

CAPACIDAD DE ESTACIONES DE TRANSFERENCIA

En términos conceptuales, una estación de transferencia (puerto, aeropuerto, estación de tren, paradero de buses, paradero de taxis) es el lugar de encuentro entre objetos de transporte (carga, pasajeros) y modos de transporte (diferentes tipos de vehículos) para que los objetos sean cargados y/o descargados de los vehículos.

La capacidad de una estación de transferencia puede ser definida en términos de :

- número de vehículos que pueden ser servidos por unidad de tiempo, o
- número de objetos que pueden ser transferidos por unidad de tiempo.

Desde el punto de vista del movimiento de los vehículos, interesará la primera de esas capacidades, ya que implica vehículos circulando por la estación y pasajeros moviéndose a través de ese sistema de transporte. Conceptualmente :

$$Capacidad_Transferencia = \frac{N^{\circ} Sitios_Carga * Disponibilidad}{Tiempo_Ocupacion} \quad (1)$$

En la Ec.(1), si cada sitio de carga se asume ocupado por un solo vehículo, la capacidad de transferencia estará expresada en vehículos por unidad de tiempo (v.g. buses por hora).

El número de sitios de carga dependerá del espacio disponible en la estación. Normalmente este es un recurso escaso y deberá tratar de minimizarse por restricciones físicas y operacionales.

La disponibilidad de sitios se puede expresar como una proporción del tiempo durante la cual el sitio está disponible y dependerá de la forma de operar los sitios y de condiciones externas.

Entre las condiciones de operación están :

- la forma en que se asignan los sitios a los vehículos ;
- la disciplina de entrada a y salida de los sitios ;
- la posibilidad de que un vehículo permanezca en el sitio luego de la transferencia.

Entre las condiciones externas se pueden mencionar :

- condiciones del tráfico en la inmediaciones ;
- condiciones meteorológicas ;
- condiciones legales ; etc.

El tiempo de ocupación es una función del tipo de objetos que se están transfiriendo y del tipo de vehículos que hacen la transferencia. Puede ser descrito mediante datos estadísticos o modelos.

Por lo tanto, los factores que afectan la capacidad de estaciones de transferencia se pueden clasificar en físicos y operacionales.

Entre los factores físicos están :

- número y disposición de los sitios ;
- espacio para maniobras de entrada y salida ;
- facilidades para la carga y descarga ;
- características de los vehículos.

Entre los factores operacionales se encuentran :

- asignación y uso de sitios ;
- cantidad de objetos y vehículos que llegan ;
- forma de las llegadas ;
- tipo de objetos que se transfieren.

En resumen, al igual que la capacidad de circulación por los otros elementos de infraestructura de transporte (vías e intersecciones), la capacidad de estaciones de transferencia debe ser manejada con acciones conjuntas de diseño físico y operacional.

CAPACIDAD DE PARADEROS DE BUSES

Definiciones

Un paradero de buses es un tipo de estación de transferencia destinada al encuentro entre pasajeros y vehículos de transporte público de superficie. Su objetivo es proporcionar el *acceso* al sistema de transporte público, es decir, la facilidad para entrar y salir del sistema.

Conceptualmente, un paradero de buses puede ser entendido como un dispositivo vial compuesto por los siguientes elementos (Fig.1):

- un *área de parada* para los vehículos ;
- un *andén* para los pasajeros.

El *área de parada* es una zona definida de la calzada donde los buses se detienen a tomar y dejar pasajeros y está compuesta de uno o varios *sitios* destinados a acomodar a los vehículos.

El *andén* es una zona definida de la plataforma vial donde los pasajeros esperan a los buses y donde las operaciones de subida y bajada tiene lugar. Puede ser una porción de la vereda u otro lugar especialmente acondicionado, como una isla peatonal.

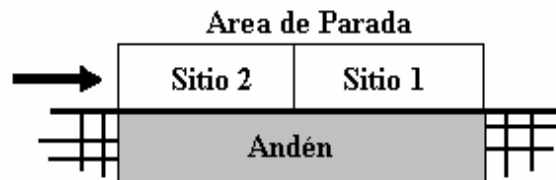


Fig.1 : Componentes de un paradero de buses

Las áreas de parada y andenes pueden combinarse para acomodar al flujo de buses que para y a la demanda de pasajeros que sube y baja, dando lugar a dos tipos de paraderos : simples y divididos o múltiples.

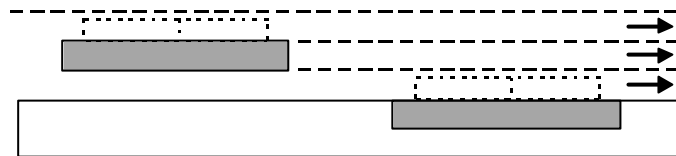
- *Paradero simple* : si el flujo de buses y la demanda de pasajeros son bajos, bastará un paradero compuesto por un área de parada y uno o más sitios para acomodarlos, como muestra la Fig.1.

- *Paradero dividido* : si el flujo y la demanda son mayores se requerirá de más de un área de parada, dividiendo un gran paradero en varios paraderos simples más pequeños, denominados *subparaderos*.

Las áreas de parada, sitios y andenes pueden disponerse de diversas formas, de acuerdo con el espacio disponible y las reglas de utilización : en línea, en paralelo, en ángulo (Fig.2).



a) en línea



b) en paralelo

Fig.2 : Configuraciones de paraderos divididos

Modelos de capacidad

Como los paraderos se ubican en la calzada, su capacidad puede relacionarse con otros dispositivos viales, como las intersecciones.

Dado que la función principal de los vehículos en una intersección es cruzar por ella, la capacidad de un acceso o pista de una intersección es el máximo número de vehículos que pueden entrar a la intersección por unidad de tiempo. Esta capacidad es el inverso del intervalo medio entre vehículos cuando hay una cola tratando de entrar a la intersección. Es decir :

$$Q_i = \frac{3600}{h} \quad (2)$$

Donde :

Q_i : capacidad del acceso i (veh/h)
 h : intervalo medio entre vehículos de la cola (s)

De igual modo, la capacidad de un paradero se puede definir como “el máximo número de buses por unidad de tiempo que pueden entrar al área de parada” (Gibson et al, 1989). Sin embargo, esta capacidad no está sólo ligada al intervalo medio entre buses cuando hay una cola tratando de entrar al paradero.

Al igual que en otras estaciones terminales, la función principal de los buses en un paradero es detenerse para transferir pasajeros, en lugar de sólo cruzar por el área de parada. Luego, el máximo número de buses que pueden entrar al paradero estará relacionado con el tiempo durante el cual el área de parada está ocupada por buses transfiriendo pasajeros. Es decir :

$$Q_B = \frac{3600}{t_o} \quad (3)$$

Donde :

Q_B : capacidad de un paradero (bus/h)
 t_o : tiempo de ocupación del área de parada (s)

El tiempo de ocupación del área de parada depende de los siguientes factores :

- t_l : tiempo de frenado y aceleración en el paradero (s) ;
- t_p : tiempo detenido transfiriendo pasajeros (s) ;
- t_e : esperas internas por bloqueo de la salida (s) ;
- n/s : tiempo necesario para recorrer el paradero (s) ;
- n : número de sitios del paradero ;
- s : flujo de saturación de la pista del paradero (bus/s).

Si el área de parada está compuesta por un solo sitio, pero no libre de obstrucciones, entonces (Fernández, 1998) :

$$t_o = t_l + t_p + t_e + \frac{1}{s} = t_c + t_p + t_e \quad (4)$$

Donde :

$t_c = t_l + 1/s$: tiempo de despeje del sitio (s)

Si el área de parada tiene varios sitios contiguos y linealmente dispuestos, la capacidad puede estimarse imaginando que el paradero opera con un proceso cíclico de bloqueo y desbloqueo de su entrada, al igual que una intersección semaforizada. Así, la capacidad puede expresarse como (Gibson et al, 1989) :

$$Q_B = \frac{3600\tilde{n}}{T} \quad (5)$$

Donde :

\tilde{n} : número medio de buses que puede entrar al paradero en un período de desbloqueo
 T : tiempo de ciclo entre estados similares del paradero (s)

Los estados sucesivos del paradero son :

- entrada bloqueada durante un período t_b ;
- entrada libre durante un período t_d .

Luego, el tiempo de ciclo se descompone de la siguiente manera :

$$T = t_b + t_d \quad (6)$$

Donde :

$t_b = t_l + t_p + t_e$: tiempo de bloqueo del sitio que impide la entrada (s)
 $t_d = \tilde{n}/s$: tiempo de “llenado” del paradero (s)

En el caso de sitios linealmente dispuestos y disciplina FIFO, el sitio que impide la entrada es el último.

Combinando las Ec.(5) Y (6) la capacidad, en buses por hora, de un paradero de sitios múltiples se puede expresar como :

$$Q_B = \frac{3600\tilde{n}}{t_b + \frac{\tilde{n}}{s}} \quad (7)$$

En la Ec.(7), el número de vehículos \tilde{n} que puede entrar al paradero es tanto función de características físicas, como el número n de sitios, como operacionales, es decir, la forma de usar estos sitios ; en general, $\tilde{n} \propto n$. Asimismo, las componentes de t_b se pueden relacionar con variables físicas y de operación.

El tiempo t_l de aceleración y frenado estará condicionado por el tipo de buses que sirven al paradero y su forma de conducción. Así :

$$t_l = \frac{1}{2} \left(\frac{V_r}{a} + \frac{V_r}{f} \right) = \frac{V_r}{\gamma} \quad (8)$$

Donde :

V_r : velocidad media de recorrido de los buses (m/s)
 a : tasa media de aceleración de los buses (m/s²)

- f : tasa media de frenado de los buses (m/s^2)
 g : media armónica de las tasas de aceleración y frenado (m/s^2)

El tiempo t_p para transferir pasajeros depende de cantidad de pasajeros que suben y bajan de cada bus en el paradero. Esto se puede expresar como :

$$t_p = \begin{cases} \beta_0 + (\beta_1 p_s + \beta_2 p_b) \dots \dots \dots, \text{subidas / bajadas_sucesivas} \\ \beta_0 + \max\{\beta_1 p_s; \beta_2 p_b\} \dots \dots \dots, \text{subidas / bajadas_simultaneas} \end{cases} \quad (9)$$

Donde :

- b_0 : tiempo muerto por detención - v.g. abrir/cerrar puertas - (s)
 b_1 : tiempo marginal de subida por pasajero (s/pax)
 b_2 : tiempo marginal de bajada por pasajero (s/pax)
 p_s : número de pasajeros que sube al bus (pax)
 p_b : número de pasajeros que baja del bus (pax)

Las esperas internas t_e se deben a fenómenos de congestión dentro del área de parada. Tal como en otros terminales, es el período durante el cual un bus no puede acceder o abandonar un sitio debido a restricciones impuestas por los otros vehículos o por condiciones del tráfico. En el caso de un paradero con sitios linealmente dispuestos y disciplina FIFO, corresponderá al tiempo t_b del sitio aguas abajo.

La interdependencia entre las componentes t_b y \tilde{n} en paraderos de sitios múltiples forma un complejo sistema de interacción entre pasajeros y buses al interior del paradero, lo que hace difícil calcular el valor de la capacidad con expresiones analíticas, excepto para condiciones muy particulares. Por ejemplo, sitio único, llegadas de pasajeros y buses a intervalos constantes, ausencia de congestión interna, etc.

Para cubrir un espectro más amplio de configuraciones físicas y condiciones de operación, se han desarrollado modelos de simulación para su cálculo. Entre éstos se pueden mencionar IRENE (Gibson et al, 1989) y PASSION (Fernández, 1998) como los únicos reportados en la literatura. Algunos valores de capacidad son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1 : Capacidades prácticas de paraderos

Tipo de Operación	ORDEN ¹				DES-ORDEN ²
	Tasa Subida (pax/bus)	12	8	4	
Tasa Bajada (pax/bus)	6	4	2	1	4
Número de Sitios	CAPACIDAD PRACTICA ³ (bus/h)				
2	60	80	100	130	70
3	80	105	125	160	80

Fuente : Gibson y Fernández (1995)

¹ Disciplina FIFO, buses paran una vez en el sitio más próximo a la salida.

² Adelantamiento permitido (AP), detenciones múltiples y en cualquier sitio.

³ Estimada para un grado de saturación 0,6.

Se ha observado que un funcionamiento apropiado de un paradero se obtiene para grados de saturación menores a 0,65 (Gibson y Fernández, 1995). Los valores de capacidad de la Tabla 1 corresponden a un grado de saturación igual a 0,6. Este será el grado de saturación práctico de paraderos (notar la diferencia con el valor 0,9 en semáforos). En tales circunstancias, la longitud media de cola a la entrada del paradero será de 0,5 buses, o sea, a lo más 1 bus el 50% del tiempo, y la demora media resultará de aproximadamente 60 segundos por bus.

En resumen, las capacidades necesarias para que paraderos simples operen eficientemente están entre 60 y 160 buses por hora. Además, la influencia de intersecciones semaforizadas cercanas puede producir reducciones de hasta un 40% en la capacidad (Gibson y Fernández, 1996). Como regla práctica muy general, se puede considerar un valor de 30-60 bus/h/sitio, dependiendo principalmente de la tasa de subida de pasajeros por bus y de la disciplina de uso de los sitios.

Ejemplos de flujos de buses en los principales corredores de transporte público de Santiago son : 200 bus/h en Av. Matta, 450 bus/h en Av. Providencia, 600 bus/h en La Alameda. De allí la necesidad de diseños especiales (paraderos divididos) y la explicación de fenómenos de congestión cuando dichos diseños no existen.

También existen expresiones analíticas de capacidad de paraderos de buses. Entre las más difundidas se encuentran las del Highway Capacity Manual, HCM (TRB, 1985 y 1994) y las de operaciones en convoyes de buses (Szász et al, 1978), que se describen a continuación.

Fórmula del HCM

El HCM establece la siguiente fórmula para estimar la capacidad de un paradero de sitios múltiples en la calzada :

$$Q_N = \frac{(g/C)3600 RN_b}{t_c + (g/C)D} \quad (10)$$

Donde:

- Q_N : capacidad de un paradero de N sitios (bus/h)
- g : verde efectivo de la intersección aguas abajo del paradero (s)
- C : tiempo de ciclo de la intersección aguas abajo del paradero (s)
- t_c : tiempo de despeje entre buses sucesivos (s)
- D : tiempo medio de ocupación del paradero (s)
- R : factor de reducción de la capacidad
- N_b : número efectivo de sitios

En la Ec.(10), si no hay semáforo aguas abajo, entonces $(g/C) = 1,0$.

El factor R trata de incorporar las variaciones entre la llegada de los buses y el tiempo de ocupación del área de parada. Para llegadas a intervalo constante y tiempos de ocupación regulares, $R = 1,0$. En otros casos, $R = 0,833$, lo que asume que durante el 30% del tiempo podrá formarse cola a la entrada del paradero (ver TRB, 1997).

El HCM también sugiere diferentes valores N_b para configuraciones lineales de sitios con y sin posibilidades de adelantamiento entre los buses (Tabla 2). Estos son valores empíricos que surgieron de observaciones en terminales de buses en Nueva York y Nueva Jersey. También establece que cualquier otra configuración de sitios, aparte de la lineal, produce sitios completamente efectivos.

Tabla 2 : Número efectivo de sitios

Número de sitios (N)	Número efectivo de sitios (N_b)	
	FIFO	AP
1	1,00	1,00
2	1,75	1,85
3	2,25	2,60
4	2,45	3,25
5	2,50	3,75

Fuente : TRB (1985)

El tiempo de ocupación D tiene diferentes expresiones de acuerdo al número y función de las puertas del bus. Así :

• para 1 puerta única de subida y bajada: $D = b_1 p_s + b_2 p_b$ (11)

• para 2 puertas, una de subida y otra de bajada : $D = \max \{b_1 p_s ; b_2 p_b\}$ (12)

Donde :

b_1 : tiempo de subida por pasajero (s/pax)

b_2 : tiempo de bajada por pasajero (s/pax)

p_s : número de pasajeros que suben al bus en los 15 minutos punta de demanda

p_b : número de pasajeros que bajan del bus en los 15 minutos punta de demanda

Operación en convoy

Las operaciones en convoy consisten en operar los buses en forma similar a un tren, pero sin conexión física entre ellos. Un grupo de buses viaja a lo largo de un corredor manteniendo cortos intervalos de tiempo entre ellos y se detienen en el paradero en el mismo orden en que viajan. Así, buses con destinos específicos se detienen en sitios determinados del paradero, de modo que los pasajeros saben dónde esperarlos dentro del andén.

Como resultado de esta forma de operación las transferencias de pasajeros ocurren al mismo tiempo para todos los buses del convoy. Y como este es un proceso paralelo, el tiempo de ocupación del área de parada es idéntico para todos los buses. Bajo estos supuestos, una expresión empírica de la capacidad de paraderos es la siguiente :

$$Q_c = \frac{3600 - b_1 B \left(\frac{3}{2 + N} \right)}{4 + \frac{8}{N}} \quad (13)$$

Donde:

Q_c : capacidad de un paradero bajo operación en convoy (bus/h)

N : número de buses del convoy

b_1 : tiempo de subida por pasajero (s/pax)

B : demanda de subida en el paradero (pax/h)

La Ec.(13) proviene de experiencias en São Paulo, donde se encontró que a un bus le toma 12 segundos entrar y salir del área de parada. De este tiempo, 4 segundos corresponden al intervalo mínimo entre buses sucesivos y no puede ser reducido. Los restantes 8 segundos corresponden al tiempo perdido frenando, abriendo y cerrando sus puertas y acelerando. En un convoy, estos procesos son simultáneos, por lo que este último valor se divide por el tamaño del convoy.

Como los pasajeros abordan los buses del convoy al mismo tiempo, la demanda total del paradero se divide por el número N de buses del convoy para estimar el número medio de

pasajeros que aborda cada bus. Sin embargo, como este número puede no ser igual para todos los buses, un tamaño efectivo del convoy igual a $(2+N)/3$ es utilizado.

La Ec.(13) puede también ser entendida como la capacidad de un paradero ideal con N sitios linealmente dispuestos: los buses usan el paradero bajo una estricta disciplina FIFO, el tiempo de ocupación de cada sitio es el mismo para cada bus, la demanda horaria es constante, los pasajeros se distribuyen homogéneamente a lo largo del andén y el número que aborda cada bus es idéntico. En tales condiciones, la capacidad Q_c varía en forma linealmente decreciente con la demanda total B del paradero y la pendiente de dicha recta es el tiempo marginal de subida b_l . Un ejemplo de esta función se muestra en la Fig.3 para un convoy de 3 buses y tres valores distintos del tiempo marginal de subida.

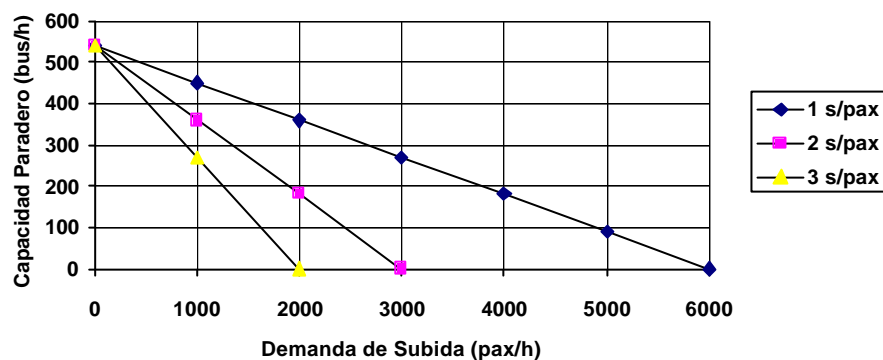


Fig.3 : Capacidad de un paradero con convoy de 3 buses

Referencias

Fernández, R. (1998). *Modelling bus stop interactions*. PhD Thesis, University of London (Unpublished).

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

Gibson, J. y R. Fernández (1995). Recomendaciones para el Diseño de Paraderos de Buses de Alta Capacidad. *Apuntes de Ingeniería* **18**(1). Ediciones Universidad Católica de Chile, 35-50.

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

TRB (1985 y 1994). *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, Special Report 209, National Research Council, Washington D.C.

Fernández, R. (1999). *Teoría de Tráfico*. División Ingeniería de Transporte, Universidad de Chile.

TRB (1997). *Operational Analysis of Bus Lanes on Arterials*. Transportation Research Board, TCRP Report 26, National Research Council, Washington D.C.

Szász, P.A. L. de Montana y E.O. Ferreira (1978). *COMONOR : Ordinated bus convoy*. Technical Paper 9, Companhia de Engenharia de Trafego, São Paulo.