más recientes e interesantes lo realizaron Jasiwal et al. (2008, 2009) con el objetivo de demostrar que la congestión de público en los paraderos con alto número abordajes afecta significativamente a los TSP de los buses. Identificaron 2 etapas en el proceso de subida: en la primera, denominada “interfase pasajero-bus” (*IF*), el pasajero y el bus interactúan a distancia; en la segunda el pasajero y el bus interactúan directamente y la denominan “interacción pasajero-bus” (*IA*). La interfase es más sensible a la congestión presente en el paradero y su duración corresponde a la duración de la interfase del primer pasajero que aborda al bus. Observaron que sólo afecta al TSP el tiempo que transcurre entre el momento en el que el bus se detiene hasta que llega el primer pasajero, llamado tiempo muerto (*LT*). Durante la etapa de interacción se produce la transferencia de pasajeros. Esta etapa se puede modelar de la siguiente forma:

$$IA = t_s \cdot P_s + t_b \cdot P_b \quad (10)$$

Sin embargo, las bajadas en los buses se producen generalmente por la puerta trasera o durante la interfase. Esto reduce la ecuación 10 a:

$$IA = t_s \cdot P_s \quad (11)$$

Finalmente, el estudio propone la siguiente forma funcional para calcular el TSP:

$$TSP = (IA) + (LT) + D \quad (12)$$

$$= t_s \cdot P_s + (LT) + D \quad (13)$$

En febrero de 2007 comenzó a operar en Santiago de Chile un nuevo sistema de transporte público llamado Transantiago, que rediseñó la red de líneas de buses compuesta por servicios troncales y alimentadores. Inspirado en el Transmilenio de Bogotá, el nuevo sistema introdujo una nueva forma de pago universal mediante tarjetas inteligentes sin contacto (TISC), que reemplazaron al pago directo al chofer. Además, reemplazó la antigua flota de buses convencionales de 10 y 12 metros: para servicios troncales, buses articulados de piso bajo de 18 metros de largo y 4 puertas, buses compactos de piso bajo de 12 metros y 3 puertas, y buses convencionales de 12 metros y 2 puertas; para servicios alimentadores, minibuses y buses de 8 y 9 metros con 2 puertas, y 12 metros con 3 puertas. Basado en el trabajo de Albert (1997), Del Campo (2008) presentó el primer modelo de TSP para buses de Transantiago en el marco del trabajo de Fernández et al. (2010). Este modelo considera las nuevas características del sistema público de Santiago: tipo de pago de tarifa y tipo de servicio (troncales y alimentadores). Además, se desestimó la congestión en el andén y las observaciones se realizaron sólo en paraderos formales, puesto que la nueva regulación eliminó los paraderos informales:

$$TSP = D + \max_i \{ (t_s + t'_s \cdot \delta_s) \cdot P_s^i + (t_b - t'_b \cdot \delta_b) \cdot P_b^i \} \quad (14)$$

donde,

$$\begin{aligned}
t_s &= \text{tiempo de subida por pasajero (s/pax)} \\
t'_s &= \text{tiempo adicional de subida por pasajero (s/pax)} \\
P_s^i &= \text{número de pasajeros que suben al bus por la puerta i (pax)} \\
t_b &= \text{tiempo de bajada por pasajero (s/pax)} \\
t'_b &= \text{disminución del tiempo de bajada por pasajero (s/pax)} \\
P_b^i &= \text{número de pasajeros que bajan del bus por la puerta i (pax)} \\
D &= \text{tiempo muerto por detención (s)} \\
i &= \text{puertas del bus} \\
\delta_s, \delta_b &= \text{variables mudas}
\end{aligned}$$

El término t'_s corresponde al aumento del tiempo promedio de subida producido por la congestión que se genera cuando suben más de 40 pasajeros en buses troncales o menos de 6 pasajeros en buses alimentadores. El término t'_b corresponde a la disminución del tiempo promedio de bajada que se genera cuando bajan más de 15 pasajeros en buses troncales o menos de 26 pasajeros en buses alimentadores. Continuando con este trabajo, Lira (2009) presentó 4 nuevos modelos del TSP para buses de Transantiago que tienen la particularidad de diferenciar entre servicios troncales y alimentadores. Éstos incluyen el efecto producido por la congestión en el andén y consideran 2 formas de pago de tarifa mediante TISC: pago al ingresar al bus y pago en el andén.

Para servicios troncales, pago en el andén:

$$TSP = D + \max \{ (t_s + t'_s \cdot \delta_{s1} + t''_s \cdot \delta_{s2})^* \cdot P_s^* ; t_b^* \cdot P_b^* \} \quad (15)$$

Para servicios troncales, pago al ingresar:

$$TSP = D + \max \{ (t_s + t''_s \cdot \delta_{s2})^* \cdot P_s^* ; t_b^* \cdot P_b^* \} \quad (16)$$

Para servicios alimentadores, pago en el andén:

$$TSP = D + \max \{ (t_s + t'_s \cdot \delta_{s1})^* \cdot P_s^* ; t_b^* \cdot P_b^* \} \quad (17)$$

Para servicios alimentadores, pago al ingresar:

$$TSP = D + \max \{ t_s^* \cdot P_s^* ; t_b^* \cdot P_b^* \} \quad (18)$$

donde,

$$\begin{aligned}
t'_s &= \text{tiempo adicional de subida cuando hay congestión en el andén (s/pax)} \\
\delta_{s1} &= 1, \text{ cuando hay congestión en el andén; } 0, \text{ en caso contrario} \\
t''_s &= \text{tiempo adicional de subida cuando la tasa de ocupación del bus es alta (s/pax)} \\
\delta_{s2} &= 1, \text{ cuando la tasa de ocupación es alta; } 0, \text{ en caso contrario} \\
* &= \text{indica variable de la puerta más solicitada por separado } (\max_i(P^i))
\end{aligned}$$

Se considera una tasa de ocupación alta cuando todos los asientos están ocupados y los pasajeros de pie dentro del bus ocupan más de la mitad del pasillo interior. Se considera que hay congestión en el andén cuando no es posible que suban todos los pasajeros que estaban esperando el bus. Notar que estos modelos consideran que el intercambio de pasajeros ocurre de manera simultánea. Es por esto que, para calcular el TSP del bus, se debe tomar el máximo tiempo que requiere el proceso de subida o de bajada, independiente de la puerta por la que se realice.

3. Componentes del TSP

A partir de la bibliografía revisada, se pueden identificar 4 elementos principales que componen el TSP. Éstos interactúan y se configuran de distintos modos en la forma funcional del TSP dependiendo del tipo de modelo que se use.

Tiempo de abordaje (T_s): corresponde al tiempo que ocupan los pasajeros para subir al vehículo. Es considerado por la mayoría de los estudios como el componente más importante y complejo del TSP. El tiempo de abordaje por la puerta i (T_s^i) se puede modelar como la cantidad de pasajeros que suben por ella (P_s^i) multiplicado por un tiempo base constante de subida por pasajero (t_s), más un tiempo adicional por pago de tarifa a bordo (t'_s), más un término que representa la interacción que se produce entre las personas que suben y los pasajeros de pie dentro del vehículo (L_p):

$$T_s^i = \left(t_s + t'_s \cdot \delta_s + a \cdot \frac{L_p}{n} \right) \cdot P_s^i \quad (19)$$

La constante a es un parámetro a calibrar. Notar que L_p se divide por la cantidad de puertas del vehículo (n) porque todas las variables deben ser por puerta, desagregando así el tamaño del vehículo de los modelos. La variable muda δ_s es 1 cuando P_s es mayor que la cantidad de pasajeros que caben en las escaleras de entrada al bus, y 0 en caso contrario (o cuando no se paga a bordo).

Tiempo de descenso (T_b): corresponde al tiempo que ocupan los pasajeros para bajar del vehículo. Análogamente al tiempo de abordaje, el tiempo de descenso por la puerta i (T_b^i) se puede modelar como la cantidad de pasajeros que bajan por ella (P_b^i) multiplicado por un tiempo base constante de bajada por pasajero (t_b), más un término que representa la interacción que se produce entre las personas que bajan y los pasajeros de pie dentro del vehículo (L_p):

$$T_b^i = \left(t_b + b \cdot \frac{L_p}{n} \right) \cdot P_b^i \quad (20)$$

Tiempo extra por congestión en el andén (T_c): corresponde al tiempo que transcurre desde que el bus se detiene hasta que el primer pasajero que aborda llega a una de las puertas de entrada. Este tiempo extra, depende de varios factores relacionados con la congestión en el andén, como la distancia que hay entre el punto de espera de los pasajeros y las puertas del bus, o el número de personas paradas que se deben sortear en el camino. Sin embargo, estos factores son difíciles de observar, por lo que Jaiswal et al. (2009) proponen usar valores promedio de T_c dependiendo de la cantidad de personas en el andén (entre 2,7 y 9,6 s.). Si se asume que la subida de pasajeros es continua, es fácil notar que T_s no puede comenzar hasta que transcurra T_c , pero sí lo puede hacer T_b (los pasajeros son libres de bajar aún cuando no ha llegado el primer pasajero que aborda). Esta restricción hará que T_c afecte al TSP de distinta forma, dependiendo del tipo de modelo que se use.

Tiempo muerto (D): el cuarto componente del TSP corresponde al tiempo muerto, que representa el tiempo de detención del vehículo que no es producido por el transbordo de pasajeros. La bibliografía reporta valores de D entre 2,27 y 14,5 segundos. Éste está compuesto por un tiempo muerto inicial asociado a la apertura de puertas (T_{ap}), un tiempo muerto final asociado al cierre de puertas (T_{ci}) y una constante operacional (C) que representa cualquier otro fenómeno no considerado que afecte al TSP. En este estudio se utilizarán valores promedio de los tiempos muertos medidos en terreno. La forma funcional propuesta para el tiempo muerto es la siguiente:

$$D = T_{ap} + T_{ci} + C \quad (21)$$

4. Modelos de TSP

4.1. Modelo secuencial

Este modelo asume que el proceso de subida ocurre una vez que ha concluido el proceso de bajada para una puerta, vagón o vehículo. Este modelo suele ser útil para modelar el TSP de una puerta del vehículo donde haya dificultad para subir y bajar al mismo tiempo, como es el caso del metro, buses de una puerta o buses con pago en el andén. En la Figura 1 se puede ver esquemáticamente cómo se estructuran las componentes del TSP en un modelo secuencial.

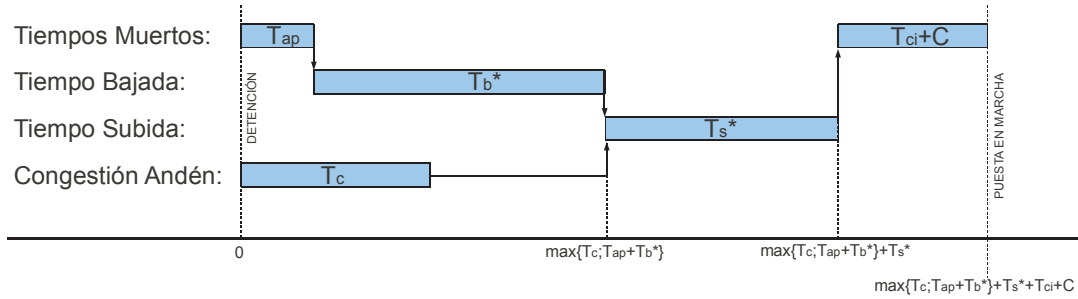


Figura 1: Esquema modelo secuencial puro

Luego, la forma funcional propuesta para el TSP de un vehículo según este tipo de modelo es la siguiente:

$$TSP = \max \{T_c ; T_{ap} + T_b^*\} + T_s^* + T_{ci} + C \quad (22)$$

Donde T_s^* y T_b^* corresponden a los tiempos de subida y bajada por la puerta más solicitada (mayor $T_s^i + T_b^i$, con i =puerta). Sin embargo, la experiencia demuestra que la subida y bajada de pasajeros raramente se produce de forma secuencial pura, pues normalmente existe un porcentaje de P_s que aborda al mismo tiempo que un porcentaje de P_b desciende, como se puede observar en la Figura 2. Este porcentaje está representado por el factor β que corresponde a la porción del tiempo de descenso (T_b^*) en que los pasajeros que bajan lo hacen simultáneamente a los que suben. Luego, hay un “traslape” de $\beta \cdot T_b^*$ del tiempo de abordaje sobre el tiempo de descenso.

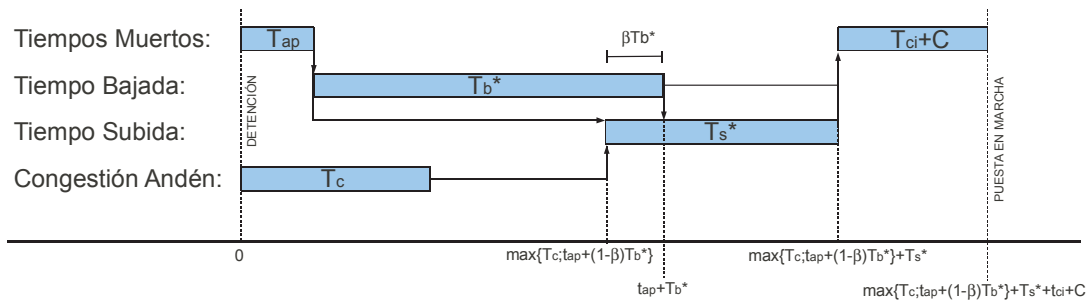


Figura 2: Esquema modelo secuencial

En vista de esto, se puede corregir la ecuación 22 para que el modelo secuencial se ajuste mejor a la realidad:

$$TSP = \max \{T_c ; T_{ap} + (1 - \beta^*) \cdot T_b^*\} + T_s^* + T_{ci} + C \quad (23)$$

Se asume que no hay interferencia entre los pasajeros que transbordan simultáneamente o que ésta es despreciable, como cuando se sube y se baja por puertas distintas, por ejemplo. Este modelo corregido es capaz de representar mejor el comportamiento del TSP con las variables dadas, sin embargo, es necesario medir la constante β^* que varía de parada en parada. Para simplificar los cálculos, se propone utilizar valores medios de esta constante dependiendo del tipo de vehículo y luego comprobar que la magnitud del error esté dentro de lo aceptable.

4.2. Modelo simultáneo

Este modelo asume que los procesos de subida y bajada ocurren al mismo tiempo, por una o varias puertas del vehículo. En la Figura 3 se puede ver esquemáticamente cómo se estructuran las componentes del TSP en un modelo secuencial.

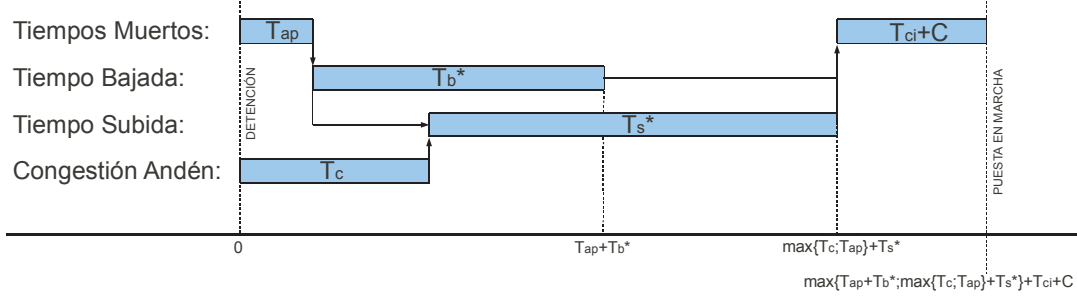


Figura 3: Esquema modelo simultáneo puro

Luego,

$$TSP = \max \{T_{ap} + T_b^* ; \max \{T_c ; T_{ap}\} + T_s^*\} + T_{ci} + C \quad (24)$$

Donde T_s^* y T_b^* corresponden a los tiempos de subida y bajada por la puerta mayor ocupada por separado (mayor T_s^i ó T_b^i de forma independiente). Este modelo puede ser más apropiado para modelar una serie de puertas de un mismo vehículo por donde se pueda subir o bajar indistintamente, o un vehículo con puertas destinadas sólo para abordar o sólo para descender, como ocurre en buses de Transantiago. Si bien esta estructura es más realista para los buses que la anterior, tampoco es completamente fidedigna, pues no considera las interferencias que ocurren entre los pasajeros que suben y los que bajan, cuando, por ejemplo, lo hacen por la misma puerta. Se ha observado que en sistemas donde no hay diferenciación entre puertas exclusivas para abordar y descender siempre hay interferencias y roces entre los pasajeros que suben y bajan del vehículo. Luego, se puede corregir el modelo propuesto en la ecuación 24 introduciendo un término que represente el tiempo extra que significan al TSP estas interferencias, como lo muestra la Figura 4.

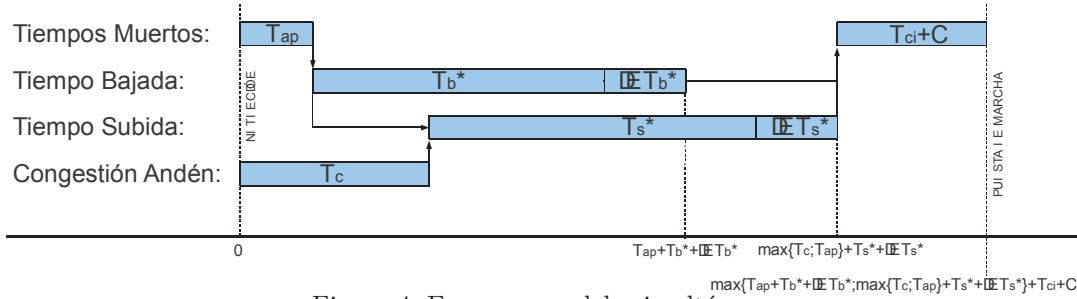


Figura 4: Esquema modelo simultáneo

Luego,

$$TSP = \max \{T_{ap} + T_b^* + INT_b^* ; \max \{T_c ; T_{ap}\} + T_s^* + INT_s^*\} + T_{ci} + C \quad (25)$$

Donde INT_b^* y INT_s^* corresponden a las interferencias que generan los procesos de bajada y subida, respectivamente, en las puertas donde se registra el mayor tiempo de bajada y de subida, también de forma respectiva. Estas interferencias dependen del número de pasajeros que suben (P_s) y del número de pasajeros que bajan (P_b) por puerta, lo que se puede expresar como:

$$INT_s^* = t_{int} \cdot \min \{P_s^* ; P_b^{(i=*)}\} \quad (26)$$

$$INT_b^* = t_{int} \cdot \min \{P_s^{(i=*)} ; P_b^*\} \quad (27)$$

Donde,

$$\begin{aligned}
t_{int} &= \text{tiempo extra por interferencia de transbordos simultáneos (s/pax)} \\
P_s^* &= \text{número de pasajeros que suben por la puerta que registra el mayor } T_s \text{ (pax)} \\
P_b^* &= \text{número de pasajeros que bajan por la puerta que registra el mayor } T_b \text{ (pax)} \\
P_b^{(i=*)} &= \text{número de pasajeros que bajan por la puerta que registra el mayor } T_s \text{ (pax)} \\
P_s^{(i=*)} &= \text{número de pasajeros que suben por la puerta que registra el mayor } T_b \text{ (pax)}
\end{aligned}$$

Notar que en un modelo simultáneo, el número de pasajeros que suben o bajan al mismo tiempo por una puerta es siempre la de menor valor, pues el saldo de pasajeros que quedará por transbordar lo hará libremente. Para efectos de un primer análisis, el parámetro t_{int} se puede asumir igual para todas las puertas, a pesar de que eventualmente pueda depender de las características físicas del vehículo, como el ancho de éstas. Este modelo es especialmente adecuado para los buses, donde por lo general existen puertas exclusivas para subir y otras exclusivas para bajar. Teóricamente, esta separación simplifica el modelo simultáneo propuesto, pues elimina por completo las interacciones entre los pasajeros que abordan y descenden. Sin embargo, en la práctica se observa que esto no siempre se cumple, especialmente luego que Transantiago introdujera una nueva forma de pago y buses alimentadores pequeños, donde las interacciones entre P_s y P_b son más propensas de ocurrir.

5. Resultados

A continuación se presentarán los principales resultados obtenidos en esta investigación. La calibración de los modelos se realizó con el método de regresión lineal múltiple (RLM), utilizando el complemento de análisis de datos de Microsoft Excel. Para ingresar los datos al programa se debió restar los tiempos muertos iniciales y finales de cada observación, pues éstos responden a variables no consideradas y con una gran dispersión, lo que introduce perturbaciones en las regresiones. Así se asegura que éstas se realicen con la porción del TSP correspondiente exclusivamente al transbordo de pasajeros:

$$TSP'_{obs}{}^k = TSP_{obs}^k - T_{ap}^k - T_{ci}^k \quad (28)$$

Donde,

$$\begin{aligned}
TSP'_{obs}{}^k &= \text{TSP exclusivamente por transbordo de pasajeros para la observación } k \text{ (s)} \\
TSP_{obs}^k &= \text{TSP medido en la observación } k \text{ (s)}
\end{aligned}$$

Cabe mencionar que este método se debe utilizar sólo para estimar los valores de los parámetros asociados a cada variable considerada (t_s , t_b , a y c). Una vez obtenidos estos valores se debe sumar el promedio de los tiempos muertos al modelo, según corresponda, para así obtener el TSP modelado.

5.1. Modelo para servicios de buses

Para calibrar los modelos de TSP en buses, se utilizaron datos obtenidos de grabaciones realizadas durante octubre y noviembre de 2008 y enero de 2010 en paraderos de Transantiago. Se optó por estudiar solamente el comportamiento de buses troncales, debido a que los servicios alimentadores tenderán a desaparecer con el tiempo. En total se usaron 157 observaciones, de las cuales 95 corresponden a paraderos con zonas pagas (pago en andén) y 62 corresponden a paraderos sin zona paga (pago a bordo). Un resumen de las observaciones utilizadas y de los principales parámetros se pueden ver en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1: Resumen de observaciones utilizadas para buses.

Paradero	Fecha	Nº de obs.	Pago tarifa	Hora
P. de Valdivia - 11 de Septiembre	30-10-2008	36	Pago en andén	18:30-20:00 hrs
Bilbao - Tobalaba	14-11-2008	33	Pago a bordo	18:30-20:00 hrs
Bilbao - Tobalaba	17-11-2008	33	Pago en andén	7:30-9:00 hrs
Bilbao - Tobalaba	06-01-2009	29	Pago a bordo	18:30-20:00 hrs
Bilbao - Tobalaba	08-01-2009	26	Pago en andén	7:30-9:00 hrs

Tabla 2: Valores de parámetros medidos en buses troncales

Parámetro	Unidad	Valor medio	Desv. estándar
Pago en el andén			
TSP	[s]	27,34	15,29
P_s^*	[pax]	12,01	6,62
P_b^*	[pax]	2,59	3,3
L_p/n	[pax/puerta]	8,79	7,32
T_{ap}	[s]	3,22	0,87
T_{ci}	[s]	2,55	1,26
Pago al ingresar			
TSP	[s]	25,89	14,62
P_s^*	[pax]	7,05	8,81
P_b^*	[pax]	4,87	6,41
L_p/n	[pax/puerta]	15,26	7,26
T_{ap}	[s]	3,33	0,73
T_{ci}	[s]	3,7	3,0

Se calibraron ambos modelos propuestos (ecuaciones 23 y 25) asumiendo los siguientes valores:

Tabla 3: Valores asumidos modelo buses

Parámetro	Unidad	Valor	Motivo
T_c	[s]	0	No se pudo medir
C	[s]	0	No se pudo medir
β	-	0	No se pudo medir
t_{int}	[s/pax]	0,5	Experiencia de obs. en terreno
t'_s	[s/pax]	0,5	Experiencia de obs. en terreno

Además, se usó la siguiente estructura modificada de los tiempos de subida (T_s^*) y bajada (T_b^*) por la puerta con mayor TSP (*):

$$T_s^* = \left(\frac{t_s}{2} + a \cdot \frac{L_p}{n} \right) \cdot P_s^* \quad (29)$$

$$T_b^* = \left(\frac{t_b}{2} + b \cdot \frac{L_p}{n} \right) \cdot P_b^* \quad (30)$$

Aquí, t_s , t_b , a y b son parámetros a calibrar. Notar que t_s y t_b se dividen por 2, pues los buses troncales cuentan con puertas dobles por las que pueden transbordar simultáneamente 2 pasajeros. Asimismo t'_s , pues todos los buses cuentan con 2 validadores junto a la puerta de entrada. Como las observaciones no cuentan con información detallada sobre la cantidad de pasajeros de pie a bordo, sino que sólo la tasa de ocupación discreta, L_p se debió calcular restando el número de asientos del bus a la cantidad de pasajeros a bordo, suponiendo que no hay asientos vacíos cuando hay pasajeros de pie.

De los modelos propuestos para buses, el que tuvo mejor desempeño fue el modelo simultáneo, cuya forma general única es la siguiente:

$$TSP = \max \left\{ \left(\frac{t_b}{2} + b \cdot \frac{L_p}{n} \right) \cdot P_b^* + INT_b^* ; \left(\frac{t_s}{2} + \frac{t'_s}{2} \cdot \delta_s + a \cdot \frac{L_p}{n} \right) \cdot P_s^* + INT_s^* \right\} + D \quad (31)$$

Notar que para el pago en el andén, $t'_s = 0$. Asimismo, para pago a bordo, $P_s^* = P_s$ y las interferencias por transbordo simultáneo sólo ocurrirán en la primera puerta. Los resultados de la calibración se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Mejores resultados de calibraciones en buses troncales

Parámetro	Unidad	Valor	t-Estadístico	R^2
Pago en el andén				
t_s	[s/pax]	3,90	20,21	0,73
t_b	[s/pax]	2,17	8,21	
a	[s/pax ²]	-0,01932	-2,27	
Pago al ingresar				
t_s	[s/pax]	1,97	2,85	0,90
t_b	[s/pax]	2,34	20,28	
a	[s/pax ²]	0,03856	1,95	

El parámetro b no tuvo significancia suficiente como para ser incluido en los resultados (t-estadístico 2). Además, el valor del parámetro a para pago en andén no parece tener sentido real, ya que no hay una razón que indique que se reduzca el tiempo marginal de subida cuando aumenta la cantidad de pasajeros de pie dentro del bus. Es por esto que se realizó nuevamente una RLM, esta vez sin el parámetro a para este tipo de pago, como se puede ver en la Tabla 5.

Tabla 5: Mejores resultados de calibraciones en buses troncales

Parámetro	Unidad	Valor	t-Estadístico	R^2
Pago en el andén				
t_s	[s/pax]	3,57	20,21	0,71
t_b	[s/pax]	2,17	8,21	
Pago al ingresar				
t_s	[s/pax]	1,97	2,85	0,90
t_b	[s/pax]	2,34	20,28	
a	[s/pax ²]	0,03856	1,95	

5.2. Modelo para servicios de metro

Para servicios de metro, la situación es análoga a la de buses con pago en andén. Se ha de señalar que en este caso no existe el tiempo extra por congestión en el andén (T_c) ni tiempo muerto inicial (T_{ap}), pues en el metro el momento en que se detiene el tren y comienza la transferencia de pasajeros es prácticamente el mismo. Lamentablemente, las grabaciones en video disponibles no permitieron registrar las cantidades de pasajeros de pie, por lo que esta variable no se considerará en las calibraciones. Luego, el modelo propuesto para servicios de metro es el siguiente:

$$TSP = t_s \cdot P_s^* + (1 - \beta^*) \cdot t_b \cdot P_b^* + D \quad (32)$$

Los valores promedio de las variables medidas se pueden ver en la Tabla 6.

Tabla 6: Valores promedio de variables medidas en metro

Variable	Unidad	Valor promedio
TSP	[s]	23,17
TSP'	[s]	11,61
T_{ap}	[s]	0
T_{ci}	[s]	8,43
C	[s]	3,13
β^*	-	0,24

Donde, $TSP' = TSP - D$. Notar que el promedio del tiempo muerto es muy similar al tiempo que ocupan los pasajeros para transbordar. Esto genera una alta distorsión en los resultados de las regresiones, pues en el metro los tiempos muertos dependen de numerosos factores, tales como ajustes de frecuencias o personas que entran corriendo al tren, cuya modelación se escapa a los alcances de este trabajo. En efecto, al realizar las calibraciones incluyendo los tiempos muertos, los resultados son bastante malos (R^2 de 0,0013). Eliminando los tiempos muertos, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 7: Valores de parámetros en metro

Parámetro	Unidad	Valor	t-Estadístico	R^2
t_s	[s/pax]	1,52	4,53	0,64*
t_b	[s/pax]	0,71	6,51	
a	[s/pax ²]	0	-	
c	[s/pax ²]	0	-	

*Ajuste sólo de TSP'

6. Conclusiones

En general los modelos propuestos para los distintos servicios de transporte público y escenarios se comportaron según lo esperado en cuanto a los ajustes R^2 , destacando el modelo simultáneo para buses con pago a bordo, con un 90 % de ajuste. En este mismo sentido, el modelo que obtuvo un peor desempeño fue el secuencial para servicios de metro, con un 64 % de ajuste. Estos resultados permiten validar la segunda hipótesis para buses troncales con pago al ingresar, en donde el modelo desagregado obtuvo un ajuste mucho mejor que el propuesto por Lira (2009) con el mismo conjunto de datos, no así para los buses troncales con pago en el andén, pues en este caso, el modelo desagregado y el de Lira (2009) obtuvieron el mismo valor de R^2 . Para el caso del metro, no se puede hacer este análisis, pues no se cuenta con modelos previos del TSP de dicho servicio.

Por otro lado, los t-estadísticos de las variables elegidas permiten validar la primera hipótesis propuesta, pues todas obtuvieron valores de 1,95 o más, exceptuando $\left(\frac{L_p}{n} \cdot P_b\right)$ que nunca obtuvo una significancia suficiente como para ser incluida en los modelos. Esto se puede deber a que la interacción entre los pasajeros que bajan y los que están de pie dentro del vehículo es muy baja o nula, debido a que los pasajeros que bajan en una parada, por lo general ya están de pie y cerca de las puertas cuando el vehículo se detiene, anulando dicha interacción.

Se observa que los tiempos de subida por pasajero de buses en zona paga (pago en andén) son mayores que los tiempos de subida por pasajero en zona no paga (pago a bordo), al contrario de lo que se esperaría. Sin embargo, este resultado es consistente a los obtenidos por Lira (2009) con el mismo conjunto de datos. Esto se puede deber a que en una zona paga se permite la subida y bajada de pasajeros por todas las puertas del bus, lo que aumenta la interferencia de transbordos simultáneos. En ausencia de una zona paga, la subida de pasajeros se realiza sólo por la primera puerta, de forma ordenada y donde prácticamente no hay interferencias, pues son pocos los pasajeros que bajan por ésta. Ahora bien, es más probable que este resultado sea producto de que no se pudo obtener el número exacto de pasajeros de pie dentro del bus, a partir de las observaciones realizadas, o a un sesgo en la muestra.

Otro resultado que cabe destacar es el del parámetro a en buses con pago en andén, correspondiente a la variable $\left(\frac{L_p}{n} \cdot P_s\right)$. La RLM arrojó un valor negativo con buena significancia, por lo que fue incluido en los resultados, sin embargo, no tiene mucho sentido real debido a que no parece haber una razón que indique se reduzca el tiempo marginal de subida cuando aumenta la cantidad de pasajeros de pie dentro del bus. Es posible que este resultado se deba a que en las observaciones tomadas del paradero de Pedro de Valdivia con 11 de Septiembre no se registraron bajadas de pasajeros, debido a que es un paradero próximo a varios inicios de recorridos, generando cierta perturbación en los datos, lo que la regresión intenta compensar con dicho parámetro negativo. En todo caso, la variable mencionada es poco significativa en comparación a P_s y P_b , por lo que se puede quitar del modelo sacrificando algo de ajuste, como se observa en las Tablas 4 y 5.

En general, se observa que los tiempos marginales de transbordo en buses troncales de Transantiago son significativamente menores que los tiempos marginales de transbordo del antiguo sistema de buses (según los valores obtenidos por Gibson et al, 1997). Sin embargo, los tiempos muertos aumentaron, debido en parte a las nuevas restricciones de las máquinas que no se pueden poner en marcha si no se han cerrado todas las puertas.

En cuanto al metro, los resultados son consistentes a los valores de tiempos marginales de trasbordo obtenidos en laboratorio (según las experiencias en PAMELA de Fernández et al, 2010). El único valor que cabe destacar es el del porcentaje de pasajeros que suben simultáneamente a los que bajan (β^*), que en este caso se calculó en un 25 %, bastante alto considerando que en una estación donde se registren principalmente bajadas la cantidad de pasajeros que suben al tren puede ser casi irrelevante. Lamentablemente no se pudo medir la cantidad de pasajeros de pie dentro de los trenes, los que pudo haber mermado el ajuste de los modelos.

Se debe mencionar los altos valores encontrados para los tiempos muertos en Transantiago. Éstos no parecen seguir un patrón definido y presentan una gran dispersión, lo que introduce perturbaciones no deseadas en las calibraciones de los modelos. Éstas son más notorias en los servicios de metro, en donde los ajustes de frecuencias, pasajeros que entran corriendo al tren y otros factores, parecen ser tan importantes

como la cantidad de pasajeros que transbordan en una estación. En efecto, el ajuste del modelo secuencial para el metro aumenta en más de un 63 % cuando se eliminan los tiempos muertos de las regresiones.

Por último, se debe mencionar la necesidad de contar con datos de terreno más detallados, en mayor cantidad y a nivel global para validar un modelo único de TSP para Transantiago. Las grabaciones disponibles no permitieron obtener números exactos sobre la cantidad de pasajeros de pie a bordo, lo que impidió realizar calibraciones más precisas. También se observó una gran sensibilidad de los resultados a externalidades como el tipo de servicio, horario de la medición o paradero escogido, debido a la escasez de observaciones disponibles. En trabajos futuros se sugiere utilizar métodos automatizados y masivos para el registro de datos, como contadores automatizados de pasajeros (utilizados en EE.UU.) y reconocimiento de pasajeros mediante imágenes.

7. Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el proyecto FONDECYT 1080381. Otros aportes provienen del Fondo de Ayuda a la Investigación (FAI) de la Universidad de los Andes (Chile), proyecto ING-003-09.

Referencias

- Del Campo, M. A. 2008. 'Nueva especificación y calibración del modelo de tiempo de servicio de pasajeros en estaciones de transporte público', Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Universidad de los Andes, Santiago, Chile.
- Fernández, R., Del Campo, M.A. & Swett, C. 2008, 'Recolección de datos y calibración de modelos de tiempo de servicio de pasajeros en buses y metros del sistema Transantiago', *Actas del XV Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte*, Cartagena de Indias, Colombia.
- Fernández, R., Zegers, P., Weber, G., Figueroa, A. & Tyler, N. 2010, 'Alto de andén, ancho de puertas y cobro de tarifa en la demora al transporte público. Resultados de experiencias en laboratorio', *Actas del XVI Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte y Logística*, Lisboa, Portugal.
- Gibson, J., Fernández, R. & Albert, A. 1997, 'Modelación de paraderos formales en Santiago', *Actas del VIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, Santiago, Chile, pp. 397-408.
- Jaiswal, S., Bunker, J. & Ferreira, L. 2008, 'Relating bus dwell time and platform crowding at a busway station', *Proceedings 31st Australasian Transport Research Forum*, Gold Coast, Australia, pp. 239-249.
- Jaiswal, S., Bunker, J. & Ferreira, L. 2009, 'Modelling the relationships between passenger demand and bus delays at busway stations', artículo presentado en el TRB 88th Annual Meeting, Washington D.C., EE.UU., 11-15 Enero.
- Kim, W-H. 2007, 'A Methodology for Estimation of Bus Dwell Time and Prediction Intervals', *Seoul City Research Article* 8, no. 3, pp. 57-70.
- Lin, T-M & Wilson, N. 1991, 'Dwell time relationships for light rail systems', *Transportation Research Record*, no 1361, pp. 287-295.
- Lira, J.P. 2009, 'Extensión de modelos de tiempo de servicio de pasajeros para Transantiago', Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Universidad de los Andes, Santiago, Chile.
- Pretty, R.L. & Russel D.J. 1988, 'Bus boarding rates', *Australian Road Research*, no 18(3), pp. 145-152.
- Puong, A. 2000, 'Dwell time model and analisis for the MBTA Red Line', *Massachusetts Institute of Technology*, Cambridge, EE.UU.
- Rajbhandari, R., Chien, S.I. & Daniel, J.R. 2004, 'Estimation of bus dwell times with automatic passenger counter information', *Transportation Research Record*, no 1841, pp. 120-127.
- Transportation Research Board, EE.UU. 2000, *Highway capacity manual*, National Research Council, Washington DC.
- Transport Research Laboratory 1993, *Project Report 2: Factors affecting bus-stop times*, por I.O. York, Department of Transport, Crowthorne.