

Sobre la Tarifación Vial por Congestión en Sistemas Mixtos

Cristian Ángel Guevara,
 Universidad de Los Andes
 San Carlos de Apoquindo 2200, Las Condes, Santiago, Chile
 Teléfono: (56 2) 412 9477. Fax: (56 2) 214 9551
 E-mail: aguevara@uandes.cl

RESUMEN

En esta investigación se analiza el efecto de considerar a las personas en la determinación del óptimo del sistema en un problema de asignación de tráfico en el cual Autos y Buses compiten por la capacidad vial. Basándose en el análisis microeconómico de las condiciones de equilibrio, se derivan algunas expresiones novedosas para los componentes de la externalidad. Con el fin de ilustrar estos desarrollos, dicho equilibrio es luego simulado concluyéndose que, para las vías mixtas, la asignación óptima de tráfico implica una tarifa para los Autos que es significativamente más alta que lo estimado usualmente y, consecuentemente, que los flujos óptimos de Auto son prácticamente nulos para ese tipo de vías. Estos resultados sugieren que podría ser recomendable considerar, como un segundo mejor para la tarifación vial óptima por congestión, la dedicación de calles completas (o pistas) al uso exclusivo de los Buses.

Palabras Clave: Asignación Óptima de Usuarios, Tarifación Vial por Congestión, Buses y Autos

ABSTRACT

This paper investigates the effect of considering people in the determination of the system optimum traffic assignment problem, rather than considering buses and cars. Based on the microeconomic analysis of equilibrium conditions, some novel expressions for the externality components are derived. Afterwards, said equilibrium is simulated concluding that, for mixed use roads, optimal traffic assignment implies cars tolls which are significantly higher than usually estimated and, consequently, optimal car flows almost disappears for that type of roads. These results suggest that it would be recommendable to consider, as second best for optimal road pricing, the dedication of roads (or lanes) for Buses.

Key Words: System Optimum Traffic Assignment, Congestion Road Pricing, Transit and Cars

1. INTRODUCCIÓN

La utilización óptima de recursos escasos es un problema fundamental de la economía. Si los agentes perciben todos los costos que producen, dicha utilización óptima resulta de la combinación espontánea de los intereses individuales de cada agente involucrado. En caso contrario, cuando existen externalidades o costos no considerados en la toma de decisiones, la combinación de los intereses individuales se traducirá en una asignación ineficiente de dichos limitados recursos.

Un ejemplo donde las externalidades provocan una repartición ineficiente de recursos se da en la asignación de vehículos a una red de transporte donde, entre otras cosas, los agentes no consideran la demora adicional que provocan sus decisiones en el resto de los usuarios. Suponiendo que el problema de asignación a la red puede ser bien representado por un modelo de asignación agregado y estático donde los arcos tienen determinadas curvas flujo demora y los usuarios se asignan a la red según el primer principio de *Wardrop*, la corrección a esta distorsión se logra simplemente realizando una asignación a tiempos marginales, en vez de a tiempos medios (Sheffi, 1985).

Para lograr que esta asignación óptima teórica se manifieste espontáneamente en la práctica, podría cobrarse en cada arco a una tarifa (s_a) que corresponda al equivalente en dinero de la diferencia entre las curvas de tiempo marginal (t_a^{mg}) y tiempo medio (t_a^{me}) evaluadas en los flujos óptimos (f_a^{opt}) obtenidos de la asignación a tiempos marginales. El equivalente en dinero de dicha diferencia en tiempo se obtiene multiplicando dicha diferencia por el valor subjetivo de ahorrar tiempo de viaje (VST) (Jara-Díaz y Guevara, 2003), el cual será único sólo si se asume un solo tipo de usuario (1).

$$s_a = VST * [t_a^{mg}(f_a^{opt}) - t_a^{me}(f_a^{opt})] \quad \forall a \quad (1)$$

Si todos los usuarios afectan de la misma forma las curvas flujo demora, la expresión (1) es plenamente válida. Sin embargo esta hipótesis no se cumple, por ejemplo, en un sistema mixto donde conviven Autos y Buses compitiendo por la vialidad existente. Si los tiempos del sistema son considerados a nivel de personas y no de vehículos, la fórmula (1) se vuelve algo más compleja, lo que se traduce en resultados que no son directos. El análisis de este efecto y sus implicancias teóricas y prácticas constituyen la materia fundamental del presente trabajo.

Ejemplos de trabajos anteriores donde se estudia tarifación óptima en sistemas donde convive el modo Bus y el modo Auto son de Boger y Mayeres (2005), Huang (2000), Viton, (1983) y Small (1983). El presente trabajo de investigación se diferencia de aquellos en que en este caso se pone énfasis en el impacto de la tarifación óptima en la asignación táctica de vehículos a la red, considerando una red estática donde los modos Auto y Bus compiten por vialidad, lo cual permite derivar algunas implicancias concretas para el desarrollo de políticas de transporte.

En la sección 2 se analiza la formulación teórica de las funciones tiempo marginal en redes agregadas y estáticas,

considerando el impacto en los usuarios de Bus. En la sección 3 se describe y reporta un modelo de simulación simplificado de partición modal y asignación que permite visualizar los alcances de las consideraciones teóricas analizadas. En la sección 4 se discuten las implicancias prácticas en política en transporte de los análisis teóricos desarrollados. Finalmente, en la sección de Conclusiones los resultados son resumidos y se reiteran algunas limitaciones importantes del análisis realizado.

2. TARIFICACIÓN ÓPTIMA EN REDES AGREGADAS ESTÁTICAS CONSIDERANDO USUARIOS EN LUGAR DE VEHÍCULOS

Consideremos un sistema donde Auto y Bus comparten espacio vial y donde además existe información sobre el tiempo medio necesario para recorrer cada arco *a* de la red como función exclusiva del flujo de vehiculos en dicho arco. En orden a mantener el modelo lo suficientemente simple, pero sin perder generalidad en las conclusiones que se extraerán al final, no consideraremos en nuestro análisis los costos operacionales de los vehículos, ni tampoco las diferencias de ingreso de los usuarios en la determinación de las tarifas óptimas.

Consideremos que el tiempo medio (*t_a^{me}*) de atravesar un arco *a* depende sólo del flujo de Autos (*f_a*) y de Buses equivalentes (*B_a*) en dicho arco y que éste puede ser representado por una función del tipo BPR (Scheffí, 1985) de parámetros α y β , tiempo de viaje a flujo libre (*t_a⁰*) y capacidad práctica *K_a*.

$$t_a^{me} = t_a^0 \left(1 + \alpha \left(\frac{f_a + B_a}{K_a} \right)^\beta \right)$$

Calculemos ahora el tiempo total de las personas que utilizan el arco *a*. Éste corresponderá a la suma del tiempo percibido por los usuarios de Auto (*CM_{e_a}*) multiplicado por el número de usuarios de Auto (ηf_a donde η corresponde a la tasa de ocupación de los Autos) y el tiempo percibido por los usuarios de Bus (λt_a^{me} donde λ corresponde a un factor relacionado con el tiempo adicional que requiere cada Bus debido a sus características operacionales y tiempo de subida y bajada de pasajeros) multiplicado por el número total de usuarios de modo Bus en el arco *a* (*p_a*). Factorizando, es posible obtener la siguiente expresión para el tiempo total de las personas que ocupan el arco *a*:

$$t_a^{TOT} = t_a^{me} (\eta f_a + \lambda p_a)$$

Asumiendo que el flujo de Autos en el arco *a* es independiente del flujo de Buses equivalentes en el arco *a*, el tiempo marginal tendría dos componentes: una para usuarios de Autos y otra para los usuarios de Buses. Desarrollando primero el tiempo marginal de los usuarios de Auto, se obtiene lo siguiente

$$\frac{1}{\eta} \frac{\partial t_a^{TOT}}{\partial f_a} = \underbrace{t_a^0 \left(1 + \alpha \left(\frac{f_a + B_a}{K_a} \right)^\beta \right)}_{\text{Costo Medio Percibido Auto}} + \underbrace{f_a t_a^0 \left(\frac{\alpha \beta}{K_a} \right) \left(\frac{f_a + B_a}{K_a} \right)^{\beta-1}}_{\text{Externalidad Auto}} + \underbrace{\frac{\lambda}{\eta} p_a t_a^0 \left(\frac{\alpha \beta}{K_a} \right) \left(\frac{f_a + B_a}{K_a} \right)^{\beta-1}}_{\text{Externalidad Usuarios Bus}} \quad (2)$$

Efecto en Usuarios Auto Usualmente Considerado
Efecto en Usuarios Bus Usualmente No Considerado

Con esto, la diferencia entre un modelo tradicional, donde sólo se asignan Autos con el enfoque considerado en este trabajo, se puede resumir en la aparición del último término a la derecha en la expresión (2).

El último término de la derecha corresponde al efecto que una persona adicional utilice el modo Auto en el arco *a*, tiene en el tiempo experimentado por los usuarios de Bus del arco. Este término va a ser positivo y muy importante para arcos con alto flujo de pasajeros de Bus. Esto significa que las tarifas óptimas para vehículos livianos calculadas de la forma indicada en (1) serán en este caso más grandes para los arcos que tienen muchos Buses o, equivalentemente, que el flujo óptimo de Autos en dichos arcos será mucho menor a lo considerado habitualmente.

A continuación, queda por calcular el tiempo marginal de los usuarios de Bus, el cual, asumiendo que los tiempos son separables por arco, podría expresarse de la siguiente forma:

$$\frac{\partial t_a^{TOT}}{\partial p_a} = \underbrace{\lambda t_a^{me}}_{\text{CMedio Percibido Bus}} + \underbrace{\eta f_a t_a^0 \left(\frac{\alpha \beta}{K_a} \right) \left(\frac{f_a + B_a}{K_a} \right)^{\beta-1} \frac{\partial B_a}{\partial p_a}}_{\text{Externalidad Autos}} + \underbrace{\lambda p_a t_a^0 \left(\frac{\alpha \beta}{K_a} \right) \left(\frac{f_a + B_a}{K_a} \right)^{\beta-1} \frac{\partial B_a}{\partial p_a}}_{\text{Externalidad Bus}} \quad (3)$$

En general, no es sencillo desarrollar analíticamente la derivada del flujo de Buses equivalentes en el arco respecto del flujo de pasajeros en Bus debido a que:

- La derivada no es separable entre arcos. El cambio en un arco puede afectar a otros, por lo que en rigor habría que considerar simultáneamente el conjunto de los arcos de la ruta modificada.
- La derivada es discreta. Si las líneas de Bus no están llenas, el aumento de flujo de pasajeros tendrá un efecto nulo en el flujo de Buses, es decir, la derivada será igual a cero. Sólo si las líneas se encuentran a capacidad el aumento en el flujo de pasajeros se traducirá en una derivada no nula.
- No es claro como repartir el efecto de un cambio en el flujo del arco entre las diversas líneas de Bus que lo sirven. Si hay varias líneas a carga máxima, no es claro cual debe afectarse. Podría ser que el flujo adicional fuese a las líneas descargadas de forma tal que, incluso si existen líneas a carga máxima la derivada “real” fuese igual a cero.

Una alternativa para obtener expresiones cerradas para esta derivada podría ser realizar algunos supuestos simplificadorios sobre la operación del sistema de Buses, tal como en Fernández, et al. (2005), donde los autores consideran una tasa de embarque fija; el análisis es circunscrito a un corredor con un esquema de operación simplificado; y que la asignación de los pasajeros entre las líneas de Bus es determinística.

Otra alternativa podría ser simular todas las interdependencias presentes en un sistema de esta complejidad, de forma tal que la expresión (3) pueda ser calculada para cada situación individualmente. Incluso en este escenario, desarrollar criterios que permitan transformar un fenómeno que ocurre al nivel de secuencias de arcos parcialmente superpuestos a uno separable por arcos, representa un desafío considerable. El desarrollo de este enfoque excede el propósito y alcance del presente trabajo, pero representa sin duda un muy interesante paso siguiente en la investigación.

En cualquier caso, en la práctica, los dos términos de externalidad descritos en la expresión (3) serán casi siempre iguales a cero y luego, en general, su efecto podría ser despreciado o, al menos, se puede estar seguro de que debiera mucho más pequeño que su equivalente en los Autos. Consideraremos este último supuesto en el ejemplo de simulación que se muestra más adelante en la sección 3.

Otro aspecto a recalcar es que, en la realidad, la utilización del modo Bus contempla, además del tiempo de viaje, el tiempo de acceso, el de espera y el de egreso. Si el sistema de Buses no se va adaptando a la demanda, la consideración de estos tiempos adicionales se reduciría a la inclusión de un término aditivo en la parte correspondiente al tiempo percibido de la expresión (3) y algún efecto adicional al lado derecho en caso de que la restricción de capacidad de los Buses sea activa, pues ello causará que un aumento en la demanda de pasajeros de Bus aumente el tiempo de espera de todos los usuarios. En caso que el sistema de Buses se adapte a la su demanda, debiera por el contrario esperarse una disminución en la externalidad debido a que al aumentar la densidad de los servicios y su frecuencia, para satisfacer el aumento de la demanda, tanto el tiempo de espera como el de acceso y egreso debieran disminuir.

Finalmente, cabe recalcar que para transformar la externalidad descrita en (2) y (3) en tarifa, es necesario multiplicarla por el VST y, además de tener en cuenta la diferencia de ingreso de los usuarios, habría que considerar las diferencias en la percepción del tiempo para los distintos modos, esto es, se debieran verificar, para un mismo nivel de ingreso, VST mayores (y luego tarifas mayores) para modos más incómodos como transporte público.

3. SIMULACIÓN DE UN MODELO SIMPLIFICADO

En esta sección se aplicarán los desarrollos teóricos de la sección 2 a un modelo simplificado de partición modal y asignación a la red. El modelo considera un solo par origen destino (A – B) y dos rutas (Ruta 1 y Ruta 2). La Ruta 1 considera exclusivamente Autos y la Ruta 2 contempla tráfico mixto, esto es, Bus y Auto. Las curvas flujo demora de ambas rutas son del tipo BPR descrito anteriormente y con los parámetros indicados en la Figura 1.

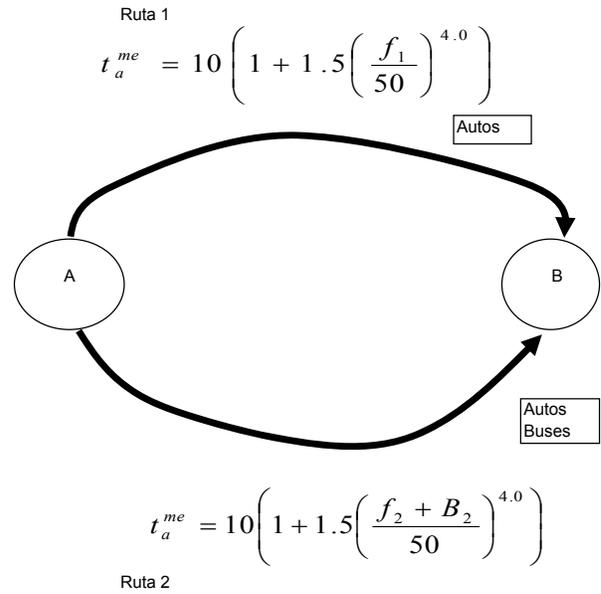


FIGURA 1: Descripción del Modelo de Oferta Utilizado

Se consideró que los usuarios maximizan una función de utilidad indirecta condicional, cuya parte determinística depende sólo del tiempo de viaje t y de espera t_e de cada modo y que cuya componente aleatoria se distribuye valor extremo (0,1). Bajo estos supuestos, el porcentaje de usuarios de cada modo en el sistema se puede determinar con el sencillo modelo logit multinomial (Ben-Akiva and Lerman, 1985) indicado en (4).

$$P_{Bus} = \frac{e^{-0.01t_{Bus} - 0.04te_{Bus}}}{e^{-0.01t_{Bus} - 0.04te_{Bus}} + e^{-0.01t_{Auto}}} \quad (4)$$

$$P_{Auto} = 1 - P_{bus}$$

La frecuencia de Buses se determina en forma iterativa como la necesaria para satisfacer la demanda del arco con vehículos con capacidad para 40 personas¹. Por su parte, el tiempo de espera se calcula como el inverso del doble de la frecuencia de Buses y el efecto de los Buses en la curva flujo demora se calcula como su frecuencia y un factor de vehículos equivalentes de 2,5. Para la determinación del tiempo que perciben los usuarios de Bus, se multiplica el tiempo de viaje en Auto por la Ruta 2 por $\lambda = 1,15$. Finalmente, se considera una tasa de ocupación de los Autos de $\eta = 1,25$.

Cabe destacar que los parámetros utilizados en el modelo de asignación y el de partición modal fueron elegidos de forma arbitraria, pero resguardando que: a) el tiempo de espera fuese valorado como cuatro veces el tiempo de viaje, b) que los parámetros de las curvas flujo demora fueran los indicados en Sheffi (1985) como habituales y 3) que para 100 personas en el sistema, la demanda por modo se distribuyera en parte iguales. Adicionalmente, se verificó que las conclusiones del estudio eran robustas a diversas familias de parámetros consideradas.

El equilibrio en el sistema se consideró como el resultado de diversas iteraciones que, para un determinado nivel de demanda en el sistema, permitieran alcanzar la consistencia entre el modelo de partición modal (4) y el de asignación (Figura 1) según el principio de Wardrop (Sheffi, 1985).

Bajo este marco se realizaron cuatro experimentos de simulación del equilibrio en el sistema considerando niveles de

¹ Con el afán de mantener el modelo lo suficientemente simple, se desechó considerar reglas de definición óptima del tamaño de flota como la regla que la define como función de la raíz cuadrada de la demanda (Jara-Díaz y Gschwendner, 2005).

demanda entre el par A-B que van desde 100 a 800² individuos. Los experimentos considerados fueron los siguientes:

- i. **Equilibrio de Usuarios (EU):** Sistema donde los usuarios de Auto se asignan a la red de forma tal que el **tiempo medio** de viaje por ambas rutas es el mismo. Este equilibrio corresponde al que se daría en forma espontánea en una red real.
- ii. **Equilibrio Sistema Autos (ESA):** Sistema donde los usuarios de Auto se asignan a la red de forma tal que el **tiempo marginal** de viaje (sin considerar el efecto en los usuarios de Bus) por ambas rutas es el mismo. Este equilibrio resulta de curvas de tiempo marginal que no consideran el último término de la derecha de la expresión (2).
- iii. **Equilibrio Sistema (ES):** Sistema donde los usuarios de Auto se asignan a la red de forma tal que el **tiempo marginal** de viaje por ambas rutas es el mismo. Este equilibrio resulta de curvas de tiempo marginal como la indicada en la expresión (2). Cabe destacar que, por el bien de la simplicidad del modelo, en este experimento se consideró que el tiempo marginal del modo Bus era igual a su tiempo medio, con lo cual de la expresión (3) solo sobrevive el primer término.
- iv. **Equilibrio Vía Exclusiva (EVE):** Equilibrio que resulta de imposibilitar el paso de Autos por la ruta 2.

En las siguientes figuras se sintetizan los principales resultados de cada experimento para los diversos niveles de demanda considerados. En la Figura 2 se muestra el flujo de personas en Auto en la Ruta mixta. Puede observarse que para el *ESA* el flujo de Autos se estabiliza por debajo de los 100 pasajeros, para el *EU* este tiende a “infinito” y **para el ES dicho flujo se hace muy pequeño**³. Esto indicaría que, para niveles “suficientemente altos” de congestión, restringir total o parcialmente el uso de vías mixtas a sólo Buses, tiende a ser un sustituto razonable del óptimo social del sistema.

En la Figura 3 se muestra la *tarifa óptima* (ecuación 1 considerando $VST=1$) en la ruta mixta. Se observa que la tarifa para el *ES* es más alta que la que se obtiene para el *ESA*. Esta diferencia se acrecienta en términos absolutos a medida que la demanda global crece, pero en términos relativos se mantiene en alrededor de un 50% superior. En la práctica, esto implica que las tarifas óptimas en arcos de tráfico mixto serían considerablemente más altas que las usualmente calculadas, lo cual podría hacerlas políticamente aún menos viables. En el caso de la ruta exclusiva de transporte privado, la tarifas de *ES* son también más altas que para el *ESA*, lo cual se explica por la sustitución de viajes en Auto de la Ruta 2 a la Ruta 1 que causa mayores niveles de congestión en esta última.

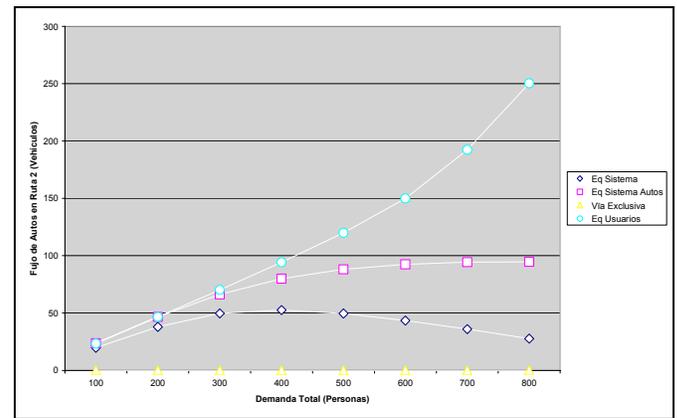


FIGURA 2: Flujo de Autos en Ruta Mixta

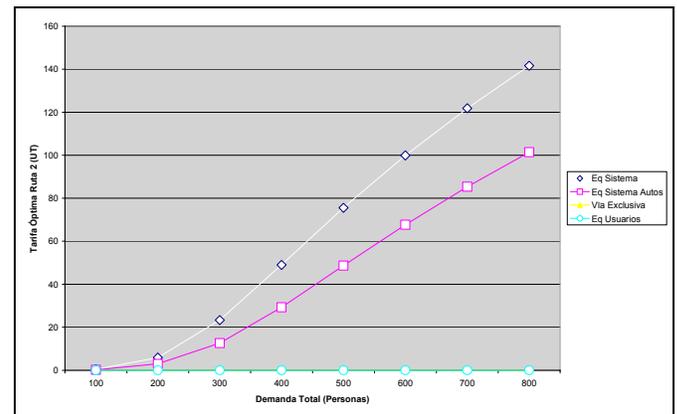


FIGURA 3: Tarifa Óptima Ruta Mixta

Por otra parte, para este ejemplo sencillo con sólo dos rutas que a la vez son arcos independientes, es posible lograr una asignación óptima cobrando tarifas más bajas que las calculadas en ambos arcos. En efecto, como puede verse en la Figura 1, si para la ruta con mayor tarifa óptima se cobra la diferencia entre las tarifas óptimas; y en la ruta alternativa no se cobra, el equilibrio que se obtendría sería el mismo. Este caso especial es irrelevante en redes reales donde diversas rutas comparten arcos, con lo cual la única alternativa corresponde a cobrar la tarifa óptima calculada a nivel de arcos. Sin embargo, resulta interesante constatar que en el caso del *ESA*, el diferencial de tarifa debía ser cobrado sólo en la Ruta 1 y que para *ES*, éste debía ser cobrado en la Ruta 2 y que su valor resultaba ser varias veces superior que el de *ESA*.

En la Figura 4 se observa que la partición modal del Bus para *ES* es muy superior a la de *EU* y que la de *EVE* en cambio es la que más se le acerca. Se observa que bajo una demanda de aproximadamente 450, la partición del Bus de *EVE* es ligeramente superior a la de *ES*, orden que se revierte a partir de dicho punto. Esto último se explica porque, para *ES*, ambas rutas de Auto están tarifadas a tiempo marginal con lo cual, si hay mucha congestión, la Ruta 1 estará tarifada a un valor muy alto haciendo el Auto menos atractivo.

2 Se consideró este límite pues, para el esquema utilizado, sobre 800 individuos el experimento EU no tiene solución.

3 No es posible asegurar con este modelo que efectivamente tienda a cero.

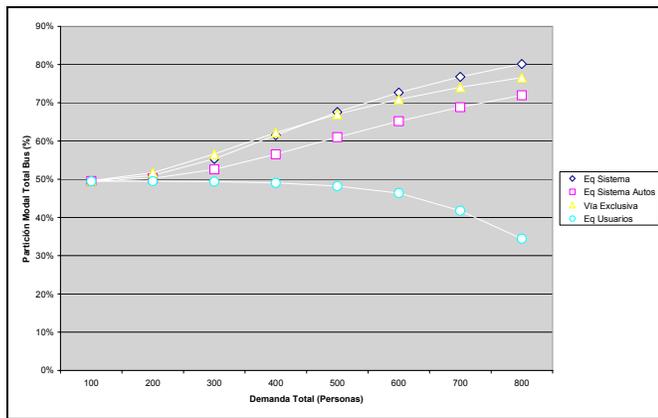


FIGURA 4: Partición Modal Bus

Finalmente, en la Figura 5 se compara el tiempo de viaje y espera que experimentan en promedio los usuarios del sistema para los diversos equilibrios considerados y como función de la demanda. Para exponer mejor los efectos considerados, la figura considera sólo la demanda que va desde los 400 a los 700 individuos.

Se observa que el tiempo promedio en el sistema para cada nivel de demanda es siempre menor para el *ES*. Para flujos altos el *EU* consume una mayor cantidad de recursos, impacto que aumenta exponencialmente con la demanda. Por otra parte, recién sobre una demanda de aproximadamente 420 *EVE* resulta mejor que *EU*. Además, sobre una demanda de aproximadamente 640 *EVE* resulta incluso mejor que *ESA*, transformándose en la más cercana a *ES*.

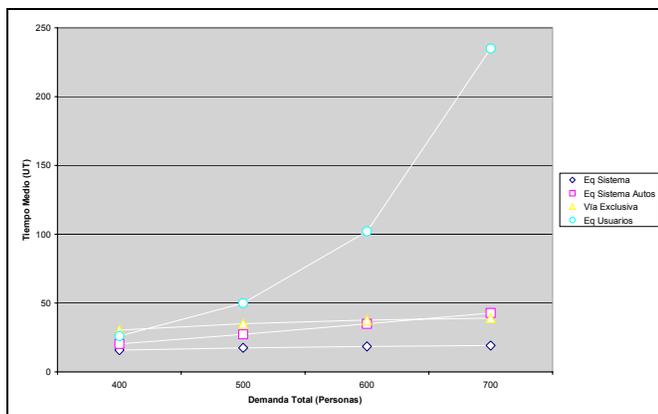


FIGURA 5: Tiempo Usuarios

4. IMPLICANCIAS DE POLÍTICA DE TRANSPORTE

Resumiendo, la investigación desarrollada permite identificar algunos lineamientos concretos para implementar políticas de transporte. Tal como se observa la Figura 5, la asignación de tiempos marginales o, equivalentemente a tarifas óptimas (*ES*), resulta ser socialmente más eficiente que todas las alternativas analizadas. Sin embargo:

- i. Las tarifas óptimas son mucho más elevadas que lo usualmente calculado (Figura 3)

- ii. La opción de especializar una vía para transporte público se acerca bastante a la tarificación óptima (Figura 2, 4 y 5) especialmente respecto del flujo óptimo de Autos en la ruta mixta (Figura 2), el cual se acerca a cero.
- iii. El cálculo práctico de las tarifas óptimas es aún más complejo que lo usualmente considerado (Sección 2)

Adicionalmente, se observa que las aplicaciones prácticas de tarificación por congestión distan mucho de una tarifa óptima por arco. Por ejemplo, en Singapur se tarifica en determinados horarios una zona central además de ciertos ejes en los cuales la tarifa se determina por exploración práctica hasta el punto en el cual se alcance una velocidad considerada como “aceptable”. En Londres en cambio sólo se tarifica una zona central durante todo el día y la tarifa utilizada corresponde en la práctica a la tarifa políticamente “aceptable” que permita producir reducciones significativas en la congestión.

En consecuencia, es posible afirmar que un buen sustituto para la tarificación óptima de sistemas de transporte, tanto desde el punto de vista político (en cuanto al resistencia de los votantes y de los recursos económicos involucrados) y el teórico, podría ser la especialización generalizada de vías mixtas para el uso de transporte público en la ciudad. Mejor aún, si acaso se pudiera, en vez de hacer exclusivos algunos ejes, tan solo especializar **algunas pistas** de muchos ejes de la ciudad para el uso de Buses y tan solo **en los horarios y lugares donde se observe congestión**, se lograría una representación mucho más precisa de la asignación socialmente óptima (ver Figura 2 donde el flujo de Autos para *ES* no es nulo y la Figura 5 donde se aprecia que la segregación es conveniente sólo a partir de cierto nivel de congestión hacia arriba).

Es más, la implementación práctica de una medida como la última descrita es perfectamente posible. Hace varios años que se viene aplicando en la ciudad de Londres en gran número de ejes y para diferentes horarios. Un aspecto destacable de esta experiencia es que se introdujo una innovación crucial en la coerción (*enforcement*) necesaria para que los Autos cumplan con la segregación impuesta, la cual corresponde a poner cámaras en el frente de los Buses que permiten fácilmente identificar la patente de los infractores en el momento y lugar en que éstos causan más conflictos (Briones, 2006).

Cabe destacar que la medida propuesta **no corresponde a la construcción de infraestructura “dura” especializada para transporte público** como lo que se está haciendo actualmente en vías de la ciudad de Santiago como Santa Rosa. La diferencia está es que en esos casos, se reemplazan dos pistas de uso mixto por dos exclusivas de Auto y una o dos exclusivas de Bus, lo cual claramente no restringe (sino que aumenta) la capacidad disponible para los Autos, sin considerar los elevados recursos monetarios, de tiempo de implementación, expropiaciones y urbanísticos que dicho tipo de infraestructura conlleva.

Finalmente, si bien no es posible mediante el experimento realizado en este trabajo determinar fehacientemente cuándo el nivel de congestión es suficientemente alto para justificar la especialización de vías para Buses, es interesante notar que, para los datos considerados, desde el punto en el cual **el tiempo de EU es 3 veces superior al tiempo a flujo libre**, la medida de especializar la vía para Bus resulta socialmente más conveniente que el *EU*. Este límite debe considerarse sólo como una referencia que deberá ser refrendada en etapas futuras de la investigación en que se simule un sistema de transporte urbano real. Sin embargo, mediante el modelo simplificado utilizado en esta investigación pudo verificarse que el resultado anterior era bastante robusto a diversas familias de parámetros consideradas.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza la tarifa óptima por congestión en sistemas mixtos (Auto y Bus) aplicando el marco conceptual descrito a algunos experimentos de simulación que permiten ilustrar diversos efectos identificados. Se concluye que la tarifa óptima por congestión para los Autos debiera ser más alta que la usualmente calculada, y que, consecuentemente, se traduciría en flujos óptimos de Autos que tienden a cero.

Estos resultados podrían interpretarse como una justificación para la segregación de vías para Transporte Público de la forma en que actualmente se hace la ciudad de Londres donde, sin necesidad de inversiones cuantiosas en infraestructura, se especializan para Bus vías existentes, la cuales con fiscalizadas mediante cámaras en los mismos Buses (Briones, 2006). Se pone en duda además el precepto de que, para cualquier nivel de flujos, existe una tarifa “razonable” para la cual los Autos que se desplazan por la ciudad percibirían todos los costos que producen. Se observa en cambio que, en casos de alta demanda, el óptimo correspondería a un escenario donde prácticamente no transiten Autos. Esto es concordante con el hecho de que, en presencia de congestión, el Auto es un bien “socialmente inferior”, en el sentido que, en la medida que sea posible, siempre será preferible sustituir viajes en Auto por viajes en Bus.

Por otra parte, se concluye también que las tarifas requeridas para llegar al óptimo del sistema vía sólo tarificación vial, no solo son un 50% más altas, sino que también aún más complejas de calcular y de implementar en la práctica que lo usualmente considerado. Este resultado refuerza el atractivo de la política de pistas sólo Bus y sugiere dejar el cobro de tarifas relativamente bajas y planas (no óptimas) a los Autos, como una herramienta complementaria para permitir la operación de un sistema de Autos y Carga con velocidades “aceptables”, tal como implícitamente se hace en todas las aplicaciones prácticas donde la tarificación vial a sido implementada en forma exitosa.

Finalmente, debe desatacarse que para tener mayor certeza con los órdenes de magnitud numéricos discutidos en esta investigación, este enfoque debiera ser primero implementado en un modelo calibrado con datos reales. Adicionalmente, sería beneficioso fortalecer el análisis considerando costos operacionales o de flota como en Jara-Díaz y Gschwender (2005); o la modelación de la posesión de Auto, impuesto a los combustibles entre otros, como de Borger and Meyer (2005). Más importante aún, sería interesante reconsiderar el concepto de equilibrio del sistema utilizando para ello la maximización del beneficio de los usuarios en vez de la minimización del tiempo total en el sistema. En cualquier caso, la hipótesis es que ante dichas eventuales mejoras, las conclusiones principales del presente trabajo debieran seguir siendo válidas.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a Reinaldo Guerra, Antonio Gschwender y un árbitro anónimo por valiosos comentarios que permitieron mejor importantemente versiones previas de este artículo. Posibles omisiones o errores recaen naturalmente en mí.

REFERENCIAS

Briones, J. (2006) **Fiscalización de Pistas Sólo Bus con Cámaras y Uso de “BUS PRE-SIGNALS”**: Aplicación en Londres y Algunas Ideas Para Santiago. Documento De Trabajo SECTRA.

De Borger, B. y I. Meyer (2005) Optimal Taxation of Car Ownership, Car Use and Public Transport: Insights derived From Discrete Choice

Numerical Optimization Model. **Working Paper** 2004-021, University of Antwerp, Faculty of Applied Economics, Belgium.

Fernandez, J.E., J. de Cea y L. de Grange (2005) Production costs, congestion, scope and scale economies in urban bus transportation corridors; **Transportation Research Part A**, 39, 383–403

Huang, H.J. (2000) Fares and Tolls in a Competitive System with Transit and Highways: The case with two groups of commuters. **Transportation Research**, part E 36, 267-284

Jara-Díaz S. y A. Gschwender (2005) Making Pricing Work in Public Transport Provision. **Handbook of Transport Strategy, Policy and Institutions**. Bulton and Hensher Editors.

Jara-Díaz, S. R. y A. Guevara (2003) Behind the subjective value of travel time savings: the perception of work, leisure and travel from a joint mode choice - activity model. **Journal of Transport Economics and Policy** 37, 29-46.

Mogridge, M. y D. Holden (1987) A panacea for road congestion? – A Riposete. **Traffic Engineering and Control**, 28, 13-20.

Sheffi, Y. (1985) **Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey

Small, K. (1983) The incidence of Congestion Tolls in Urban Highways. **Journal Of Urban Economics**. 13, 90-111.

Viton, P. (1983) Pareto Optimal Urban Transportation Equilibria. **Research in Transportation Economics**, Vol. 1, Keeler, T.E Eds, JAI Press, Greenwich, Conn., 75-101.