



Aproximación a una función de costos para modelación de la **red ferroviaria** colombiana

Libardo Silva Morales

Mg(C) en Ingeniería con énfasis en Transporte,
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Investigador Grupo GIDPOT, Facultad de Ingeniería
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Ing.lsm@gmail.com

Para citar este artículo / To reference this article /
Para citar este artículo
Silva M. L. (2012). Aproximación a una función de costos
para modelación de la red ferroviaria colombiana.
Ingenio Magno. Vol.3, pp. 66-71. Universidad Santo Tomás
Tunja - CIAM.

Resumen— En este trabajo se propone una función de costos para la modelación de transporte ferroviario acorde a las características de la red ferroviaria colombiana y su operación. Se hace un análisis de las variables y la forma funcional que deben hacer parte de una función de costos para el modo férreo, a partir de información secundaria (velocidad y capacidad), de tal manera que permita representar las condiciones actuales y futuras del desempeño del sistema bajo ciertas características operacionales. El análisis de las funciones se centra en tramos de las líneas férreas.

Palabras clave— Función de costos, modelación de transporte, transporte ferroviario.

Abstract— In this paper we propose a cost function for rail transportation modeling according to the characteristics of the rail network in Colombia and its operation. An analysis of the variables and the functional form that should be part of a cost function for the railway, based on secondary information (speed and capacity), in such a way as to represent current conditions and future performance system under certain operating characteristics. The task analysis focuses on sections of railway lines.

Keywords— Cost function, modeling of transport, railway transport.

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación, se plantea a partir de la necesidad de contar con herramientas de modelación propias para el medio colombiano. Se parte del conocimiento de la operación del transporte ferroviario en Colombia. Se concentra el análisis en características operacionales y de explotación del sistema ferroviario nacional.

Este trabajo de investigación presenta la metodología y los resultados para identificar una forma funcional o modelo de costo, que represente el tiempo de viaje en una red férrea, para modelación estratégica de transporte en un ámbito intermodal.

Los modelos que se emplean en el presente trabajo hacen parte de las llamadas funciones de costo, las cuales se utilizan en la etapa de asignación de viajes o de carga a la red de transporte, indicando el incremento en el tiempo de viaje en cada arco, dada una determinada operación del sistema ferroviario y frente a las características relevantes de la infraestructura.

II. DESARROLLO

Branston (1976), en una extensiva revisión de funciones de volumen tiempo de viaje, separa en dos los enfoques usados por investigadores para definir las funciones volumen demora; (a) las funciones teóricas no necesariamente conducen a una relación simple entre el tiempo de viaje o velocidad y el flujo, estos modelos requieren más información sobre la características de la red tales como espaciamiento de señales, ancho de la vía como dato de entrada, estas

funciones consideran el tiempo de recorrido y el tiempo de cola separadamente. (b) Las funciones matemáticas normalmente garantizan una relación relativamente simple entre el tiempo viaje y el flujo, los parámetros de las funciones pueden relacionarse en un “vía conocida” a las características del arco.

A continuación se presenta una función de este tipo.

$$f^{Hyp} = \frac{1}{(1-X)} \quad (1)$$

En la figura 1 se muestra el comportamiento de este tipo de funciones.

Por otra parte, plantea que la relación entre el tiempo de viaje y el flujo del arco debe seguir tres reglas: (a) cuando el flujo del arco es bastante pequeño, el tiempo de viaje del arco está cerca del tiempo de viaje a flujo libre; (b) cuando el flujo del arco es menor de su capacidad, el tiempo de viaje de arco aumenta despacio y ascendentemente con el flujo de tráfico; (c) bajo la condición de un estado constante, la curva de la función del arco se vuelve asintótica del flujo máximo en el eje vertical.

Wardrop (1968) propuso un modelo basado en la velocidad de recorrido en función del flujo y del ancho de la vía, y el tiempo por demora, como función de flujo, ya que la velocidad es el inverso del tiempo de viaje, la relación es la siguiente.

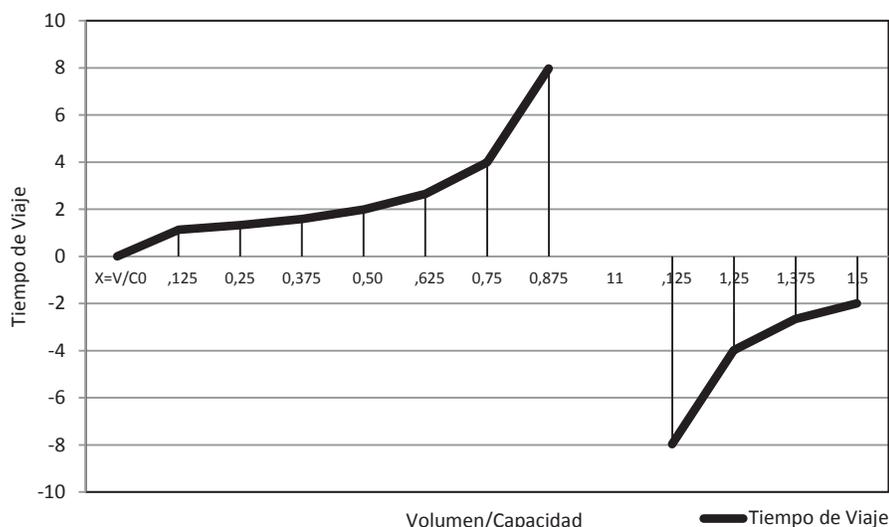


Figura 1. Función hiperbólica.

Fuente: Autor.

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{31 - \frac{140}{W} - 0.0244 \frac{q}{W}} + \frac{f}{1000 - 6.8 \frac{q}{\lambda W}} \quad (2)$$

Donde V es la velocidad promedio en millas por hora, W es el ancho promedio de la vía en pies, q es el flujo en vehículos equivalentes por hora; λ es el tiempo de verde sobre el ciclo y f es el número de señales por milla.

Davidson (1966) usando datos de estudios previos de Toronto, propuso una función de tiempo de viaje hiperbólica (carreteras). En la expresión uno se presenta la formula general.

$$t = t_o \left[\frac{J_D X}{(1-X)} \right] \quad (3)$$

Donde:

t : Promedio de tiempo de viaje por unidad de distancia (en segundos por km.)

t_o : Mínimo tiempo de viaje por unidad de distancia (flujo cero) (en segundos por km.)

J_D : Un parámetro de la demora (ó 1- = un parámetro de calidad de servicio)

$X = \frac{q}{Q}$: Grado de saturación

q : Demanda (llegada) relación de flujo en (veh/h)

Q : Capacidad (veh/h)

En comparación con la función propuesta por Branston (1), incorpora dentro del modelo propuesto el tiempo a flujo libre y una relación del grado de saturación.

Overgaard (1967) calibró la siguiente modelo usando datos recolectados en Toronto por Irwin y Von Cube en 1961.

$$C = C_0 \alpha^\beta \left(\frac{V}{K} \right) \quad (4)$$

Donde C representa el costo para un flujo dado V, C_0 , es el costo a flujo libre y K la capacidad del arco.

Spiess (1990) desarrolló la formulación de la función volumen demora cónica. Esta función matemática es una función alternativa a la ampliamente usada BPR desarrollada por la Bureau of Public Roads, de los Estados Unidos; la mayor ventaja de la función cónica es la más rápida convergencia dentro del proceso de asignación de equilibrio del usuario, este método utiliza un proceso iterativo que consigue una solución convergente, cuya condición primordial consiste en que ningún usuario puede mejorar su tiempo de viaje al elegir cualquier otra ruta.

Spiess define un grupo de ecuaciones así:

$$f(x) = 2 + \sqrt{\alpha^2(1-x)^2 + \beta^2} - \alpha(1-x) - \beta$$

Donde β está dado como:

$$\beta = \frac{2\alpha - 1}{2\alpha - 2} \quad (6)$$

y α es un número mayor que 1.

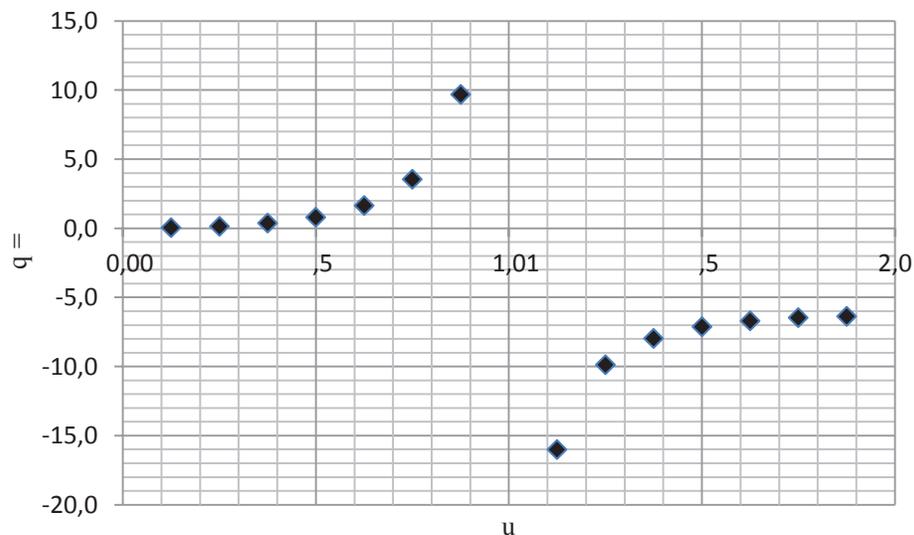


Figura 2. Función Davidson

Fuente: Autor.

Aplicando el modelo de Spiess (5), se observa que para el rango entre 0 y 1, se obtiene valores entre 3.75 y desciende a 3.17, lo cual no representa el comportamiento que se quiere simular.

Otra forma funcional es la propuesta por la Oficina de Vías Públicas de Estados Unidos en 1964, la ventaja de la función BPR es la simplicidad de formulación.

$$t = t_i \cdot \left[1 + \alpha_i \cdot \left(\frac{x_i}{C_i} \right)^{\beta_i} \right]$$

Donde:

- t_i = Tiempo a flujo libre sobre el arco i
- C_i = Capacidad del arco i
- x_i = flujo sobre el arco i
- α_i = Constante
- β_i = Constante

Las funciones de costo de este tipo, constan de un componente de tiempo a flujo libre, multiplicado por una función de congestión

normalizada, cuyos parámetros son la relación volumen - capacidad, la figura 4 muestra las curvas para valores bajos de la relación volumen - capacidad y diferentes valores de beta.

III. VARIABLES DE LAS FUNCIONES DE COSTO

A. VELOCIDAD

Se encuentra así que existe una relación de la velocidad con el radio de curvatura (tabla 3). De esta manera se dispone de una velocidad media de operación con un radio de curvatura conocido.

- 1) Velocidad y el radio de curvatura
- 2) Velocidad y pendiente media (topografía)

La tabla 4 relaciona diferentes características operacionales en función del tipo de terreno, la pendiente, el radio la locomotora tipo, proporcionando así, otra velocidad media de operación que considera los elementos físicos de la red.

Descripción T	rocha de Yarda T			rocha Estándar		
	K	R	V(km/h)	K	R	V(km/h)
Velocidad Máxima en la Curva $V=K.R^{1/2}$	3.36	150	40	4.6	150	50
		200	45		200	65
		250	53		250	73
		300	58		300	79
		500	75		500	103

Tabla 1. Velocidad en función del radio de curvatura.
Fuente: Estudio ferrocarril del Carare, 1980, citado en Rey (2002).

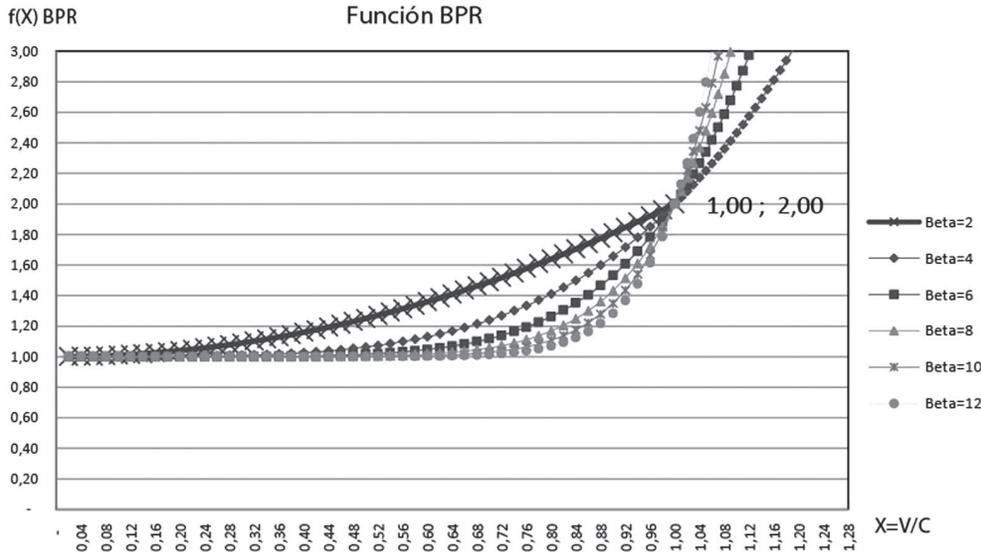


Figura 4. Función BPR para valores pequeños de la relación v/c.
Fuente: Autor.

De esta manera se encuentra que el arco más crítico es aquel que presenta una elevada pendiente longitudinal y un pequeño radio de curvatura. Se propone tomar la característica física que mayor afecte la velocidad (característica crítica).

B. TIEMPO TOTAL DE RECORRIDO

Lo que se pretende estimar es el tiempo total de recorrido considerando los diversos elementos físicos y de operación de la red (figura 5).

Tabla 2. Características topográficas promedio.
Fuente: Ferrocarriles Nacionales. En Informe de SIT Caribe.

Denominación P	endiente (%)	Radio mínimo (m)	Locomotora Tipo	Velocidad media (Km/h)
Plano	0 - 1.0	70	U20 C	40
Ondulado 1	,01 - 2.06	0	GR 12	30
Montañoso	2.01 ¥ 3.55	0	GR 12	20

C. VOLUMEN

Los volúmenes en trenes son bajos, en Estados Unidos en promedio 96 trenes diarios, entran y salen de una estación intermodal en Chicago, C&K Trucking (2009), en Europa, pero en Colombia, en el cerrejón, los flujos son de 7 trenes diarios en una infraestructura de trocha ancha.

En infraestructura de trocha angosta el caso de la red férrea administrada por FENOCO, circulan 22 trenes /día, en el tramo La Loma Puerto Drummond.

Que estos valores comparados con los flujos de que se presentan en una carretera son bajos, aspecto a considerar en la elección de la función de costos.

Colombia está conformada por un área de 1.141.000 kilómetros cuadrados, en la cual se encuentran tres cordilleras occidental, oriental y central. Elementos de la geografía que hacen que el sistema de transporte de Colombia tanto de carga como de pasajeros se planifique de manera que se tenga en cuenta dichos aspectos en las obras y planes que quieran desarrollar.

Dichas características se pueden involucrar en los modelos, a través de las funciones de costo y a través de la representación de las características en tipologías de arcos de acuerdo a las características que se han identificado, en este trabajo interesan las características del tipo de terreno plano, ondulado y montañoso, para el modo ferroviario, y la geometría de las curvas que limitan la operación del modo en mención.

B. Velocidad de referencia

Una pregunta que surge del desarrollo del presente trabajo, es: ¿Cómo interpretar el concepto de congestión en líneas férreas de vía sencilla?, de esta manera se encuentra la siguiente definición.

De acuerdo con, Robuste (2005), “El concepto más simple de congestión es “el que se relaciona con la medida de las demoras producidas por circular a una velocidad menor que una velocidad de referencia” (Robusté, 1998).” tomando este concepto y adaptándolo para la estimación de las demoras en una línea ferroviaria, partiendo de la base que la velocidad es la principal característica y la de mayor importancia en el momento de definir, las demoras y la capacidad de la vía férrea.

Se Considera que la topografía (pendientes longitudinales) y radio de curvatura, inciden, limitando la velocidad que se puede desarrollar en el tramo se realiza el siguiente experimento. Se parte de la velocidad ideal, que de no existir la limitante de la pendiente y el radio de curvatura

IV. ENSAYO DE LA FUNCIÓN PROPUESTA

A. Contexto de Estudio - Condiciones Colombianas

La red colombiana, tiene diseños del siglo pasado basado en trenes de explotación de trenes mineros, para lo cual los radios de curvatura y el ancho de trocha eran los más económicos y eficientes, para la época, sin embargo, las tecnologías y las exigencias de competitividad requiere que se cuente con infraestructura eficiente, frente a las grandes reservas de minerales que exigen que se use un modo eficaz para llevar volúmenes a grandes distancias; sin embargo si existen grandes volúmenes, como los que se presentan en el norte de Colombia, se puede lograr eficiencia de la red, como la obtenida en la red administrada por FENOCO, en una longitud de 200 km, transportando en una operación de 22 trenes diarios con cerca de 6000 toneladas por tren, un total de 22 millones de toneladas año.

se podría desarrollar en el tramo, la cual se toma como velocidad de referencia (velocidad ideal). Por otra parte se toma la velocidad que de acuerdo con la tipología del terreno y del radio de curvatura se obtiene en la práctica, de acuerdo con la tipología definida, a la que se denominará velocidad práctica.

Se determina el valor que aumenta el tiempo de viaje, comparando el tiempo de viaje, de la velocidad en condiciones ideales y la velocidad practica. La diferencia constituye el tiempo adicional de viaje por condiciones geográficas y de geometría.

Se obtiene de manera empírica que la forma funcional que representa dicho comportamiento es potencial y de la forma funcional del Tipo BPR, considerando el número de sitios de paso y adelantamiento (estaciones) (8).

$$T_f = T_o + \alpha(X)^\beta ; X = \frac{(T_p - T_i) + (T_e + C)}{1440} \quad (8)$$

Tf=Tiempo total en el arco

To =tiempo a flujo libre en el arco

X=valor compuesto que representa la demora por condiciones geométricas en puntos de intercambio, con base en el día.

Tp=tiempo de viaje en el arco con restricciones de geometría (velocidad practica).

Ti=tiempo de viaje en función de la velocidad máxima obtenida en el tramo.

Te=tiempo de demora en la estación, por cruce o abastecimiento

C=capacidad media de la línea, en trenes/día.

Una vez definidas las velocidades ideal y práctica por tramo, se determina los tiempos de viaje práctico e ideal, To y Ti respectivamente, sumando la demora que normalmente es un valor medio en cada cruce dependiendo del nivel de tráfico. Para el caso se usó el valor de la capacidad.(Te=Tiempo de la demora por la capacidad media del corredor en análisis)

V. CONCLUSIONES

Se propone una función que considera tiempo de viaje ideal y tiempo de viaje que se obtiene bajo las restricciones geométricas; función llamada de velocidad de referencia (velocidad típica de la ruta de análisis) (9).

$$T_f = T_o + \alpha(X)^\beta ; X = \frac{(T_p - T_i) + (T_e + C)}{1440} \quad (9)$$

La metodología propuesta se plantea en función de las velocidades, característica que incorpora la mayoría de los efectos que se encuentran en una red ferroviaria referida al día, que para transporte de carga es la unidad de análisis usada.

REFERENCIAS

BPR. (1964) Traffic Assignment Manual for Application with a Large, High Speed Computer. Washington, U. S. Dept. of Commerce Bureau of Public Roads Office of Planning Urban Planning Division

Branston, D. (1976) Link capacity functions: a review. Transportation Research, 10, 223-236.

Caliper corporation (2005). Travel Demand Modeling with TransCad 4.8. Newton, Massachusetts. September 2005.

DAVIDSON, (1966), A Flow Travel Time Relationship for Use in Transportation Planning, en "Proceedings of the Australian Road Research Board", 3, pp. 183-194.

Gorman, M. F. (2009). Statistical estimation of railroad congestion delay. Transportation Research Part E 45 (2009) 446-456.

MARINOV, M. et al. (2010). Concepts, Models and Methods for RailFreight and Logistics Performances: an inception paper. Available on line: www.civil.ist.utl.pt/wctr12_lisboa/WCTR_General/documents/01843.pdf Ministerio de Transporte (2010). Transporte en cifras versión 2010. Grupo de Planificación Sectorial de la Oficina Asesora de Planeación

ORTÚZAR, J.de D. y WILLUMSEN, 2001. Luis G. "Modeling Transport". ISBN 0471861103. John Wiley & Sons.

REY V., F. (2002). Comparaciones técnicas entre anchos de trocha ferroviaria yarda y estándar a propósito del proyecto del tren de cercanías. En Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina. No.12, págs. 65-80.

Robuste, A.F. (2005). E- logistics. Editorial UPC. Barcelona. Spiess, H. (1990) Conical Volume-Delay Functions. Transportation Science 24, 153-158.

Union Internationale des Chemins de Fer. UIC code 406R. (2004). Capacity. 1st edition June 2004.