Artículo de investigación

Modelación de frecuencia y tamaño de transporte público bajo internalización de costos de usuarios

Modelling of frequency and size of the public transportation on internatiolization of cost to users

Armando Pérez Delgadillo[1*], **Ramón Mata Peña**[2]

[1*]Mtro. Armando Pérez Delgadillo.
Universidad Anáhuac de Oaxaca. Blvd. Guadalupe Hinojosa de Murat No. 1100.
San Raymundo Jalpam, Oaxaca de Juárez Oaxaca. C.P. 71248. Teléfono: 951 157 1027

[2]Mtro. Ramón Mata Peña.
Universidad Anáhuac de Oaxaca. Blvd. Guadalupe Hinojosa de Murat No. 1100.
San Raymundo Jalpam, Oaxaca de Juárez Oaxaca. C.P. 71248. Teléfono: 951 100 9691

Historia del artículo. *Recibido: 10 de febrero 2023; aceptado: 10 de abril 2023.*

Correo electrónico de autor para correspondencia: * *armando.perezd@anahuac.mx* , *ramonmatapena@gmail.com*

Para Citar este artículo (estilo APA): Pérez A. & Mata R. (2023). Modelación de frecuencia y tamaño de transporte público bajo internalización de costos de usuarios. *Transitare Edición Especial 2023 (1):* 7-17.

Resumen

El problema de transporte ha sido un tema en la agenda pública del gobierno, los efectos adversos de la ineficiencia causan impactos temas ambientales, administrati sentativo para observar los desvíos en la internalización de los costos derivados del congestionamiento vehicular y la espera de transporte para el usuario en el proceso productivo de las líneas de transporte. Se observa que existe un sesgo en frecuencias y tamaños de autobús que podrían ayudar a mejorar la situación del sistema de transporte público.

Términos clave: frecuencia de transporte; tamaño de transporte; solución a externalidades; problema de optimización

Abstract

The transportation problem has been a central issue in the goverment public agenda, the adverse effects caused by inefficiency provoke impacts to the environment, management and economics. We model based in a Generic Mobility Law Regulation and a Representative Transport Law in order to observe detours in the cost internalization of the traffic congestion and the wait time of the transport use on the line transport. We found there is a bias in frequencies and sizes of the buses that might help to improve the transport public system.

Keywords: transport frequency; transport size; externalities solution; optimization problem

1. Introducción

El tráfico en las zonas urbanas genera problemas de movilidad tales como la congestión vehicular, contaminación del aire, ruido y accidentes; es claro que ante estos problemas surge la necesidad de crear o mejorar la infraestructura de transporte.

A la par de la creación de problemas ambientales surgen problemas económicos y administrativos que conllevan al gasto excesivo de combustible, que bajo circunstancias favorables de bajo congestionamiento vehicular se reduce, al igual que se incrementa la eficiencia en los tiempos de transporte y se observa una reducción en el costo social de movilidad urbana.

Una solución a estos problemas se basa en mejorar el funcionamiento del transporte público, lo que volcaría a la demanda de transporte privado al uso eficiente de las líneas de transporte. Esto reduciría significativamente el congestionamiento y el costo social, i.e. el tiempo de espera y de viaje de un punto a otro por parte de los pasajeros, etc. Estos costos son fácilmente reflejados en términos nominales y pueden añadirse a los costos de producción del servicio y contabilizarse en el precio de oferta.

Por otro lado, el sistema de transporte público, *per se,* es una manera eficiente de eliminar dicha externalidad por las características que *debería* brindar:

i. Seguridad,

ii. ahorro de espacio por agente transportado,

iii. ahorro de combustible en la media, ergo

iv. menor impacto ambiental por usuario, y

v. aumentos en la equidad económica-social debido al acceso a la movilización, por parte de los decíles de la población con más bajo ingreso, obviamente con las implicaciones que esto acarrea.

A priori, podríamos argumentar una serie de problemas que contribuyen a la génesis de la ineficiencia en la red de transporte:

a. Estructura de fijación de precios: Podríamos pensar, que los precios actuales del transporte urbano no reflejan los costos marginales sociales del transporte; primero porque los precios, por lo regular, no logran reflejar el costo marginal de las externalidades provocadas por la red, e.g. congestiones, tiempo de espera, tiempo de viaje, etc.; y segundo, porque la mayoría de las veces los servicios públicos (y específicamente hablando del transporte) reciben subsidios no justificados. Obviamente, la existencia de este argumento no implica que los precios sean erróneos, pero claramente se pueden mejorar mediante la inclusión de los conceptos arriba mencionados.

b. Frecuencia y tamaño de transporte: Del punto anterior podríamos extraer que la tarifa óptima no es la actual, por lo que argumentamos *una relación negativa entre el precio correcto y la frecuencia óptima de las líneas,* las implicaciones de este hecho eliminan la eficiencia buscada de manera obvia, i.e. un precio diferente al relevante (óptimo) hará que los tiempos de espera se hagan más largos. *La frecuencia óptima provee de una relación inversa con respecto al tamaño del transporte,* i.e. más frecuencia menos tamaño, las implicaciones son claras (e.g. más tamaño, menos fluidez de tránsito).

c. Estructura de la industria (colusión de proveedores del servicio): la estructura de fijación de precios bajo colusión posibilita dos ineficiencias[1] importantes; primero, un precio por encima del óptimo (esto es lo contrario a lo que se supone en el inciso a.); segundo, una provisión de servicio menor a la solicitada o a la de equilibrio (lo cual provocará un número importante de demanda insatisfecha e incremento de desigualdad económica-social). El análisis de competencia es casi imposible debido a que este debe ser analizado con autorización de los coludidos. Se elimina del estudio por dichas razones.

d. Infraestructura del servicio (calidad de calles). La infraestructura del servicio guarda una relación directa con la frecuencia de provisión, e.g. a mayor índice de estabilidad de infraestructura, mayor frecuencia. Sin embargo, el índice varía estacionalmente por lo que eliminaremos este rubro del análisis formal.

Para el análisis propuesto se observará únicamente a la red de transporte urbano caracterizado por autobuses de rutas en la mancha urbana y conurbada. Esto simplificaría el análisis eliminando así la heterogeneidad en la estructura de costos. Si bien es cierto, que la falta de existencia de una ruta óptima es generadora de ineficiencias en la red de transporte, esta saltará a la luz mediante la comprobación del inciso a y b. ¿Por qué? Estas variables deben ser analizadas, la estructura de las rutas en la red de transporte (ut supra mencionado) y la frecuencia y el tamaño del transporte (inciso b); podemos argumentar que el diseño de estas, básicas para diseñar una red eficiente, depende de la manera en que se tomen en cuenta a los costos de los usuarios.

Son los costos de los usuarios que hacen que los costos sociales promedio caigan ante la demanda de servicio, esto lógicamente genera una tarifa que se ubica por debajo de los costos promedio de los productores del servicio. Lo que podría sugerir que el diseño óptimo se ve distorsionado por la imposición de un nivel tarifario no óptimo.

Se debe tomar en cuenta que los recursos centrales de los usuarios son básicamente los costos que se basan en el valor monetario de sus viajes en términos del tiempo, i.e. la espera, tiempo de ascenso-descenso y tiempo de viaje; suponemos que el tiempo de espera cae en tanto la demanda (Y) aumenta si la frecuencia se adapta óptimamente, de la misma manera podemos decir que si hay incrementos en Y existirá un cierto tipo de densificación del sistema, ergo una reducción del tiempo de ascenso-descenso, pero un incremento en el tiempo de viaje. Por otro lado, los productores del servicio requieren insumos indexados a los costos operacionales y de capital, es razonable suponer que estos costos bajen en tanto la demanda crezca.

[1] De hecho, la asignación resultante bajo colusión genera unidades de producción inframarginales que provocan a su vez que la asignación mencionada sea ineficiente en el sentido de Pareto.

2. El modelo

La literatura ortodoxa en este rubro dice que los efectos que tiene la demanda sobre el tiempo de espera y el tiempo de ascenso - descenso dominan a los efectos contrarios, i.e. que la suma de los costos de productores y usuarios producen un costo total que crece menos que proporcional que la demanda. Esto quiere decir simplemente que el total de los costos medios caen con Y, lo que implica que existen economías de escala.

Si estas últimas existen, entonces el costo medio total Cme_T es mayor al costo marginal total Cme_T; como sabemos, el precio óptimo debe ser igual al Cme_T en competencia perfecta, por lo que la tarifa óptima del transporte público debe obtenerse al eliminar del costo marginal total el valor monetario del tiempo de los usuarios en términos medios, i.e. el costo medio de los usuarios Cme_U :

$$p^* = Cmg_T - Cme_U \quad \text{...(i)... [Ec. 1]}$$

Se sabe que la suma de los costos medios de ambos agentes (productor y usuario) serán los costos medios totales.

$$Cme_P + Cme_U = Cmg_T \quad \text{...(ii)... [Ec. 2]}$$

Por el supuesto de existencia de economías de escala sabemos la elasticidad del costo con respecto a la producción debe ser estrictamente menor que la unidad, i.e. existen economías de escala cuando el costo de producir un único producto decrece con el número de unidades producidas, si se define a la elasticidad costo de la producción como $\varepsilon_e \equiv \frac{\frac{dC}{dy}}{\frac{C}{y}}$ la existencia de economías de escala implica que $\varepsilon_e < 1$.

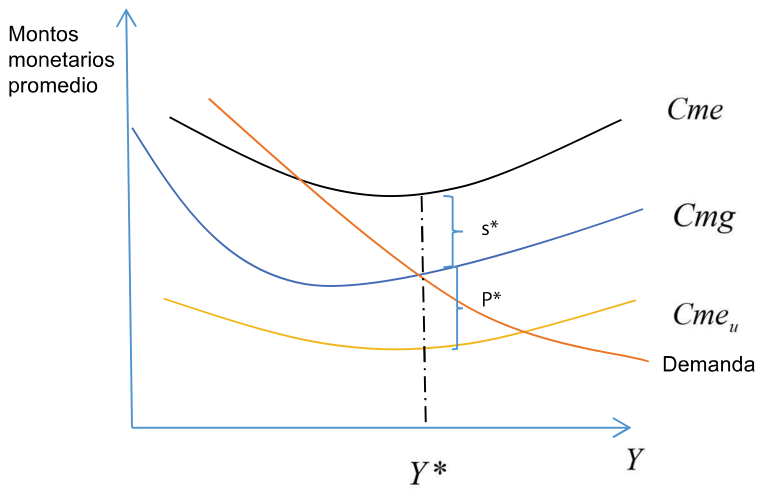
Se define entonces a $\frac{dC}{dy}$ como el costo marginal y a $\frac{C}{y}$ como el costo medio de producir y unidades de producción, por lo que $\frac{Cmg}{Cme} < 1$ ergo $Cmg < Cme$ de (ii) se obtiene que $Cme_U = Cme_T - Cme_P$ y se sustituye en (i) $P^* = Cmg_T - \left[Cme_T - Cme_P\right]$ se arregla los términos y se concluye exactamente lo que *ut supra* mencionamos

$$P^* - Cme_P = Cmg_T - Cme_T \quad \text{...[Ec. 3]}$$

Como ya se ha mencionado, el costo marginal es menor que el costo medio por lo que la parte derecha de la igualdad es estrictamente negativa y luego también la izquierda, i.e. que la tarifa del transporte público se encuentra impuesta por debajo de la media de costos del productor, por lo que debería existir un término extra s^* que debería cubrir los costos de producir el servicio, e.g. subsidio, cobro extra, etc., por lo que si se supone competencia perfecta obtenemos.

$$s^* = \left| P^* - Cme_p \right| = \left| Cmg_T - Cme_T \right| \text{...[Ec. 4]}$$

Gráfica 1: Montos Promedio



Nota: Elaboración propia de Montos monetarios promedio vs. Producción

Fuente: Elaboración propia de Montos monetarios promedio vs. Producción.

Véase en la gráfica 1: la relación entre el subsidio y la tarifa óptima, la distancia vertical al punto donde la oferta se intersecta con la demanda. Como al fin y al cabo lo que estamos pretendiendo es crear un análisis sobre la relación existente entre el diseño, los precios y costos, entonces lo más lógico es que se trate de exponer analíticamente las características del sistema de transporte que conlleve a obtener las curvas de la gráfica 1, i.e. la tecnología, en este caso particular: frecuencia y tamaño de la unidad de transporte.

Para poder establecer este vínculo se modela primariamente una ruta aislada y circular, i.e. comienza y termina en un mismo punto sin pérdida de generalidad. La línea está compuesta de K kilómetros, requerida por una cantidad de Y usuarios por hora y que se distribuyen homogéneamente a lo largo de la ruta, cada uno de estos usuarios recorren una distancia

$k \in [0, K]$. Podemos definir al tiempo en que tarda un autobús en completar una vuelta a la ruta o completar un ciclo

$$\tau = T + t\frac{Y}{f} \text{ ...[Ec. 5]}$$

Donde el tiemplo del ciclo τ, se puede observar como una relación entre el tiempo en que pasa en movimiento el autobús *T*, el tiempo promedio en que tarda en ascender-descender un usuario al vehículo *t* y la relación existente entre la cantidad de usuarios por hora *Y* la frecuencia *f.* ¿Cómo podemos medir *f* ? pues simplemente como el ratio existente entre el número de autobuses disponibles para la ruta (*N*) y el tiempo del ciclo, a decir

$$f = \frac{N}{\tau} \text{ ...[Ec. 6]}$$

Si sustituimos está última en τ, obtenemos

$$\tau = T + t\frac{Y}{\frac{N}{\tau}} \rightarrow \tau = T + \frac{tY\tau}{N} \rightarrow \tau\left(1 - \frac{tY}{N}\right) = \tau\left(\frac{N - tY}{N}\right) = T \rightarrow \tau N - \tau tY = NT$$

Y resolvemos para *N*

$$N = fT + tY \text{ ...[Ec. 7]}$$

Si se piensa también, que el costo de productor por hora del servicio c guarda una relación lineal con respecto del tamaño del vehículo *A*. Se puede suponer una forma

$$c = c_0 + c_1 A \text{ ...[Ec. 8]}$$

Con $c_i > 0$ constante $\forall i = 0,1$. Donde el primer término muestra un componente fijo y el segundo es un factor que muestra la sensibilidad del costo con respecto al tamaño del vehículo, es obvio que $\frac{\partial c}{\partial A} > 0$; aunque el tamaño del autobús impacta positivamente en los costos es claro que deber existir también una relación positiva con las ganancias. En el supuesto que $\exists$ un vector de precios $p = [p_e, p_a]$ donde representan el valor del tiempo por esperar y de viajar en el autobús, respectivamente, entonces podemos definir una función que represente el valor total de los recursos utilizados del tipo:

$$C(\bullet) = N[c_0 + c_1 A] + p_e \beta \frac{Y}{f} + p_a \frac{K}{k} \tau Y \text{ ...(iii) …[Ec. 9]}$$

Con $\beta = [0,1]$.

Es claro observar que el primer término de la función es el recurso destinado a cubrir el costo de los productores de servicio, a decir que estamos multiplicando la cantidad de autobuses por el costo relacionado con su operación y el capital. El segundo y tercer término son los recursos propiedad del usuario que se relacionan con el tiempo de espera y el tiempo que pasan en los autobuses; cabe mencionar que no se está añadiendo el costo de ascenso-descenso debido a que no es una variable, este se incluirá implícitamente. También se supone que el término del costo de esperar es una fracción β del inverso de la frecuencia. Introduciendo al análisis las definiciones de τ y N en (iii) se obtiene a la función de recursos utilizados como función de la frecuencia, i.e.

$$C(\bullet) = [fT + tY][c_0 + c_1 A] + p_e \beta \frac{Y}{f} + p_a \frac{K}{k}\left[T + \frac{tY}{f}\right] Y \text{ ...(iii') …[Ec. 10]}$$

Se debe aclarar que esta función brinda información completa sobre el vínculo existente entre la frecuencia, los costos de los productores y los usuarios, i.e. un incremento en la frecuencia aumenta el costo de los productores, pero reduce el de los usuarios. Por otro lado, también brinda información sobre el tamaño del vehículo, sin embargo se omitirá debido a que debe ser suficiente como para acomodar a cierto número de usuarios

$$a(f) = \frac{Y}{f}\frac{k}{K} \text{ ...[Ec. 11]}$$

En el supuesto que $\exists$ un vector $[f^*, K^*]$ tal que minimiza la función (iii'), por lo que el planteamiento se puede observar cómo sigue

$$\min_{\{K,f\}} C(\bullet) = [fT + tY][c_0 + c_1 A] + p_e \beta \frac{Y}{f} + p_a \frac{K}{k}\left[T + \frac{tY}{f}\right] Y \text{ ...(iv)}$$

Sujeto a $a(f) \leq A$

Al resolver las condiciones de primer orden para frecuencia y tamaño de vehículo se obtiene los valores óptimos

$$f^* = \sqrt{\frac{Y}{Tc_0} \frac{1}{\left[\beta p_e + tY \frac{k}{K}\left(p_a + c_1\right)\right]}} \text{ ... (R1)}$$

$$A^* = \frac{k}{K}\sqrt{Tc_0 Y \frac{1}{\left[\beta p_e + tY \frac{k}{K}\left(p_a + c_1\right)\right]}} \text{ ... (R2)}$$

Al sustituir (R1) y (R2) en la función (iii') y dando un valor específico a β por simplicidad, e.g. $\beta = \frac{1}{2}$, obtenemos la función de costos

$$C^*_{\min} = tc_0 Y + 2\sqrt{c_0 TY\left[\frac{p_e}{2} + tY\frac{k}{K}\left(p_a + c_1\right)\right]} + TY\frac{k}{K}\left[p_a + c_1\right] \text{ ...(R3)}$$

Si se define el costo total medio $Cme_T \equiv \frac{C}{Y}$, sucede que si aumenta el número de pasajeros Y el costo medio se reduce tal como se había mencionado anteriormente, entonces el costo medio total se puede calcular

$$Cme_T = tc_0 + 2\sqrt{c_0 T\left[\frac{p_e}{2Y} + t\frac{k}{K}\left(p_a + c_1\right)\right]} + T\frac{k}{K}\left[p_a + c_1\right] \text{ ...(R4)}$$

¿Qué pasaría si en este análisis no se internalizaran los costos indirectos de los usuarios? Probablemente los resultados en comparativa arrojarían más información de la que actualmente ya poseemos. El problema de optimización quedaría así

$$\min_{\{K,f\}} C(\bullet) = [fT + tY][c_0 + c_1 A] \text{ ...(v)}$$

Sujeto a $a(f) \leq A$

Una vez más, al solucionar las condiciones de primer orden las soluciones serían:

$$f^{**} = Y\sqrt{\frac{tc_1}{Tc_0}\frac{k}{K}} \quad ...(R5)$$

$$A^{**} = \sqrt{\frac{Tc_0}{tc_1}\frac{k}{K}} \quad ...(R6)$$

$$C_{\min}^{**} = Y\left[\sqrt{\frac{Ttc_1}{c_0}} - t\right]\left[c_0 + \sqrt{\frac{Tc_0c_1}{t}\frac{k}{K}}\right] \quad ...(R7)$$

$$Cme_T = \left[\sqrt{\frac{Ttc_1}{c_0}} - t\right]\left[c_0 + \sqrt{\frac{Tc_0c_1}{t}\frac{k}{K}}\right] ...(R8)$$

Esta solución vuelve muy simple al análisis, la frecuencia óptima para este caso sólo es proporcional al número de pasajeros y el tamaño óptimo no depende de *Y*, i.e. los productores del servicio de transporte público sólo ajustarían su frecuencia ante variaciones de *Y*. Por otro lado, el costo medio total no depende del número de pasajeros, la curva se vuelve completamente plana.

Si se compara (R1) con (R5) se puede constatar que sólo se igualan en $Y = 0$ y después siempre se observa que $f^* > f^{**}$ $\forall Y > 0$. i.e. el problema que contabiliza los costos de los usuarios permite que la frecuencia sea más alta que aquel que no.

Ahora la comparación de (R2) y (R6) permite observar que para cualquier punto de Y, $A^{**} > A^*$, i.e. siempre existirá un exceso de dimensiones en los autobuses en el caso donde no se contabilizan los recursos consumidos de los usuarios. En el caso particular de A^{**}, la curva es plana y ubicada en un solo nivel por encima de A^*, mientras que A^* crece a medida que el número de pasajeros se incrementa, pero a tasas cada vez menores, i.e. positivo pero decreciente.

Por último, la comparación entre (R4) y (R8) permite observar que los costos medios totales, bajo el problema de internalización de los gastos de usuarios, se reducirán en momentos con mayor demanda y viceversa; sin embargo, el problema sin tomar dichos costos observa una línea constante ante incrementos de la demanda. Esto podría evidenciar que, ante un incremento de la demanda, los costos medios totales de la solución que considera los costos de usuarios podrían ser más bajos que la contraparte del otro problema.

3. Conclusiones

Se ha encontrado satisfactoriamente la existencia de un sesgo en un problema de asignación óptima de frecuencia y tamaño de autobús, resultado de la inexistencia de internalización de los costos de los usuarios dentro del proceso productivo.

No sólo se ha comprobado que la frecuencia debería ser más alta, sino que también el tamaño de los autobuses de transporte público debería ser más pequeña. ¿Por qué debería una empresa internalizar los costos de los usuarios? i.e. ¿Cuál es el incentivo de una empresa para aumentar la frecuencia y reducir el tamaño de las unidades de transporte? Es claro, que los impactos positivos al medio ambiente y a la reducción del costo social es importante; sin embargo, también es claro que cuando la demanda de los usuarios es alta, el costo medio total podría caer por debajo de los costos medios totales de cuando no se toman en cuenta los costos de usuarios.

Por otro lado, si la imposición de una tarifa gubernamental es observada y esta misma se encuentra por debajo de los costos medios, el gobierno tendría la obligación de subsidiar la diferencia para que el sistema de transporte sea operativo.

4. Referencias

Allen, Treb & Costas Arkolakis. (2019). "The Welfare Efects of Transportation Infraestructure Improvements", *NBER, WP 25487, January.*

De Rus, Ginés, Javier Campos & Gustavo Nombela. (2003), *"Economía del Transporte"* Antoni Bosch, España.

Gobierno del Estado de Oaxaca (2019).*Reglamento de la Ley de Movilidad para el Estado de Oaxaca.* Gobierno del Estado.

Gobierno del Estado de Oaxaca (2018). *Ley de Transporte del Estado de Oaxaca. Gobierno del Estado.*

Owais, Mahmoud, Ghada Moussa, Yousef Abbas & Mohamed El-Shabrawy. (2013). "Optimal Frequency Setting for Circular Bus Routes in Urban Areas", *Journal of Engineering Sciences. Volume II. January.*

Soehodo, Sutanto & Masaki Koshi. (1998). "Design of Public Transit Network in Urban Area with Elastic Demand", *Journal of Advanced Transportation. Volume XXXIII, No. 1. June.*