

## **MODELACION DE COSTOS DE MOVILIZACION EN LA OPERACION FERROVIARIA.**

**Tristán E. Gálvez Pérez**

**y**

**Manuel P. Díaz Caro**

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

### **RESUMEN**

La movilización ferroviaria es el símil del concepto de control de tránsito utilizado en otros modos. El presente trabajo presenta los resultados de una investigación realizada sobre este tema, cuyo principal objetivo era la modelación de costos unitarios de movilización en función del tipo de tren (carga, pasajeros, automotor), sistema de señalización utilizado y otros factores. Por otra parte, interesaba conocer los costos de provisión de estos servicios. Estos objetivos, además de su función obvia en términos de apoyo a la gestión de una empresa ferroviaria, son piezas esenciales de un sistema de tarificación de uso de vías en ferrocarriles en que la gestión de estas últimas sea realizada por un ente distinto al operador de trenes. Por otra parte, son también elementos clave para la formulación de una metodología de evaluación de proyectos de inversión en infraestructura y equipos ferroviarios.

El trabajo se inicia con una breve descripción de las características de los principales sistemas de señalización. En términos generales, los sistemas más simples representan costos de inversión menores pero tienen menor capacidad. En ferrocarriles en los cuales existe una única vía que opera en ambos sentidos, el rol del sistema de movilización es crucial para asegurar la seguridad del tráfico y reducir las demoras por cruzamiento o adelantamiento. Dado que las reglas de operación asignan normalmente diversas prioridades a los trenes, las demoras afectan principalmente a los trenes de menor prioridad. Debido a la complejidad de las operaciones reales, ha sido necesario desarrollar un modelo de simulación de la operación de un ferrocarril, el cual permite cuantificar las demoras de los trenes en función de la topología de la red, el flujo, las reglas de operación y el sistema de señalización utilizado.

Se determina a continuación el costo de provisión de los sistemas de señalización y comunicaciones necesarios para operar la movilización, considerando costos de capital, mantenimiento y operación. Estos costos son en su mayor parte fijos en el corto plazo, pues las dotaciones de personal y equipos equivalen en muchos casos a valores estándar bajo los cuales no es posible la operación, de modo que el costo es independiente del flujo hasta alcanzar la capacidad. Sin embargo, si se agrega a lo anterior los costos por demoras de trenes, se obtiene un costo total de corto plazo dependiente del flujo.

Al modelar algunos tramos de la red ferroviaria chilena para diversos niveles hipotéticos de flujo, se obtiene una función de costo de largo plazo, que permite determinar rangos de niveles de flujo dentro de los cuales cada uno de los sistemas de señalización es óptimo, así como proveer antecedentes para la tarificación del uso de vías.

## 1. INTRODUCCION

Debido al alto costo que significa para una empresa ferroviaria el construir, mantener y operar las vías, es que se dispone generalmente de vías únicas de circulación para ambos sentidos de tránsito. Esto hace necesario crear medios que permitan la circulación simultánea de trenes bajo estrictas medidas de seguridad, lo que equivale a decir que los trenes deben disponer de vía libre para realizar sus recorridos sin tener encuentros con otros trenes en plena vía. Lo anterior exige disponer de lugares para el cruzamiento y adelantamiento de trenes en las estaciones u en otros sitios habilitados para ello. Además, la circulación de los trenes debe ser programada en forma previa, en cuanto al horario de circulación y la ruta a seguir por el tren, mediante itinerarios preestablecidos.

Teniendo en cuenta la necesidad de permitir el tránsito de trenes y de cumplir los itinerarios, se define la "movilización" como el conjunto de instrumentos, tanto de infraestructura ferroviaria como reglamentarios y de operación, que permiten dirigir y controlar el tráfico de trenes. Ello requiere el uso de una serie de elementos que conforman los sistemas de señalización de vías y que permiten, utilizando cierta lógica de operación, la circulación de los trenes según lo programado en los itinerarios, y bajo las condiciones de seguridad necesarias. Los sistemas de movilización presentan diversas características tecnológico-operacionales, y difieren entre sí en términos principalmente de costo y capacidad. La elección del sistema más adecuado para condiciones dadas requiere por lo tanto analizar estas materias.

Los objetivos del presente trabajo se derivan del análisis anterior, y comprenden:

- a) revisar el estado actual del conocimiento acerca del tema de la movilización ferroviaria, tanto en el ámbito nacional como algunas referencias internacionales.
- b) modelar los principales factores que inciden en el costo de infraestructura y operación de un sistema de movilización de trenes.
- c) desarrollar una metodología para estimar la capacidad de un sistema de movilización dado.
- d) desarrollar una metodología para estimar las demoras y otros costos operacionales que sufren los trenes cuando el flujo se aproxima a la capacidad del sistema de movilización.
- e) entregar antecedentes para el diseño de un sistema tarifario para la movilización.

En concordancia con estos objetivos, en la Sección 2 se presenta una breve descripción de los principales sistemas de movilización existentes. En la Sección 3 se definen las componentes que constituyen el costo operacional de movilización, determinándose una componente fija por provisión del sistema y una componente variable por congestión. Se describen además metodologías para su cuantificación. En la Sección 4 se describe el desarrollo de un programa computacional de simulación de tráfico, que se muestra es necesario para cuantificar la capacidad de un tramo de vía y el grado de congestión del sistema.

La Sección 5 presenta una aplicación de la metodología desarrollada en el cálculo de funciones de costos de corto y largo plazo para el tramo de vía comprendido entre San Fernando y Talca, y se entregan antecedentes para el diseño de un sistema de tarificación de vías por concepto de movilización. Finalmente, en la Sección 6 se presentan las principales conclusiones de este trabajo, basándose principalmente en las aplicaciones que puede tener el programa de simulación de tráfico.



## **2. DESCRIPCION GENERAL DE LOS SISTEMAS DE MOVILIZACION**

### **2.1. Elementos**

Los principales elementos de tipo operativo y de infraestructura que constituyen un sistema de movilización son: el sistema de señalización, el sistema de control y dirección, los sistemas de apoyo y la lógica de operación. A continuación se describe brevemente cada uno de ellos.

#### **a) Sistema de señalización.**

Comprende las señales y elementos mecánicos que permiten realizar el control directo de la circulación de trenes: circuitos vía, señales, desviadores y cambios, y sistemas de comando y enclavamiento.

Los circuitos vía permiten detectar la presencia de un tren en cierto tramo de vía, mediante circuitos eléctricos formados usando los rieles como conductores, los que al recibir sobre ellos el eje de un tren producen un efecto de corto circuito.

Las señales son dispositivos fijos controlados desde el centro de comandos que, análogamente a los semáforos de la circulación vehicular urbana, indican si el avance a una ruta está autorizado o prohibido. Los dos tipos de señales más comunes los constituyen las señales de aspa y las señales luminosas.

Los desviadores y cambios son dispositivos que permiten desviar un tren de una vía a otra. La operación de los cambios puede efectuarse manualmente mediante una paleta ubicada en el mismo terreno por un operador autorizado desde el puesto de control, o bien mediante operación remota desde el mismo puesto de control en cuyo caso se emplean sistemas de transmisión mecánica, eléctrica o electroneumática.

Los sistemas de comando y enclavamiento están constituidos por un conjunto de dispositivos que atestiguan la situación en que se encuentran los elementos de terreno descritos en los puntos anteriores, permitiendo que se realicen sólo aquellas operaciones que no entrañan peligro para el movimiento de los trenes. Por ejemplo, no permiten que se ingrese a un mismo block desde direcciones opuestas.

Los sistemas de señalización ferroviaria son de tipo vital o de seguridad. Esto quiere decir que ante cualquier falla reaccionan hacia un estado predecible que en este caso es el más restrictivo. Por ejemplo, la falla de un circuito de vía producirá una señalización ocupada del block afectado.

#### **b) Sistema de control y dirección.**

Comprende los recursos humanos en cabinas y centrales controladoras de tráfico, que realizan el control indirecto de la movilización. Las funciones que realiza este personal dependen de la complejidad del sistema de movilización que se esté utilizando. En general, este personal debe estar al tanto de la posición, dirección y características de todos los trenes en circulación en su área de control, que puede ser local (sólo hasta las estaciones vecinas) hasta global (en el caso de control de tráfico centralizado). Este personal se apoya en su labor con variados instrumentos, que van desde anotaciones elementales hasta diagramas espacio-temporales del avance de los trenes y tableros mímicos.

**c) Sistemas de apoyo.**

Comprenden los sistemas de comunicaciones del personal de control de tráfico entre sí y, eventualmente, con la tripulación de los trenes. Se considera además la alimentación de electricidad al sistema de señales.

**d) Lógicas de operación.**

Comprende principalmente la definición de blocks, de categorías de trenes, la asignación de prioridades, normas de seguridad, holguras necesarias entre trenes y procedimientos generales para situaciones normales y de emergencia. Estos aspectos están generalmente normados mediante un Reglamento General de Movilización, que es el equivalente a las leyes de tránsito que rigen en el transporte vial.

**2.2. Sistemas de movilización.**

Los principales tipos de sistemas de movilización conocidos son: Sistema de Comando Local, Sistema "Bastón Staff", Block eléctrico intermediario, Sistema de control de tráfico centralizado (CTC), y Sistema de blocks de seguridad. A continuación se describe muy brevemente cada uno de ellos. Una descripción más detallada puede encontrarse en Díaz (1993).

**a) Sistema de Comando Local.**

El Sistema de Movilización Comando Local se denomina así porque el control y operación de los diversos dispositivos del sistema es realizado por movilizadores distribuidos en las estaciones de la red. Estos movilizadores pueden comunicarse entre sí y con una central de control de tráfico, mediante un sistema telefónico interno de la empresa ferroviaria. Normalmente existen además dispositivos automáticos de enclavamiento y de control de aspecto de las señales.

**b) Sistema "Bastón Staff".**

El sistema de control "Bastón Staff" es una variación del sistema comando local bastante más simple desde el punto de vista tecnológico. La principal diferencia es que la ocupación de un block por parte de un tren requiere que éste esté en posesión física de un bastón. El enclavamiento consiste en que los bastones son liberados por máquinas instaladas en las estaciones en forma tal que no pueden ser liberados dos bastones para un mismo bloque en forma simultánea. Al igual que el sistema anterior, la vía está dividida en blocks plena vía y estaciones con cambiadores.

**c) Block eléctrico Intermediario.**

No es un sistema propiamente tal, sino una variante que permite que en el tramo entre dos estaciones puedan circular dos o más trenes en el mismo sentido, dependiendo del número de blocks intermedios con que se cuente. Su principal efecto es aumentar la capacidad del sistema.



**d) Sistema de control de tráfico centralizado (CTC).**

Este sistema constituye una alternativa más avanzada al sistema de comando local. Se caracteriza porque el mando de todos los elementos del sistema de movilización se realiza desde un puesto central. Ello requiere, por ejemplo, que los desviadores cuenten con servomecanismos que posibiliten su telecomando, así como de medios confiables para la transmisión de estos comandos.

**e) Sistema de blocks de seguridad.**

Dentro del espectro más moderno de sistemas de control centralizado se encuentran los sistemas que utilizan blocks señalizados de seguridad. Este sistema es de alta capacidad de movilización, ya que está formado por blocks de longitud mínima lo que permite la circulación de una mayor cantidad de trenes en la vía. La longitud de los blocks está dada por la mínima distancia requerida por un tren para detenerse a plena marcha. La lógica de operación se basa en que el tren al trasladarse en la vía va accionando automáticamente una estela de señales. De esta manera, el block ocupado está con señales a rojo (detención), el siguiente con señales amarillo (precaución) y el subsiguiente con señales a verde (normal). Este sistema es viable en tramos de más de dos vías. En Chile el Ferrocarril Metropolitano METRO ocupa un sistema de este tipo.

### **3. COSTOS**

#### **3.1. Aspectos generales.**

Los costos de un sistema de movilización comprenden los costos de provisión, mantenimiento y operación del sistema propiamente tal, y los costos operacionales de los trenes ocasionados por demoras y detenciones. A continuación se desarrollan ambos aspectos.

#### **3.2. Costos de provisión, mantenimiento y operación.**

El costo de provisión del sistema de movilización, en sus ítemes de instalación, operación y mantenimiento, es constante a variaciones en el tráfico, y está relacionado más bien con la capacidad del sistema. Ello significa que los costos marginales de corto plazo son nulos. Sin embargo, en un contexto de largo plazo, un incremento del flujo que se debe atender exigirá pasar a sistemas de mayor capacidad, y por ende de mayor costo fijo, produciendo así costos marginales de largo plazo no nulos.

Con la finalidad de evaluar el costo base por instalación, mantención y operación de los sistemas de movilización, es de utilidad definir unidades cuyo costo sea fijo, para un sistema de movilización dado. Al analizar los listados de precios unitarios de los elementos que conforman los sistemas se puede notar que los requerimientos para instalación, mantención y operación se dividen básicamente en 2 grupos: elementos requeridos para las estaciones y elementos requeridos por unidad de longitud de la vía. Otros grupos son los elementos requeridos por central de tráfico y por block intermediario, en el caso que sean utilizados por el sistema.

Para los distintos sistemas de movilización comando local, staff y block intermediario, es posible calcular los costos fijos de provisión por unidad de tiempo, a partir de listados de elementos y sus precios unitarios. Por razones de espacio es posible reproducir aquí sólo los resultados finales obtenidos, que se presentan en el Cuadro N°1.

**CUADRO N°1**  
**RESUMEN COSTOS BASICOS UNITARIOS POR MOVILIZACION [\$/día]**  
**(\$ Agosto 1992)**

| SISTEMA         | UNIDAD DE MOVILIZACION |          |            |         |
|-----------------|------------------------|----------|------------|---------|
|                 | KILOMETRO              | ESTACION | C. TRAFICO | BLOCK I |
| C. LOCAL S. VIA | 6580                   | 39358    | 25161      | 2353    |
| C. LOCAL D. VIA | 8437                   | 54066    | 25161      | 3824    |
| STAFF           | 1567                   | 11166    | 25161      |         |

Fuente: Díaz (1993)

### 3.3. Costos operacionales de trenes.

Estos costos comprenden el costo adicional en el cual incurren los trenes producto de la diferencia entre un itinerario realizado a vía libre y el itinerario desarrollado incorporando el efecto del tráfico existente, el cual tiene dos componentes: el costo por recursos inmovilizados y el costo por detenciones.

#### 3.3.1. Costo por Recursos Inmovilizados

Este costo es función directa de las demoras por cruzamiento. Puede evaluarse como el costo financiero que provoca tener detenido un tren cierta cantidad de tiempo. Los principales recursos afectados son los siguientes: material rodante, tripulación locomotora y carros, pasajeros y cargas.

- a) **Material Rodante.** El costo por inmovilización del material rodante se relaciona con su menor utilización para fines productivos. Puede cuantificarse como el costo de oportunidad del capital invertido en equipo rodante.
- b) **Salario de la Tripulación.** En general, la tripulación de un tren trabaja recibiendo un sueldo fijo. Sin embargo, en algunos casos existe una renta variable dependiendo del tiempo extra que signifique un retraso en el itinerario. Por otra parte, en un contexto de largo plazo las demoras pueden incidir en las dotaciones de personal necesarias.
- c) **Valor del Tiempo de los pasajeros.** Pese a que en general el tiempo de los pasajeros no tiene un precio de mercado, existe consenso en que constituye un recurso que debe ser cuantificado y valorado en la evaluación social o privada de proyectos.
- d) **Valor del tiempo de la Carga.** Puede cuantificarse como un costo de capital equivalente al inventario inmovilizado. Su evaluación práctica es compleja pues cada tren posee una carga distinta en cantidad y tipo de producto.



### 3.3.2. Costo por Detenciones

Este costo se produce como consecuencia de las detenciones adicionales debido a cruzamiento. Comprende un mayor consumo de energía por la aceleración posterior a la detención, y un consumo adicional de zapatas de freno y otros gastos de mantenimiento de trenes producto del frenado. Este costo depende de factores tales como la velocidad en plena vía, la velocidad de pasada, el tonelaje del tren y la potencia de la locomotora.

Luego, conociendo el valor del KWH, del costo del kg de zapata y asimilando el tren considerado a alguna categorías tipo para la cual se cuente con información, se puede calcular el costo por detención, en función de la velocidad del tren. Para esto también se puede utilizar las velocidades admisibles por tramo.

### 3.3.3. Resumen

Se observa que la cuantificación de costos operacionales requiere dos componentes principales: un modelo predictivo de la ocurrencia de demoras y detenciones, que se presenta en la sección siguiente, y una serie de precios unitarios.

## 4. SIMULACION

La predicción de demoras y detenciones de trenes es un tema complejo, que en general no admite soluciones analíticas satisfactorias, pese a los esfuerzos que han sido dedicados a ello (ver, por ejemplo, Petersen, 1974 y 1975; English, 1978).

Por esta razón, se ha preferido modelar este fenómeno mediante técnicas de simulación. Estas técnicas han sido utilizadas en el extranjero, y una revisión puede encontrarse en Petersen (1977) y Assad (1979). Dada la complejidad de los procesos, es necesario utilizar programas computacionales de simulación. Sin embargo, dicho software no se encuentra disponible en el mercado, por lo cual fue necesario desarrollar un programa de simulación microscópico propio.

La simulación debe en principio aportar los siguientes resultados.

- a) Demoras por cruzamiento y adelantamiento de trenes, con respecto a los itinerarios deseables.
- b) Detenciones por cruzamiento y adelantamiento de trenes, adicionales a las previstas en los itinerarios.
- c) Capacidad del sistema, entendida como el flujo máximo que puede circular.

Por otra parte, la simulación debe ser sensible a las variables de diseño y a las políticas de operación implícitas en el sistema de movilización que se está modelando. Entre ellas cabe destacar

- la lógica de operación de blocks
- las categorías de trenes, con sus correspondientes prioridades, velocidades de circulación, y otros atributos.
- las características del sistema de movilización
- los flujos de trenes por categoría y sus itinerarios deseables

#### 4.1. Elementos básicos

Un block no puede ser ocupado por más de un tren en cada instante de tiempo, por razones obvias de seguridad. Esta restricción limita la capacidad de un block aislado, la cual queda expresada en función de su longitud y la velocidad a desarrollar por el tren. Dado que esta última variable depende de la categoría del tren, la capacidad total, expresada por ejemplo en número de trenes por día, depende de la composición del flujo de trenes.

Por otra parte, la capacidad es afectada por la lógica de operación, relativa a la forma de establecer la prioridad de pasada de trenes. Hay dos casos principales.

- i) **Prioridad asignada.** un tren puede ocupar un block sólo si al hacerlo no provoca alteraciones en la circulación de los trenes de mejor prioridad, cualquiera sea el sentido de circulación de estos. Ello significa que la ocupación sólo puede autorizarse si el tren es capaz de desocupar el bloque antes de que éste sea necesario para otro tren de mayor prioridad.
- ii) **Prioridad de llegada.** en el caso de dos trenes con la misma prioridad ocupa el block el tren que llegó primero a un extremo del mismo.

Sin perjuicio de lo anterior, la operación debe proveer adecuadas holguras, definidas como un tiempo extra que se agrega al tiempo de viaje calculado para recorrer un block, con la finalidad de tener la seguridad de que un tren de baja categoría pueda llegar a tiempo al cruzamiento con trenes de mejor prioridad, aún cuando sufra cierto retraso. Una segunda holgura se refiere al tiempo necesario para confirmar la desocupación del block e informar al tren siguiente.

Por otra parte, la simulación debe considerar la existencia de tramos de doble vía, la topología de la red y la existencia de blocks intermediarios.

#### 4.2. Programa computacional.

El programa de simulación se desarrolló en lenguaje FORTRAN-77. Los datos de entrada comprenden.

- i) parámetros operacionales, que representan las características de la red.
- ii) parámetros de la demanda, que representan los atributos de los trenes.
- iii) datos complementarios.

El programa opera según la siguiente lógica.

- i) Se simula en primer lugar el conjunto de trenes de mejor prioridad. Para ello se confecciona una lista, ordenada por tiempo, de los instantes en que cada tren ocuparía y desocuparía cada block si cumpliera su itinerario.
- ii) En caso de conflicto, se asigna el block al tren que lo ocuparía primero, tomando nota de la demora y eventual detención adicional causada al otro.
- iii) Se corrige el itinerario de los trenes que hayan sido demorados.
- iv) Se itera el procedimiento en el tiempo hasta completar la asignación de tiempos de block a trenes para la prioridad más alta.



- v) Se repite el procedimiento anterior para los trenes de cada prioridad, en orden descendente, tomando en cuenta que existen tiempos de block ya ocupados por trenes de mejor prioridad.

Las principales salidas del programa contienen.

- i) Itinerario resultante de cada tren, el cual incluye hora de llegada y salida en cada estación, y tiempo de viaje total.
- ii) Demoras provocadas por cruzamiento, total y por categoría de tren.
- iii) Detenciones adicionales con respecto a las previstas en el itinerario, total y por categoría de tren.
- iv) Indicador del tiempo que permanecen ocupados los blocks con respecto al tiempo total de simulación, resultado que se ocupará para el cálculo de la capacidad de un tramo, como se verá posteriormente.

El programa ha sido debidamente validado, corriendo numerosos ejemplos, con resultados satisfactorios. Se encuentra implementado en plataforma DOS para microcomputadores.

#### 4.3. Capacidad de tramos.

El software fue utilizado para calcular la capacidad de un tramo, definido como una secuencia de blocks. La capacidad se puede definir como el número máximo de trenes por unidad de tiempo que pueden circular por el tramo sin que se produzca una saturación del sistema, y es por lo tanto función de la composición por categoría del flujo de trenes.

Fueron realizadas para este efecto numerosas corridas del programa para casos reales de la red ferroviaria chilena ubicados en la vía principal Santiago-Temuco. En estas corridas se incrementó progresivamente el número de trenes, manteniendo su composición por categoría. El principal resultado obtenido es que la tasa de ocupación de blocks crece en forma lineal con el flujo hasta alcanzar un valor crítico, pasado el cual la tasa de ocupación se incrementa menos que proporcionalmente, revelando la existencia de un fenómeno de saturación, según se ilustra en la Figura N°1, para situaciones en simple y doble vía.

La principal conclusión obtenida es que la saturación se produce para tasas de ocupación de blocks cercanas al 50%, en todos los casos. Esta tasa queda dada por la siguiente expresión .

$$TOB = \left( \sum_{i=1}^n t_i \right) / (N \cdot 1440)$$

donde  $t_i$  : Tiempo de viaje del tren  $i$  [minutos].

$N$  : Número de blocks del tramo.

$n$  : Número de trenes que circulan por el tramo al día.

## 5. APLICACION.

El programa de simulación fue aplicado al tramo comprendido entre las estaciones de San Fernando y Talca. Se consideró seis categorías de trenes:

- c1 . trenes pasajeros automotor salón
- c2 . trenes rápidos
- c3 . trenes expresos
- c4 . trenes carga tipo x
- c5 . trenes carga tipo z
- c6 . vehículos de mantención

La modelación se realizó para 5 situaciones o sistemas de movilización hipotéticos:

- Situación 1 . Simple vía 10 estaciones (sacando 4 estaciones con respecto a la situación actual).
- Situación 2 . Simple vía 14 estaciones (situación actual).
- Situación 3 . Simple vía 14 estaciones con 10 blocks intermedios.
- Situación 4 . Doble vía 14 estaciones.
- Situación 5 . Doble vía 14 estaciones con 10 block intermedios.

### 5.1. Cuantificación de demoras y detenciones

Para estos efectos se utilizó el modelo de simulación desarrollado, obteniendo una curva flujo-demora para cada una de las 5 situaciones operativas planteadas. En la simulación se adoptó los siguientes supuestos:

- El flujo de trenes se realiza siempre entre las estaciones cabeceras del tramo.
- Al variar el flujo siempre se mantiene la proporción de trenes en cuanto a las categorías.
- La tasa de salida de trenes es siempre uniforme, desde ambos cabeceras de tramo.

### 5.2. Costos

Utilizando los valores unitarios presentados en el Cuadro N°1 se puede evaluar el costo fijo para las situaciones consideradas. El resumen de este cálculo se presenta en el Cuadro N°2.

**CUADRO N°2**  
**COSTOS FIJOS**  
**Tramo San Fernando - Talca**

| SITUACION | COSTO [\$/día] |
|-----------|----------------|
| 1         | 1.277.200      |
| 2         | 1.434.600      |
| 3         | 1.595.600      |
| 4         | 1.890.100      |
| 5         | 2.132.900      |



Aplicando las consideraciones expuestas en la Sección 3.3 y considerando las composiciones típicas de los trenes de carga que circulan en la red, se calculó el costo de un minuto de demora para trenes de carga y de pasajeros. El detalle de los cálculos no puede ser incluido por razones de espacio, pero puede ser consultado en Díaz (1993). Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro N°3.

**CUADRO N°3**  
**COSTO MINUTO TREN POR CATEGORIA**

| CATEGORIA | COSTO<br>[\$ /MIN] |
|-----------|--------------------|
| C1        | 1089               |
| C2        | 1441               |
| C3        | 1270               |
| C4        | 316                |
| C5        | 484                |
| C6        | 539                |

La Figura N°2 presenta los costos totales obtenidos para cada una de las cinco situaciones en función del tráfico expresado en número de trenes por día. Estos costos se pueden interpretar como funciones de costo de corto plazo. A partir de ellas, es posible establecer rangos para los cuales cada sistema es óptimo en el sentido de representar el menor costo total, los cuales se presentan en el Cuadro N°4.

**CUADRO N°4**  
**Rangos óptimos para las alternativas de movilización**

| Situación                                | Rango<br>(trenes/día) |
|--|-----------------------|
| simple vía - 10 estaciones               | 0 - 28                |
| simple vía - 14 estaciones               | 28 - 48               |
| simple vía - 14 estaciones - 8 blocks i. | (1)                   |
| doble vía - 14 estaciones                | 48 - 104              |
| doble vía - 14 estaciones - 8 blocks i.  | 104 - 140             |

(1) situación dominada.

A partir de lo anterior es posible determinar una función de costos de largo plazo como envolvente de las funciones de corto plazo. En esta aplicación, fue ajustada una forma polinomial que se ilustra en la Figura N°3. A partir de dicha función, es posible calcular analíticamente una función de costos marginales de largo plazo.

### 5.3. Antecedentes para tarificación

Un sistema de tarificación por el uso de vías férreas, en su componente de movilización, debiera consultar dos componentes principales: un cargo por el uso de la capacidad y otro por las demoras inducidas al resto de los trenes. En esta aplicación, nos referiremos sólo al primero de ellos.

Una primera consideración es que el flujo total en un tramo de vía puede ser inferior a la capacidad. En este caso, si se carga a cada tren sólo el costo de la fracción de capacidad ocupada, no se recupera el costo total de provisión de dicha capacidad. Si el sistema tarifario debe lograr dicha recuperación, deberá cobrarse a cada tren una cantidad en principio arbitraria por encima del costo de la capacidad ocupada.

Según resultó de la modelación, la capacidad de un tramo de vía se alcanza cuando la tasa de ocupación de bloks se acerca al 50%. Por lo tanto, un valores para el peaje mínimo que debería pagar un tren, por este concepto, sería el doble del costo por unidad de tiempo de ocupación.

## 6. CONCLUSIONES

El programa de simulación desarrollado por los autores podría ser de gran utilidad en el apoyo a estudios de transporte ferroviario, ya que permite captar los efectos en la circulación de los trenes al aplicar ciertas políticas de movilización. Entre estos efectos está la calidad del servicio provisto a los usuarios, el cual incide en los atributos relevantes para efectos de la modelación de partición modal (ver Videla et al., 1993a, 1993b).

Algunas aplicaciones que puede tener el programa de simulación se refiere a los temas siguientes.

- a) Diseño de itinerarios. El programa puede efectivamente apoyar estas tareas, pues permite trabajar a un nivel de detalle que coincide con el utilizado en dicho diseño.
- b) Cálculo de la capacidad de tramos de vías, especialmente en situaciones hipotéticas en las cuales se introducen modificaciones en los aspectos físicos u operativos del sistema, tales como variaciones en las velocidades permitidas de circulación, eliminación o incorporación de estaciones movilizadoras, incorporación de blocks intermediarios, etc.
- c) Cálculo del costo adicional por la movilización de un tren. El programa ofrece la posibilidad de evaluar el efecto que produce la introducción de un tren extra en la circulación preestablecida de trenes en la red. Esta evaluación es posible llevarla a cabo simulando los itinerarios en las situaciones con y sin la circulación del tren mencionado, y asignando un costo a la demora y las detenciones extras que sufren los trenes a causa de la nueva situación.
- d) Factor de potencia. Se está implementando en EFE un software de simulación del consumo eléctrico en función de un supuesto patrón de flujos instantáneo. La idea es combinar este software de simulación eléctrico con el de simulación del tráfico con el fin de poseer una herramienta dinámica para controlar el consumo de demanda integrada en la EFE.
- e) Venta de Canales de Circulación. En el ámbito de la privatización de los operadores de ferrocarriles, EFE otorgará canales de circulación a solicitud de los clientes, para lo cual deberá resguardar la fluidez del tráfico comprometida con los restantes operadores comprometidos. Esto hace que el programa de simulación, según lo expresado en (a) y (b) pueda dar las pautas para los niveles de servicio a ofrecer a los clientes.

Cabe mencionar que los puntos (d), (e) y (b), este último en lo que se refiere a eliminación de estaciones, constituyen aplicaciones de corto plazo para EFE.

La versión actualmente disponible del programa presenta algunas limitaciones, en el sentido de que es poco amigable a nivel de usuario y no tiene contemplado en su diseño aspectos de optimización de programación. Sin embargo, estas limitaciones son superables en la medida que sea posible destinar recursos a ello.



## **AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación fue principalmente financiada por la Empresa de los Ferrocarriles del Estado, por el Proyecto FONDECYT 1217-91 y por el proyecto DTI I-3092/9222 de la Universidad de Chile.

## **REFERENCIAS**

Assad A., Arjang (1979) Models for rail transportation. *Transportation Research*, Vol.14a, pp 205-220.

Díaz, Manuel (1993) Modelación de costos de movilización de trenes. Tesis de título, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

EFE (1986) Estudio de prefactibilidad modernización de instalaciones de señalización. Empresa de los Ferrocarriles del Estado, Santiago.

EFE (1987) Reglamento General de Movilización de Trenes. Empresa de los Ferrocarriles del Estado, Santiago.

English, G. W. (1978) An analitic model for the analysis of congested rail lines. *Proceedings of the Biennial CIGGT Seminar on Railway Research*, CIGGT Report 78-5, pp 203-218, Kingston.

Gaum, Manfred (1992) Moving-Block Signalling. *International Railway Journal*, May, pp 20-21.

Petersen, E. R. (1974) Over the road transit time for a single track railway. *Transportation Science* 8, pp 65-74.

Petersen, E. R. (1975) Interference delays on a partially double-tracked railway with intermediate signalling. *Transportation Research Forum*, Toronto 1975.

Videla, J., J. Vera y G. Véjar (1993a) Percepción de los pasajeros del transporte ferroviario y carretero: un modelo de elección modal. VI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Santiago.

Videla, J., J. Vera y G. Véjar (1993b) Percepción del nivel de servicio ofrecido por los operadores de transporte de carga: un modelo de elección modal. VI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Santiago.





