

**APTO: UN MODELO PARA LA EVALUACION DE POLITICAS DE
OPERACION EN TRANSPORTE PUBLICO**

Tristán Gálvez Pérez

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
Casilla 228/3, Santiago

RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo es presentar el modelo APTO (Assessment of Public Transport Operating Policies) para la evaluación de políticas de operación tales como nivel y estructura de tarifas, tamaño de vehículos, número de asientos por clase, rutas y patrón de detenciones.

El problema de evaluar políticas de operación en transporte público es analizado en forma general, relacionándolo con los objetivos del operador y con los del evaluador. Los diversos criterios de evaluación son analizados, así como sus requerimientos de información en cuanto a pronósticos de la operación del sistema bajo políticas de operación alternativas.

Este análisis general muestra que es esencial para la resolución del problema la inclusión de al menos dos factores principales: la influencia de la aglomeración sobre la función de utilidad de los viajeros y la variabilidad previsible y aleatoria de los flujos.

La estructura general del modelo computacional es descrita a continuación, poniendo énfasis en los datos requeridos y en el tipo de resultados generados por el modelo. sus principales particularidades son: la consideración de una demanda elástica al nivel de servicio; la representación detallada de la oferta en forma de diagramas diarios o semanales de operación para cada uno de los vehículos; la representación de la demanda como una matriz origen-destino dinámica.

1. INTRODUCCION

Cualquier operador de transporte público de pasajeros debe operar normalmente un conjunto de servicios que pueden ser agrupados en rutas o líneas. Dado que cada ruta tiene en principio diferentes características, será necesario seleccionar en cada una de ellas las características del servicio de transporte a ofrecer.

Por ejemplo, una cierta ruta puede ser servida con vehículos de diferente tamaño, con diversas frecuencias. La elección es normalmente entre despachar vehículos más grandes con una frecuencia menor, o vehículos más pequeños con una frecuencia mayor.

Del mismo modo se presentan en algunos casos opciones en cuanto a la velocidad a la cual operar. Una mayor velocidad implica menores tiempos de viaje y por lo tanto una mejor posición competitiva frente a modos alternativos de transporte, pero también significa normalmente mayores costos de operación, principalmente en energía y en mantenimiento.

Otro de los elementos que debe ser decidido es el patrón de paradas. Un mismo servicio entre dos puntos extremos puede ser ofrecido como expreso o puede tener una o más paradas intermedias. Incluso para algunos viajes puede ofrecerse sólo un servicio con trasbordo en un punto intermedio. En términos muy generales, cada parada adicional en una ruta genera mayores costos de operación y reduce la calidad de servicio para los pasajeros en tránsito, pero permite servir mercados adicionales y obtener los ingresos correspondientes.

Finalmente, existen opciones en cuanto a las tarifas a cobrar. En este punto debemos distinguir entre nivel y estructura tarifaria. La estructura tarifaria se refiere al número de tarifas diferentes en un servicio y al rango de aplicación de cada una. Por ejemplo, puede establecerse una tarifa diferente para cada combinación de origen y destino, variable además por la temporada o período en que el viaje se realiza, por el intervalo entre el viaje de ida y el de retorno, por el tipo de usuario (descuentos a estudiantes, tercera edad, etc.) y por el tipo de acomodación (o clase) provista. La mayor parte de los operadores de servicios de larga distancia, tales como ferrocarriles y líneas aéreas, utilizan estructuras tarifarias altamente diferenciadas. En cambio, en servicios de corta distancia la estructura de tarifas suele ser más simple, llegando en algunas líneas de buses urbanos o sistemas de metro a la tarifa única. En cuanto al nivel tarifario, éste se refiere al monto de las tarifas dada cierta estructura.

Una política de operación se refiere a la elección de alternativas en aspectos tales como los señalados. Se trata de un problema complejo por el gran número de variables en juego.

Una segunda fuente de complejidad se refiere a la variabilidad temporal de la demanda. Esta variabilidad presenta ciertas regularidades. Por ejemplo, en el caso del transporte urbano los flujos suelen ser mayores

en los horarios de entrada y salida al trabajo, en tanto que en el caso del transporte internacional e interurbano suelen existir variaciones estacionales relacionadas con las temporadas de turismo o proximidad de días festivos. Sin embargo, existe una segunda fuente de variabilidad de naturaleza aleatoria que se superpone a la anterior. Así, por ejemplo, durante la punta de la mañana en transporte urbano no todos los días laborales presentan exactamente el mismo nivel de flujo. Más aún, a nivel de cargas de vehículos individuales la variabilidad es todavía mayor. En el caso del transporte interurbano, se produce una mayor variabilidad debido a que, en general, no existe un conjunto de usuarios que repitan diariamente cierto viaje.

Los operadores se adaptan a la variabilidad previsible o regular proveyendo mayor capacidad de transporte en los períodos de demanda más intensa, e intentan satisfacer la variabilidad aleatoria de la demanda mediante la provisión de capacidad de transporte en exceso del nivel medio esperado. Por ejemplo, muchas líneas aéreas o empresas de buses interurbanos definen a priori un factor de carga dado, por ejemplo 50%, y ajustan sus tarifas de modo de cubrir sus costos llevando en promedio un número de pasajeros equivalente a esa fracción de la capacidad ofrecida. Sin embargo, ésta no es la única forma de enfrentar el problema. Algunos operadores han desarrollado sistemas de reserva de pasajes, que si bien garantizan al usuario hasta cierto punto la obtención de un lugar, hacen que en ciertas ocasiones éste deba modificar su plan de viaje realizándolo ya sea antes o después de la hora o fecha deseada. Otros operadores, especialmente aquellos que ofrecen servicios de alta frecuencia, sencillamente hacen al usuario esperar hasta que se presente un vehículo con capacidad disponible. En el caso del transporte ferroviario de larga distancia, se ofrece además al usuario la opción de hacer el viaje de pie.

En todos los casos anteriores se observa que a medida que el factor de carga medio aumenta, la calidad del servicio se deteriora, aumentando ya sea la probabilidad de tener que viajar a un horario o en un día no óptimo, la probabilidad de esperar el siguiente o subsiguiente servicio, o la probabilidad de viajar de pie. Otro factor que incide en el mismo sentido es el desagrado que produce el viajar en un vehículo congestionado. Resulta claro que una reducción en el factor de carga medio contribuye a mejorar la calidad del servicio, atrayendo más demanda y por lo tanto generando mayores ingresos, pero al mismo tiempo aumenta los costos de operación. El exacto balance entre estos factores, de modo de hallar por ejemplo la política de operación que maximiza las utilidades de la empresa de transporte, es un tema poco explorado. De hecho, en la literatura publicada hasta ahora sólo Powell (1982) ha propuesto un método de análisis de la variabilidad aleatoria.

El modelo que se presenta en este trabajo permite simular los efectos de diversas políticas de operación alternativas en términos de costos de operación e ingresos del operador, considerando en forma explícita la variabilidad aleatoria de la demanda y el efecto del factor de carga resultante sobre la calidad del servicio ofrecido y, en consecuencia, sobre el nivel de demanda atraído. La estructura general del modelo se

presenta en la Figura 1. Dada su complejidad, dedicaremos las secciones siguientes a su descripción. Cabe señalar que el modelo fue originalmente desarrollado para ser aplicado al sistema de trenes rápidos interurbanos del Reino Unido (InterCity), por lo cual el software probablemente requeriría modificaciones de detalle para ser aplicado en otro contexto.

2. DATOS

Los datos que el modelo necesita pueden ser clasificados en dos grupos. El primero de ellos corresponde a variables de control cuyo valor normalmente puede ser decidido por el operador. El segundo se refiere a características objetivas de la red, la flota y los mercados.

Considerando el primer grupo, el punto de partida es la definición de diagramas de operación para cada uno de los vehículos que operará en el sistema a modelar. Este diagrama debe cubrir el período de modelación considerado, el cual es en principio de una duración arbitraria. Normalmente, un período de 24 horas es suficiente en el caso de transporte urbano o interurbano de mediana distancia. Para servicios que se ofrecen con una frecuencia menor, por ejemplo, dos o tres veces por semana, un período de 7 días es lo indicado. En todo caso, la idea central es que los diagramas de operación deben ser repetibles un número de veces suficiente para cubrir la temporada de validez de los itinerarios. Cabe destacar que no es necesario que los vehículos sean idénticos entre sí, esto es, se puede considerar flotas mixtas.

Los diagramas de operación deben contener la secuencia de viajes hecha por el vehículo, desde que sale del depósito hasta que vuelve al mismo. Por ejemplo, en el caso de un tren deberá indicarse la primera estación en la cual recogerá pasajeros, la hora de salida de la misma, las detenciones intermedias y su duración, los tiempos de viaje entre detenciones y la estación terminal de su primer viaje. A continuación deberá especificarse el tiempo muerto asignado a dicho tren hasta iniciar su viaje siguiente, seguido de similar información para cada uno de los viajes programados en el diagrama de operación. Toda esta información está normalmente disponible para la forma de operación actual. Modificaciones menores son relativamente fáciles de introducir sobre la base de los diagramas actuales. En cambio, el rediseño general del conjunto de los servicios es sin duda un trabajo de gran extensión que sólo puede justificarse a largos intervalos, para el cual probablemente resulte conveniente utilizar modelos más agregados en las fases iniciales de diseño. Sin embargo, una vez obtenido un rediseño satisfactorio, nuestro modelo puede ser utilizado para precisar en forma detallada la mejor política de operación.

Cabe destacar que este procedimiento difiere de la práctica usual (ver por ejemplo Wren, 1981), que consiste en definir en primer lugar itinerarios a servir, obteniendo los diagramas de los vehículos como un resultado.

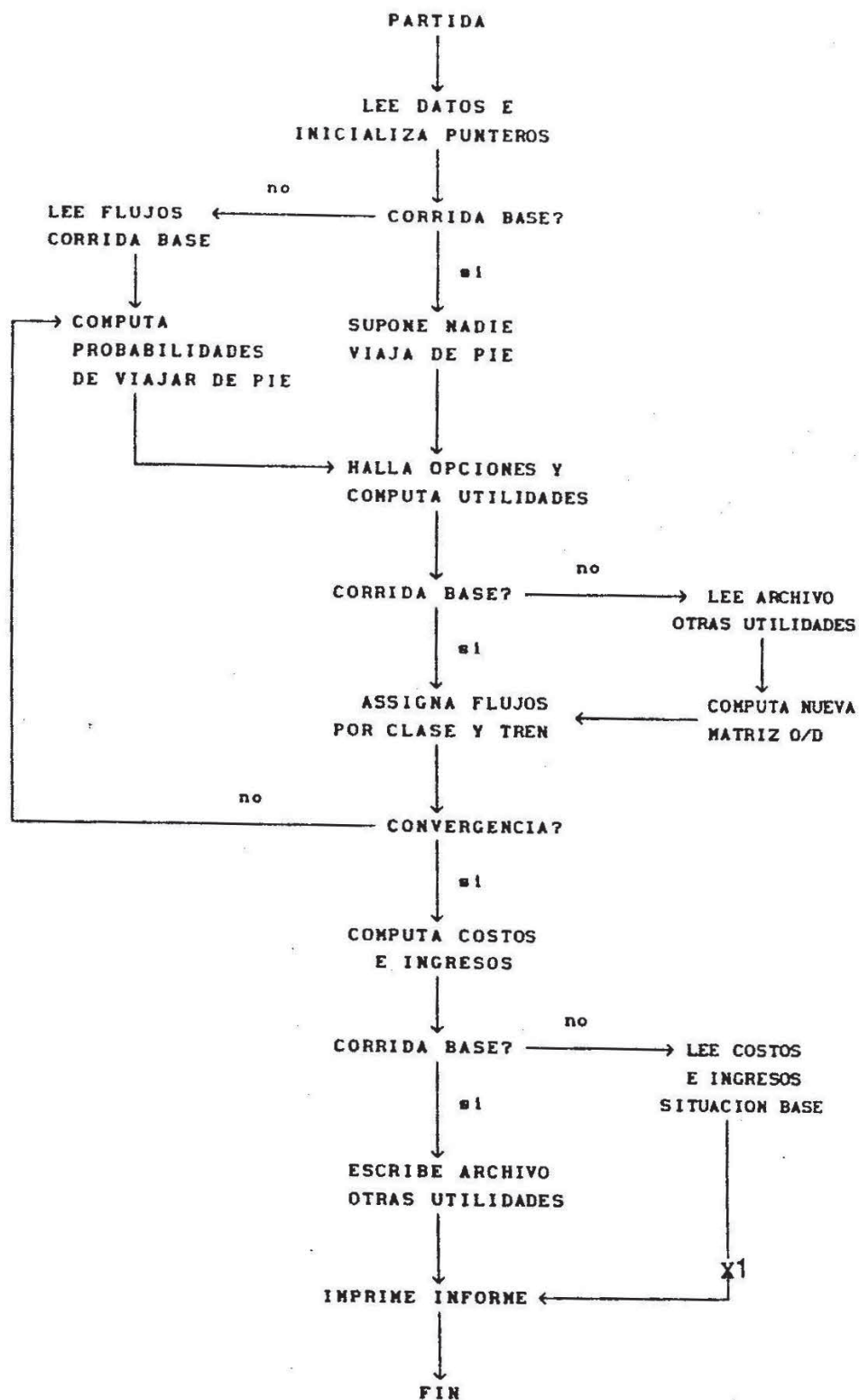


Figura 1. Estructura general del programa.

A continuación se debe definir el conjunto de tarifas a aplicar. En principio debe establecerse una tarifa para cada combinación de origen, destino y clase. De existir tarifas reducidas para el período fuera de punta éstas deben ser también especificadas.

El segundo grupo de datos de entrada para el modelo comprende en primer lugar la matriz origen-destino de viajes por período temporal, cubriendo todo el intervalo para el cual fueron generados los diagramas. En el caso de existir diversos tipos de usuarios puede definirse un conjunto de matrices para cada tipo. Este es el caso, por ejemplo, de las líneas aéreas, que suelen dividir sus usuarios entre viajeros de negocios y turistas. Esta matriz es la que corresponde a la política de operación adoptada en la situación actual o base.

A continuación debe especificarse los datos de la red, en términos de qué estaciones o paradas están unidas entre sí, las distancias correspondientes y la información necesaria para el cómputo de costos de infraestructura. Asimismo debe especificarse los costos unitarios de operación para cada uno de los tipos de vehículo en la flota.

3. SUBMODELO DE DEMANDA

El submodelo de demanda tiene como objetivo computar cambios en los niveles de flujo por origen/destino e intervalo de modelación, y asignar los flujos a las diversas opciones de viaje ofrecidas por el operador (horarios, clases, etc.).

Para ello se ha supuesto que los usuarios eligen entre las alternativas ofrecidas según una estructura logit jerárquica (Williams, 1977) ilustrada en la Figura 2. Esta estructura es equivalente a un modelo de generación simultáneo con un modelo de partición modal. Esto significa que el modelo no distigue si un incremento en los flujos proviene de generación de nuevos viajes o de cambios en la partición modal. Cabe señalar que la versión actual del modelo no contempla cambios en la distribución de viajes, debido principalmente a que en el contexto interurbano para el cual fue desarrollado dichos cambios son poco probables.

La distribución de los usuarios entre los diferentes horarios de partida toma en cuenta que, si no existe servicio a la hora exacta en la cual los usuarios desean viajar, algunos de ellos preferirán anticipar su viaje, en tanto otros preferirán retrasarlo. De igual modo, si se trata de un período punta en el cual las tarifas son mayores, algunos usuarios estarán dispuestos a pagar el mayor precio, en tanto otros preferirán retrasar o adelantar su viaje para acogerse a la tarifa menor. En todos estos casos la elección se basa en las utilidades de las diversas opciones, siendo la proporción de usuarios que elige cada opción computada mediante el modelo logit. Nuestro modelo difiere, por lo tanto, del propuesto por Whitehead (1981) y Shilton (1982), dado que en este último la asignación de usuarios a opciones es determinística. Por otra parte, al aceptar cambios en el horario de viaje de los usuarios, se está

en realidad trabajando con matrices origen-destino dinámicas, lo cual también es un mejoramiento con respecto a la práctica usual de trabajar con periodos independientes.

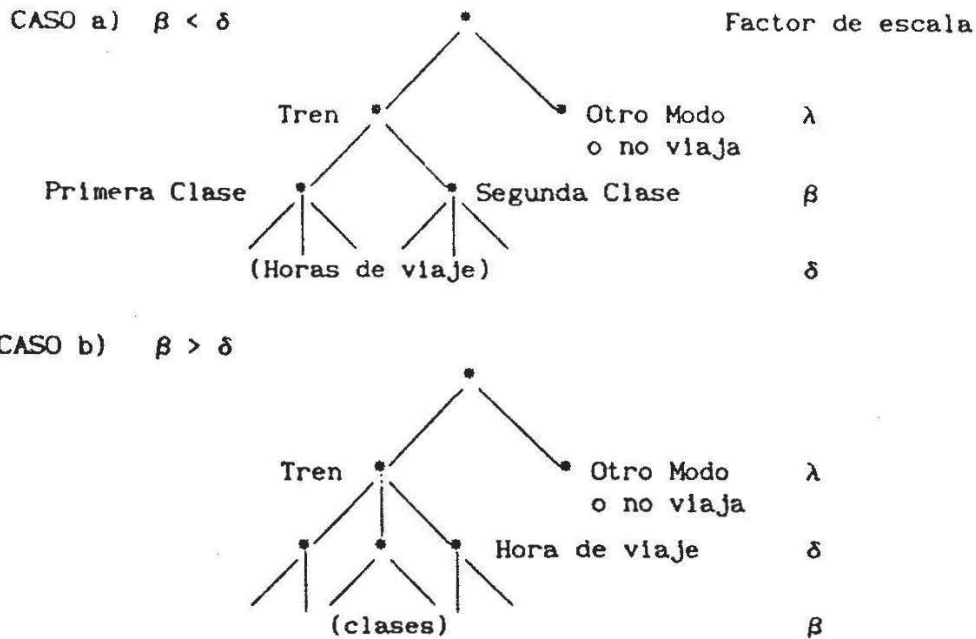


Figura 2 Una estructura jerárquica simplificada para viajes en tren.

En la Figura 2 se presentan dos casos, dependiendo de la magnitud relativa de los factores de escala β y δ (por simplicidad, se ha omitido subíndices por origen/destino):

$$\text{Caso a)} \quad U_{Rj} = (1/\beta) \ln \sum_c \exp (\beta U_{cj}) \quad (1)$$

$$U_{cj} = (1/\delta) \ln \sum_k \exp (\delta U_{kcj}) \quad (2)$$

$$\text{Caso b)} \quad U_{Rj} = (1/\delta) \ln \sum_k \exp (\delta U_{kj}) \quad (3)$$

$$U_{kj} = (1/\beta) \ln \sum_c \exp (\beta U_{kcj}) \quad (4)$$

En las expresiones anteriores U_{Rj} representa la utilidad del viaje en tren para usuarios cuyo horario ideal de viaje está contenido en el intervalo de simulación j (ver punto 4), en tanto U_{cj} y U_{kj} representan respectivamente la utilidad de la clase c (agregada sobre todas las

opciones de horario) y la utilidad de la opción de horario k (agregada sobre todas las clases), para dichos usuarios. Por último, U_{kcj} representa la utilidad de viajar en clase c y opción k, para los mismos usuarios. La expresión para esta utilidad U_{kcj} resultó ser, en el contexto de los trenes interurbanos ingleses:

$$\begin{aligned}
 U_{kcj} = & \theta_H F_{ck} + \theta_T T_k + \sum_{L \in k} \theta_C CT_L g_{BLc} + \\
 & \sum_{L \in k} \theta_F (1 - g_{BLc} - S_{LOc}) T_L + \\
 & \sum_{L \in k} \theta_S S_{LOc} T_L + \theta_H S_{10c} + \theta_E E_{kj}
 \end{aligned} \tag{5}$$

donde:

- θ_H : Utilidad unitaria del dinero pagado
- F_{ck} : Tarifa cobrada en clase c en opción k
- θ_T : Utilidad unitaria del tiempo de viaje
- T_k : Tiempo total de viaje en opción k
- θ_C : Utilidad relacionada a la variable muda Primera Clase
- C : Variable muda = 1 para Primera Clase, 0 en otro caso
- θ_F : Utilidad unitaria adicional del tiempo de viaje sentado en un tren con pasajeros de pie
- g_{BLc} : Probabilidad de viajar en un tren sin pasajeros de pie en tramo L y clase c
- S_{LOc} : Probabilidad de viajar de pie en tramo L y clase C para pasajeros que abordan el tren en estación O
- T_L : Tiempo de viaje en tramo L
- θ_S : Utilidad unitaria adicional del tiempo de viaje de pie
- θ_H : Utilidad relacionada a la variable muda Viaje de Pie
- S_{10c} : Probabilidad de viajar de pie en el primer tramo en clase C para pasajeros que abordan el tren en estación O
- θ_E : Utilidad unitaria de ajustes en el horario de viaje
- E_{kj} : Diferencia en horarios de viaje entre opción k e intervalo j

En ambos casos la cantidad M_{RJ} de usuarios que elige tren será

$$M_{RJ} = \frac{M_j}{1 + \exp(\lambda(U_{Ej} - U_{RJ}))} \quad (6)$$

En la expresión anterior U_{Ej} representa la utilidad de hacer algo diferente a viajar en tren, esto es, viajar usando otro modo o no viajar, en tanto λ es un factor de escala y M_j es el tamaño total del mercado.

Los parámetros del modelo son obtenidos de diversas fuentes. Las utilidades unitarias (o valoraciones) θ_H , θ_T , θ_C , θ_F , θ_S , θ_H , y θ_E provienen de la calibración de modelos desagregados de demanda basados en preferencias declaradas o reveladas. Los parámetros T_k , T_L , g_{BLc} , S_{LOc} , S_{10c} y E_{kj} son endógenos y resultan del proceso de simulación. La tarifa F_{ck} proviene directamente de la política de operación adoptada. Los factores de escala deben ser calibrados de modo de reproducir valores de control agregados tales como la distribución de usuarios por clase y por opción de horario. Finalmente, las utilidades U_{Ej} son calculadas de modo de reproducir la elasticidad-precio de los flujos.

El cómputo se realiza simulando una elevación del nivel tarifario en una proporción pequeña ϵ . La utilidad después de esta alza será

$$U_{kcj}^1 = U_{kcj} + \theta_H \epsilon F_{kc} \quad (7)$$

y será posible calcular una nueva utilidad compuesta U_{RJ}^1 usando las ecuaciones 1 a 4. Si ξ es la elasticidad-precio se llega finalmente a la expresión

$$U_{Ej} = (1/\lambda) \ln \left\{ \frac{-\xi\epsilon}{(1 + \xi\epsilon) \exp(-\lambda U_{RJ}^1) - \exp(-\lambda U_{RJ})} \right\} \quad (8)$$

Finalmente, los tamaños de mercado M_j se obtienen a partir de los datos de la situación base calibrada utilizando la ecuación 6.

4. SUBMODELO DE SIMULACION

El submodelo de simulación realiza las siguientes funciones:

a) Identifica las opciones de viaje disponibles entre cada par origen/destino. Esta lista contendrá en general servicios ofrecidos a diferentes horas del día, posiblemente con diferentes alternativas de acomodación (clases) y eventualmente con tarifas diferentes. Algunas

opciones pueden seguir rutas diferentes, en general con distinto tiempo de viaje.

b) Divide el período de modelación en intervalos de simulación de pequeña duración (definida por el modelador). Se supone que el centro de cada intervalo es representativo del horario ideal de viaje de todos los usuarios que desean viajar en dicho intervalo. Sin embargo, como ya se ha explicado, los usuarios pueden ser asignados a trenes cuya hora de partida esté fuera de dicho intervalo.

c) Computa para cada combinación intervalo-opción-tipo de usuario su utilidad, así como las utilidades compuestas, utilizando el submodelo de demanda, y computa las variaciones correspondientes en nivel de flujo con respecto a la situación base.

d) Asigna a los diversos trenes los flujos de pasajeros, obteniendo una estimación de la carga media en cada tramo para cada tren.

e) Aplica una función de dispersión a las cargas por tramo para tomar en cuenta la variabilidad aleatoria de los flujos, a partir de lo cual computa las probabilidades de viajar de pie, sentado en un tren lleno y sentado en un tren sin pasajeros de pie. El procedimiento usado se detalla más adelante.

f) Itera las etapas c) a e) hasta alcanzar convergencia. El criterio de parada se basa en las diferencias entre las cargas predichas sobre cada vehículo y tramo entre la última y la penúltima iteración, que no deben exceder cierta tolerancia preestablecida.

A continuación trataremos el problema probabilístico enunciado en e). La variabilidad de los flujos implica que incluso en el caso en que en promedio la carga total en determinado tren y tramo sea menor que el número de asientos, existirán algunos días de la temporada en los cuales viajarán pasajeros de pie. Como contrapartida, incluso un tren en promedio saturado tendrá algunos días en la temporada en los cuales no habrá congestión. Resulta necesario precisar qué se entiende por un "tren" en las frases anteriores. El supuesto básico es que existe un itinerario publicado que establece horarios de servicios válidos por una temporada preestablecida. Un tren, en el sentido usado aquí, representa uno de los servicios definidos en este itinerario, el cual se repetirá un cierto número de veces durante la temporada (por ejemplo, el servicio que va de la estación A a la Z de Lunes a Viernes a las 16.30 horas, parando en B, C, D, etc.).

El método adoptado consiste en asumir que, durante la temporada, la serie que resulta de observar las cargas de las repeticiones de un "tren" dado en un punto de observación dado sigue o se ajusta a una ley de distribución estadística. Existen dos distribuciones relacionadas: la que expresa la probabilidad de que un tren dado tenga una carga menor que cierto valor límite; y la que expresa la probabilidad de que un pasajero, elegido al azar de entre los que toman dicho "tren" en la temporada, viaje en un tren cuya carga es menor que cierto valor dado. La segunda

distribución, obviamente, tiene una cola derecha más "gruesa" que la primera, reflejando el hecho (lamentable para el operador) de que cuando el tren tiene una baja tasa de ocupación pocos pasajeros la disfrutan, en tanto que cuando la tasa de ocupación es alta muchos de ellos la sufren.

La adecuación de una ley de distribución determinada debe comprobarse empíricamente para cada situación. Por ejemplo, Powell (1982), para un caso de transporte aéreo, encontró que una distribución normal era adecuada para modelar la primera distribución. Sin embargo, en el caso de transporte ferroviario de mediana distancia en Inglaterra, Gálvez (1989) encontró que la distribución normal daba un pobre ajuste, y que una ley de Gumbel Tipo II (Gumbel, 1958) era apropiada para la segunda distribución. Dicha ley puede expresarse en función de dos parámetros n y ω como

$$G(x) = \exp(-(\omega/x)^n) \quad (9)$$

En la expresión anterior x representa la carga normalizada, esto es, dividida por el número medio de pasajeros. Se puede demostrar además que la siguiente condición de consistencia debe cumplirse:

$$\omega = \Gamma(1 + \frac{1}{n}) \quad (10)$$

Utilizando la distribución definida en la ecuación 9 puede demostrarse que

$$g_B = \exp(-y) \quad (11)$$

$$g_F = K \Gamma_y(1 + \frac{1}{n}) \quad (12)$$

$$g_S = 1 - g_B - g_F \quad (13)$$

donde

g_B : proporción de usuarios que viajarán en trenes sin pasajeros de pie

g_F : proporción de usuarios que viajarán sentados en trenes con pasajeros de pie

g_S : proporción de usuarios que viajarán de pie.

K : número de asientos dividido por el número medio de pasajeros a bordo

Γ_y : Integral gama incompleta.

n : parámetro a calibrar

y el valor de " y " está dado por la expresión

$$y = \left\{ \frac{\Gamma(1 + \frac{1}{n})}{K} \right\}^n \quad (14)$$

Para la calibración del parámetro "n" se recurre a la estadística de cargas observadas en los trenes. La proporción de pasajeros que viaja en trenes con una carga normalizada menor que x está dado por:

$$H(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i} \quad \text{con} \quad L_{N_x} \leq x < L_{N_x+1} \quad (15)$$

donde L_i representa las cargas normalizadas observadas ordenadas de menor a mayor. Dado que esta distribución debe ajustarse a la distribución teórica presentada en la ecuación 9 para cada valor de x se tiene

$$\begin{aligned} \ln(-\ln(H(x))) &= n(\ln(\omega) - \ln(x)) \\ &= a + b \ln(x) \end{aligned} \quad (16)$$

y los parámetros n y ω pueden obtenerse por regresión. La calidad del ajuste puede evaluarse chequeando el cumplimiento de la condición de consistencia indicada en la ecuación 10, y en caso que el modelo sea aceptado puede realizarse una nueva regresión imponiendo esta condición para obtener el valor final de "n". En la aplicación en Inglaterra dicho valor resultó ser del orden de 3.8.

Las expresiones anteriores se aplican en promedio a todos los pasajeros a bordo de un tren dado en un tramo dado. Sin embargo, resulta evidente que aquellos pasajeros que abordaron el tren en la estación de origen tienen una menor probabilidad de viajar de pie en un tramo dado que aquellos pasajeros que recién abordan el tren al comienzo de dicho tramo. Ello hace necesario determinar las probabilidades considerando además el origen del viaje, según puede apreciarse de la forma funcional adoptada para la utilidad, presentada en la sección 3.

La figura 3 presenta un diagrama de carga típico para un tren. Los valores F_i representan cargas en los tramos, en tanto que los R_i representan los pasajeros que quedan a bordo en una estación luego de que los pasajeros con destino en esa estación han descendido y antes de que aquellos con origen en la misma aborden el tren.

El problema consiste en hallar una matriz S_{Lo} que contiene la probabilidad de viajar de pie en el tramo L para un pasajero que aborda el tren en la estación O, a partir de una segunda matriz F_{Lo} que contiene el número de pasajeros a bordo en el tramo L y que subieron en la estación O. Esta segunda matriz se supone conocida de una iteración anterior.

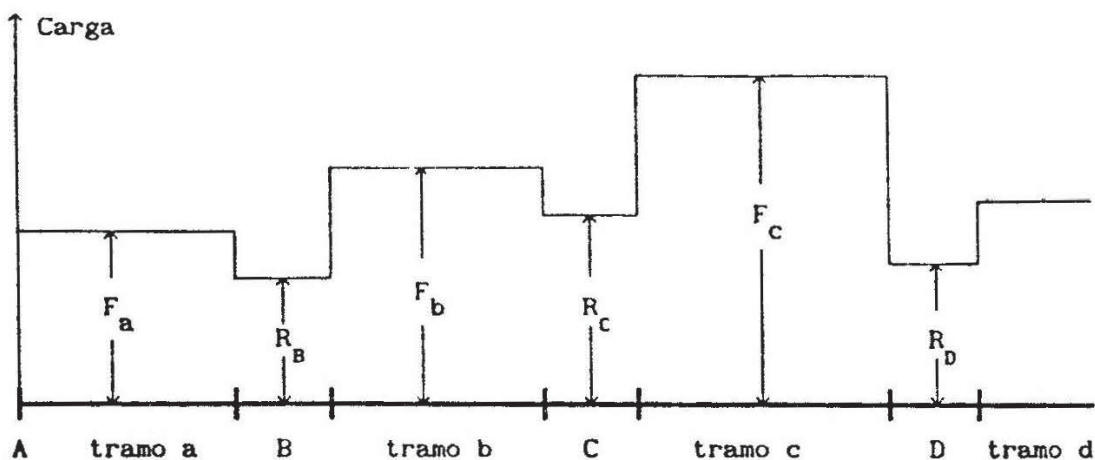


Figura 3. Esquema de cargas para un tren hipotético

De las ecuaciones 11 a 13 se infiere que g_s es función sólo del flujo en el tramo, una vez determinado el valor de "n" y definido en los datos el número de asientos. Por lo tanto, usando cálculo de probabilidades resulta posible plantear expresiones del tipo

$$R_B S_{bA} + F_{bB} S_{bB} = F_b g_s(F_b) \quad (17)$$

y mediante su uso recursivo obtener la matriz S_{Lo} . Dado que la probabilidad de viajar en un tren sin pasajeros de pie en un tramo dado obviamente no depende de la estación de origen, resulta posible computar como residuo la probabilidad de viajar sentado en un tren con pasajeros de pie, la cual sí depende del origen.

Naturalmente, el enfoque anterior requiere adaptaciones para poder abordar otros casos. Por ejemplo, en algunos sistemas de transporte público el tiempo de detención en cada estación o parada es función del número de pasajeros que deben abordar el vehículo o bajar de éste. En otros sistemas no es permitido llevar pasajeros de pie, por lo cual la aglomeración se traduce en pasajeros que deben esperar el servicio siguiente. Ello haría necesario corregir ciertos aspectos de la modelación. Sin embargo, el efecto final sería siempre un deterioro del nivel de servicio con el aumento del flujo, que podría ser correctamente analizado por los restantes módulos del modelo.

5. SUBMODELO DE COSTOS

Los costos de operación se computan a partir de las variables físicas generadas por el modelo y los costos unitarios correspondientes. Dado que nuestro objetivo es comparar políticas de operación alternativas, todos aquellos costos que sean fijos, en el sentido de no ser afectados por los cambios propuestos en las políticas de operación, pueden ser excluidos

del análisis. Considerando que muchos sistemas de transporte tienen características de producción conjunta, este criterio presenta grandes ventajas pues no exige el reparto de gastos generales entre los diversos servicios operados, lo cual normalmente constituye un problema difícil dada la inexistencia de criterios unívocos de reparto. Ello significa que el submodelo de costos computa realmente costos incrementales asociados a opciones de políticas de operación.

En la aplicación a los ferrocarriles ingleses (Gálvez, 1989) se encontró que los ítems de costo relevantes eran:

1. Tripulación de trenes
2. Combustible.
3. Revisión y aseo.
4. Buffet o restorán en el tren
5. Mantenimiento de trenes
6. Terminales de pasajeros
7. Mantenimiento y renovación de vías
8. Depreciación y amortización de trenes

Para cada uno de estos factores fueron desarrolladas expresiones funcionales sensibles a las políticas de operación que se deseaba evaluar. Todas ellas son en realidad modelos de gasto, en el sentido de que corresponden a una serie de costos unitarios exógenos al modelo que son multiplicados por cantidades físicas obtenidas de la simulación.

6. SUBMODELO DE EVALUACION

Como se ha dicho, el modelo debe aplicarse a la situación actual o existente para su calibración. Ello se refiere a computar una serie de parámetros que el modelo guarda en un archivo magnético, los cuales son utilizados posteriormente en la evaluación de alternativas.

Para ello, se debe generar cambios en la política de operación, tales como: sustituir determinado vehículo por otro más grande o más pequeño (en ferrocarriles, agregar o quitar un coche al tren); agregar o retirar un vehículo, modificando el conjunto de diagramas si ello es aconsejable; modificar el nivel y/o la estructura de las tarifas; agregar o suprimir detenciones; cambiar los diagramas sin alterar el número y tipo de vehículos; cambiar la asignación de espacio y número de asientos a cada una de las clases. Naturalmente, el modelo acepta evaluar en forma conjunta cualquier combinación de cambios en estas variables.

Una vez alcanzado el equilibrio, se computa los ingresos totales de la operación, calculados a partir de los flujos origen-destino finales y las tarifas correspondientes. El programa genera reportes además sobre los costos de operación y sobre el total de pasajeros transportados y su distribución por origen, destino, período temporal, clase y tipo de usuario.

De la variación en los ingresos y costos puede obtenerse la variación en las utilidades de la empresa. Si esta variación es positiva, implica que el cambio propuesto contribuye a incrementar el resultado económico de la empresa. En una etapa inicial de búsqueda, será normalmente suficiente el cómputo de estos ingresos, costos y utilidades incrementales, para efectos de preseleccionar y descartar alternativas. Sin embargo, para comprobar si habrá utilidades o pérdidas, se debe agregar al balance los costos fijos inicialmente excluidos.

La elección final de la alternativa más conveniente dependerá obviamente de los objetivos del operador. En el caso de empresas privadas, normalmente el objetivo principal es la maximización de utilidades, teniendo como objetivo secundario el incremento de la fracción del mercado total de viajes que es servida por la empresa. En el caso de empresas públicas, un objetivo normal es la maximización del bienestar social, sujeto a obtener un nivel de utilidades o pérdidas predeterminado. Cabe destacar que la información necesaria para estimar el grado de cumplimiento de estos y otros objetivos es generada por el modelo, haciéndolo una herramienta de análisis extraordinariamente versátil.

7. CONCLUSIONES

En resumen, las principales características del modelo, que lo diferencian de los desarrollados con anterioridad son:

- Es sensible a una gran variedad de cambios en políticas de operación, incluso aquellas de nivel detallado.
- Modela la elección de hora de viaje en presencia de diferencias tarifarias o en la calidad del servicio.
- Modela el efecto de la aglomeración sobre la calidad del servicio.
- Considera y modela la variabilidad aleatoria de la demanda.
- Permite comparar situaciones con diferente factor de carga de modo de hallar el más conveniente, no requiriendo fijar a priori dicho factor de carga.

Por otra parte, el modelo comparte algunas características deseables presentes en modelos alternativos, tales como:

- Computa un conjunto de indicadores que permite determinar el grado de cumplimiento de una gran diversidad de objetivos del operador.
- Puede modelar, con las debidas adaptaciones, cualquier modo de transporte público en cualquier contexto (urbano, interurbano, internacional).
- Considera diferentes tipos de usuarios.

- Modela explícitamente la elección de clase.
- Modela la elasticidad de la demanda ante variaciones en la tarifa o en la calidad del servicio.

Sin embargo, su mérito principal no radica en cada uno de los aspectos señalados por separado, sino más bien en el hecho de considerarlos en forma conjunta. Se trata realmente de un modelo integral en el sentido de tratar tanto la demanda como la oferta de servicios de transporte como un todo, modelando explícitamente el proceso de equilibrio involucrado y generando los indicadores necesarios para la contrastación de los resultados con los objetivos del operador.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado principalmente por la Universidad de Chile y el Science and Engineering Research Council del Reino Unido. Deseo además manifestar mi gratitud a la Universidad de Leeds y en especial al Dr. Chris Nash y al Dr. Tony Fowkes.

REFERENCIAS

- Gálvez, T.E. (1989) Assessment of operating policies in public transport: A comprehensive model applied to a rail service. Tesis de Ph.D. University of Leeds.
- Gumbel, E.J. (1958) Statistics of extremes. Columbia University Press.
- Powell, W.B. (1982) Analysis of airline operating strategies under stochastic demand. Transportation Research Vol. 16B, No. 1, pp. 31-43.
- Shilton, D. (1982) Modelling the demand for high speed train services. J. Opl. Res. Soc. Vol. 33 No. 8 pp. 713-722.
- Whitehead, P.M. (1981) Estimating the effects on revenue of rail service changes. Actas Seminario K, PTRC Summer Annual Meeting, Warwick.
- Williams, H.C.W.L. (1977) On the formation of travel demand models and economic valuation measures of user benefits. Environment and Planning A, Vol. 9.
- Wren, A. (1981) (Ed.) Computer scheduling of public transport: urban passenger vehicle and crew scheduling. North-Holland, Amsterdam.