

“Monitoreo y optimización online de una línea de Metro: lecciones de un prototipo en Metro de Santiago”

Jaime Bustos¹, Juan Uribe², David Zamora¹ y Jonson Fuentes¹
Boris Pavez¹, Alfredo de La Quintana³, Conrad Ziebold², Néstor Marín²

¹Universidad de La Frontera, Facultad de Ingeniería, Ciencias y Administración,
Laboratorio de Ingeniería Aplicada –Departamento de Ingeniería de Sistemas

²Metro de Santiago-Chile

³CONECTA, Santiago-Chile

Email: jbustos@ufro.cl

Resumen

Se presenta un sistema en línea para el monitoreo y optimización del consumo de energía de tracción en una línea de Metro, satisfaciendo restricciones operacionales y de seguridad típicas, al tiempo de mantener altos estándares de calidad de servicio. Los sistemas de trenes urbanos (metros) presentan algunas características particulares que hacen especialmente difícil el monitoreo y optimización en línea, tales como: alta frecuencia de viajes cortos, detenciones cortas para subida y bajada de pasajeros, capacidad limitada de trenes, existencia de estaciones de transbordo que combinan diferentes líneas, alta demanda de servicio en periodos específicos y comunicaciones convoy-estación dificultadas por los viajes en túneles. Estas características imponen altos requerimientos computacionales y de comunicación de datos así como sistemas avanzados de despacho en línea debido al tamaño y complejidad del problema de optimización asociado y los cortos tiempos permitidos para analizar e implementar soluciones óptimas.

Se describe un sistema prototipo desarrollado y probado en Metro de Santiago. Se describen los principales componentes: captura de datos y comunicaciones en línea, análisis de datos, optimización en línea e interface de regulación de tráfico.

El problema se aborda como un modelo matemático binario mixto en un contexto de control en línea. El modelo se alimenta con datos capturados en línea desde la operación de los trenes y transferido inalámbricamente al computador central del sistema. El modelo de optimización hace uso de la naturaleza discreta de los perfiles de viaje predefinidos entre una estación y otra en la línea. Para resolver el problema se usan aplicaciones estándar de optimización así como procedimientos metaheurísticos desarrollados, los que requieren unos pocos segundos de tiempo de cómputo. Se presentan resultados de pruebas en terreno. Finalmente el artículo presenta propuestas de trabajo futuro.

Abstract

We present a TIC enabled system for online monitoring and optimization of traction energy consumption in a subway line (Metro de Santiago), satisfying typical operational and safety constraints while keeping high standards of quality of service. Subway systems present some particular characteristics that make especially hard the monitoring and online optimization, such as: high frequency of short trips, short stoppage times for boarding/deboarding of passengers, limited capacity of trains, existence of transshipment stations combining different lines, high demand of service during rush hours, and tunnel travels difficulting wireless communications. These characteristics impose hard computational and communication requirements and require advanced online dispatch procedures due to the size and complexity of the underlying optimization problem and the short response time allowed to analyze and implement optimal solutions.

We describe the prototype system developed and tested live in Metro de Santiago. The main components of the systems are described: online data capture and communications, data analysis, online optimization, and traffic regulation interface.

The problem is approached as a mathematical programming mixed binary model in an online control context. The model is fed with online data captured from the current operation of the trains and wireless transferred to the main computers. The optimization model makes use of the discrete nature of predefined trip profiles allowed to travel from one station to the next. Standard optimization applications and proprietary metaheuristic procedures are used to periodically solve the mathematical model in a few seconds. Results from testing period are presented. The paper finally and presents proposals of future work.

Keywords: *TIC's for Systems Monitoring and Optimization; Subway System Operations Planning;*

1. Introducción

El desarrollo científico-tecnológico en las áreas de Tecnologías de Información (TICs) y Gestión Industrial posibilitan su utilización integrada en aplicaciones de alto impacto tanto para las empresas como las personas que usan los servicios asociados. Tal es el caso de los sistemas de transporte público, como los trenes urbanos o metros.

El ahorro de energía es un objetivo de gran relevancia en la operación de los sistemas productivos dado su impacto en los costos directos de operación, más en los momentos de actual coyuntura energética del país. En el caso del Metro de Santiago, el costo energético de tracción corresponde a cerca del 20% de los gastos totales de operación. Sin embargo, las exigencias de calidad de servicio aceptada por los clientes determina que la búsqueda de soluciones óptimas deba abordarse con estrategias y herramientas complejas de diferentes ámbitos científicos y tecnológicos como la ingeniería eléctrica, la informática y la optimización.

Si bien las disciplinas mencionadas han realizado desarrollos en forma independiente, con interesantes impactos en el desempeño de los sistemas, planteamos que la integración de estas técnicas y herramientas constituye un gran desafío tanto científico-tecnológico como de articulación y gestión de los participantes claves en la integración tecnológica y su uso apropiado como optimizador de la eficiencia global del sistema.

Este trabajo presenta un sistema en línea que apunta a buscar el mínimo consumo eléctrico requerido para tracción de trenes (Metros) satisfaciendo las condiciones de operación tanto en calidad de servicio como restricciones de seguridad.

El problema de control de tráfico puede representarse por un diagrama como el de la figura 1, donde las líneas horizontales representan estaciones (andenes), el eje X representa el tiempo y las diagonales corresponden a trenes desplazándose desde una estación a la siguiente en el recorrido. Al llegar a la

estación, el convoy hace una corta detención para dejar y tomar pasajeros.

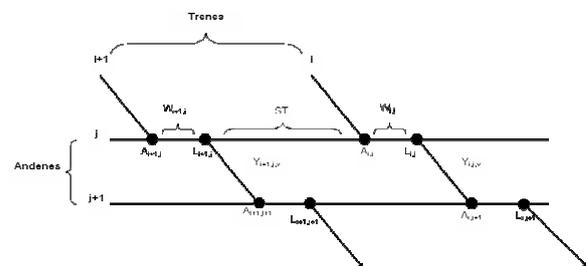


Figura 1. Diagrama de tráfico de trenes

Al término del recorrido por una vía de la línea, los trenes retornan por la vía opuesta de acuerdo al Programa General de Tráfico que fija los horarios de inicio de cada recorrido (entre otros variados parámetros de operación como tamaño de trenes, velocidades de operación, tiempos de detención, etc.).

Entre las particularidades del problema de operación óptima de una línea de metro encontramos aspectos claramente distinguibles como: alta frecuencia de viajes de corta duración, cortos tiempos de detención en estaciones para tomar/dejar pasajeros, capacidad limitada de los convoyes en términos de pasajeros transportados, existencia de estaciones de transbordo con combinación a diferentes líneas y alta demanda de servicio en periodos punta (varias veces superior a la demanda de periodos valle).

Esto impone fuertes requerimientos computacionales y la necesidad de procedimientos avanzados de despacho en línea debido al tamaño de los problemas de planificación, con un horizonte de tiempo "mediano", y los cortos tiempos permitidos para el análisis e implementación de soluciones.

El problema relacionado de programación de trenes interurbanos en general, tanto de pasajeros como de carga ha sido abordado por [1 a 32].

El problema de scheduling de trenes urbanos ha sido abordado en la literatura en trabajos como [33] [34] [35]. Por otro lado, la calidad de servicio en trenes de pasajeros (urbanos e interurbanos) ha sido abordada en [36 a 39].

En el caso de los sistemas de Metro, la calidad de servicio se mide multidimensionalmente, usando (ente otros) indicadores como:

- Apego a los horarios de circulación
- Apego a frecuencia programada de trenes (intervalo)
- Apego a velocidad de circulación promedio programada (velocidad comercial)
- Congestión de trenes (pasajeros/m²)
- Comodidad general del viaje

Estos indicadores son continuamente monitoreados para asegurar la operación según las expectativas de los usuarios y las definiciones estratégicas de la empresa.

Un aspecto particular en los sistemas de Metro con conducción automática (como en la mayoría de los sistemas actuales en el mundo) es que los viajes entre estaciones sucesivas se realizan de acuerdo a perfiles de velocidad bien específicos y predefinidos, existiendo un número limitado de estos perfiles para asegurar la factibilidad y calidad de cada viaje. En general la circulación de trenes se realiza de acuerdo a perfiles preseleccionados, ejecutados por el sistema de control automático de viajes. Como se verá más adelante, estos perfiles de velocidad presentan diferencias en sus resultados de operación, tanto en tiempo de viaje como consumo energético. En la eventualidad de ocurrencia de algún inconveniente durante la operación, un convoy puede ser accionado manualmente desde la cabina de conducción, no utilizando los perfiles predefinidos.

Sistemas de apoyo a la gestión de trenes urbanos de uso comercial se describen en [40] y [41].

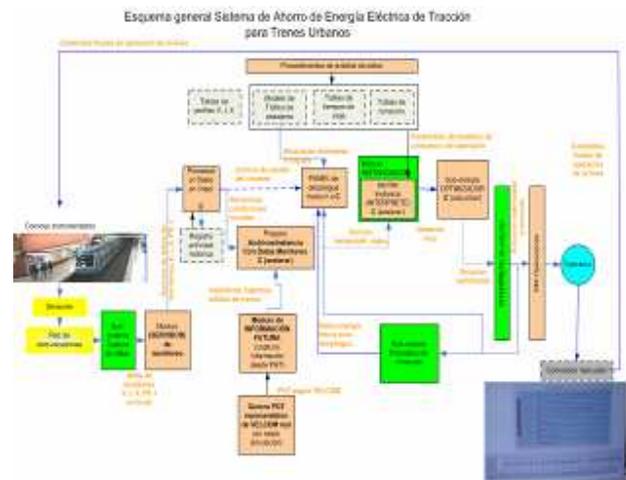
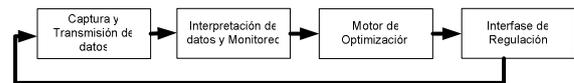
2. Descripción Del Sistema Propuesto

Se aborda el problema desde la perspectiva de un modelo de programación binaria mixta resuelto con alta frecuencia cuya función objetivo apunta a minimizar el consumo de energía eléctrica de tracción escogiendo diferentes velocidades de operación (alternativas discretas) y cuyas restricciones están definidas por la dinámica habitual de un sistema de metro (sucesión de viajes y detenciones, sin adelantamiento), las restricciones de seguridad y las expectativas de calidad de servicio. Para el poblamiento de la instancia de optimización definida por el problema de decisión en una ventana

móvil se utiliza información capturada en tiempo real desde los trenes en movimiento así como múltiples parámetros de configuración y operación calculados en la etapa de puesta en marcha del sistema.

La definición general del sistema se ilustra en el esquema de control de la Figura 2.

Figura 2. Esquema general del Sistema de Control



El sistema propuesto se compone de los siguientes elementos clave:

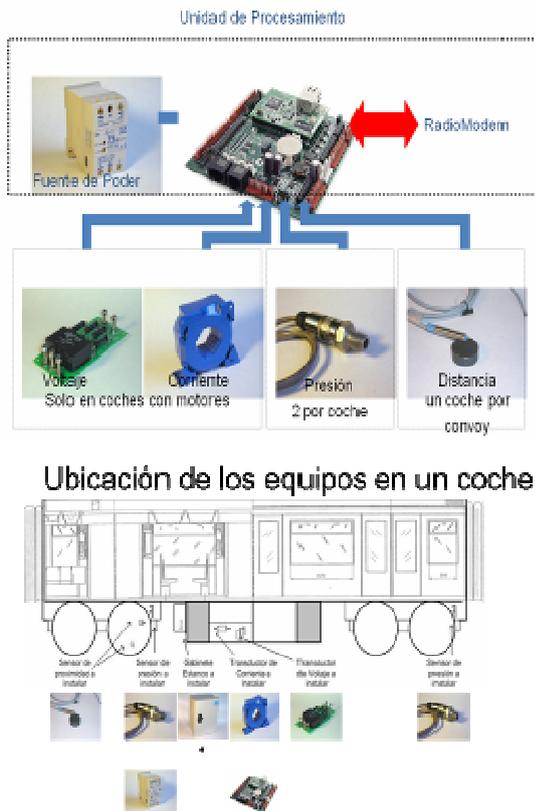
- Subsistema de captura de datos (en los trenes) y comunicaciones en línea

Incluye sensores instalados directamente en los convoyes para medir tanto aspectos de consumo eléctrico como variables dinámicas afectadas por la operación del sistema (voltaje, corriente, posición de trenes, pasajeros), como se ilustra en la figura 3. Además incluye las componentes requeridas para llevar las señales capturadas, desde los sensores hasta las instalaciones centrales de operación de la Línea a través tanto de sistemas de radio, red de datos física (cable) y red inalámbrica.

La frecuencia de transmisión de datos debe ser lo suficientemente alta para asegurar la operación confiable del sistema dadas las restricciones de captura y comunicaciones existentes. Este subsistema presenta un desafío de integración tecnológica de mediana complejidad por sus variadas componentes y estándares, además de la existencia de regulaciones

estrictas de no perturbación de otros sistemas de operación existentes en una línea de Metro.

Figura 3. Sensores instalados en convoyes

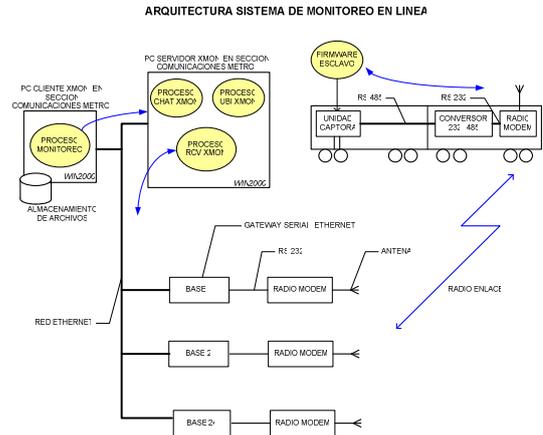


La figura 4 ilustra el esquema de comunicaciones móvil-tierra utilizado, con equipos de transmisión de señales de radio instalados en los convoyes y estaciones receptoras ubicadas en las estaciones de la línea.

b) Módulo de análisis e interpretación de datos

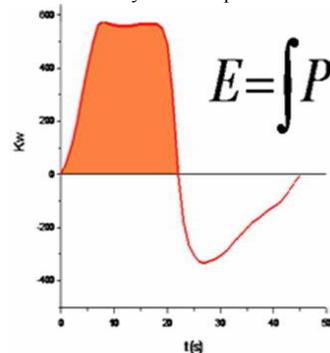
En este subsistema se procesa los datos provenientes del sistema de captura en línea y se interpretan para determinar el estado actual de la línea (posición de trenes, velocidades en uso, tiempos estimados de llegada a estaciones, pasajeros transportados, etc.). Se da cuenta aquí de las deficiencias de calidad de la información recibida, con rutinas de verificación de datos.

Figura 4. Esquema de comunicaciones



La información válida se suma a los parámetros de operación previamente calculados y almacenados en una base de datos para permitir la construcción de una instancia de optimización en el próximo módulo.

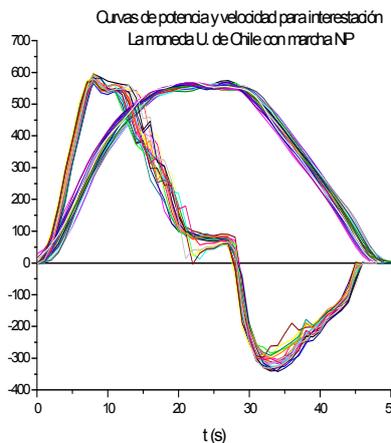
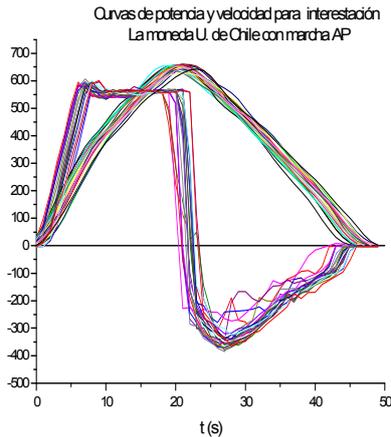
Figura 5. Consumo eléctrico y curva de potencia eléctrica



En la construcción de la base de datos de características de operación de diferentes tramos y trenes (tiempos de viaje, consumo energético, capacidad) se ha tomado en consideración la relación de consumo eléctrico para diferentes condiciones. Como lo ilustra la figura 5, el consumo eléctrico corresponde a la integral de la curva de potencia eléctrica, en la zona “positiva”. La zona “negativa” de la curva corresponde a regeneración de energía, que puede ser reutilizada en la red. Esta integral fue calculada para diferentes condiciones de operación (tramos de la línea, perfil de velocidad de viaje, cantidad de pasajeros transportados) sobre la base de los sensores instalados en los convoyes. La figura 6 permite visualizar las diferencias entre perfiles de

velocidad y potencia eléctrica para un mismo segmento de la línea, en viajes diferentes.

Figura 6. Curvas de perfil de viaje y potencia eléctrica para dos perfiles diferentes en una mismo segmento de viaje (túnel)



c) Módulo de optimización

El problema de selección de velocidades de circulación para los trenes operando en una ventana de decisión futura apuntando a minimizar el consumo eléctrico bajo restricciones de calidad de servicio es modelado como un problema binario mixto. Este modelo es una extensión de [35] considerando limitaciones de capacidad de los trenes y una diferente función objetivo. El detalle del modelo se analiza en la sección 3.

d) Módulo de interfaz con sistema de regulación de tráfico

Este subsistema permite interactuar con el regulador de tráfico tanto para mostrar el estado actual del sistema como para sugerir las políticas de operación casi-óptimas encontradas en el módulo de optimización. Debido a regulaciones de seguridad de operación, estas decisiones no han sido directamente implementadas en los sistemas de control de tráfico. Estas decisiones son entregadas en periodos de alta frecuencia (preestablecidos o a pedido) usando la interfaz de operaciones desarrollada y la estrategia de intercomunicación definida.

3. El modelo matemático propuesto

El objetivo de este modelo lineal entero mixto es minimizar el consumo de energía eléctrica de los trenes en cierto periodo de tiempo $\Delta t = (t_1, t_2)$ satisfaciendo los requerimientos propios del funcionamiento habitual de un sistema de transporte tipo Metro. Este modelo se separa en dos grandes componentes:

- Dinámica de pasajeros.
- Dinámica de trenes.

Cada una de éstas tiene incorporada la consideración de satisfacer la calidad de servicio que la empresa quiere otorgar a sus clientes

Nomenclatura:

- i : conjunto de trenes activos por cada estación durante el periodo $\Delta t = (t_1, t_2)$, este conjunto depende de cada estación ya que para dos estaciones el conjunto de trenes es distinto según la inyección o salida de trenes producto de la programación diaria. $i = t_1, \dots, T$
- $x(i)$: estación en la que comienza su recorrido el tren i .
- $J(i)$: última estación que recorre el tren i
- j : estaciones que recorre un tren i recorre en la ventana de tiempo, desde $x(i)$ hasta $J(i)$.
- $L(i)$: histórico de los trenes, muestra los valores de tiempo en que el tren i abandonó las estaciones anteriores a la ventana de tiempo a optimizar, desde el inicio del recorrido del tren i hasta la estación $x(i-1)$.
- $R(i)$: remanente de personas que están esperando en un andén en el momento antes de la ventana de tiempo.

E(i): espacio disponible en el tren al comienzo de la ventana de tiempo.

v : Representa el tipo de marcha, se consideran cinco tipos (1:AP, 2:EPNV, 3:NPAV, 4:EV y 5:S)

3.1 Dinámica de trenes

Las respectivas variables y parámetros relevantes del modelo de dinámica de trenes son:

Variable	Descripción	Unidad
$A_{i,j}$	Tiempo en que el tren i llega al andén j .	s
$L_{i,j}$	Tiempo en que el tren i deja el andén j .	s
$W_{i,j}$	Tiempo de estadía del tren i en andén j .	s
$Y_{i,j,v}$	1 = Si tren i deja andén j con marcha v y con nivel p de pasajeros. 0 = Otro caso.	

Parámetro	Descripción	Unidad
ST	Tiempo de seguridad.	s
$TWMax_j$	Tiempo de espera máximo permitido en andén	s
$TWMin_j$	T. espera mínimo permitido en andén j	s
$TT_{j,v}$	Tiempo de viaje entre el andén j y el próximo ($j+1$), asociado a la marcha v	s
$TTMax_{j,k}$	Tiempo de viaje máx. permitido para tren i , del andén j al andén k ($k>j$).	s
$C_{i,j,v,p}$	Costo asociado a tren i , túnel j , marcha v y con un nivel p de pasajeros.	unidad moneta ria

La dinámica de trenes en los andenes, se define por el siguiente conjunto de relaciones:

Balance de tiempos: considera el tiempo en que llega el tren i a la estación j y su tiempo de detención antes de continuar su viaje

$$A_{i,j} = L_{i,j-1} + \sum_{v=1}^V (TT_{j-1,v} \times Y_{i,j-1,v})$$

$$W_{i,j} = L_{i,j} - A_{i,j}$$

Brecha de Seguridad: compara a dos trenes que pasen sucesivamente por la estación j (conocidos de antemano)

$$A_{i,j} - L_{i+1,j} \geq ST$$

Tiempo de espera Mínima y Máxima: El tiempo de detención permitido está acotado por valores mínimo y máximo preestablecidos para una operación factible y segura

$$W_{i,j} \geq TWMin_j$$

$$W_{i,j} \leq TWMax_j$$

Tiempo de viaje en subzonas (entre pares de estaciones): El tiempo máximo permitido de viaje entre subzonas (TTMax) es un parámetro que asegura la calidad de servicio por el tiempo de viaje entre las estaciones s y j .

$$(A_{i,s} - A_{i,j}) < TTMax_{s,j}$$

En particular puede establecerse tiempos de viaje desde/hacia estaciones terminales hacia/desde una estación cualesquiera dentro de la línea. El parámetro $TTMax_{s,j}$ debe calcularse para cada par (s,j) de acuerdo a la velocidad comercial establecida por la empresa.

Capacidad máxima: la cantidad máxima de pasajeros transportada no puede exceder la capacidad del tren i

$$PT_{i,j} \leq QPMax_i$$

3.2 Dinámica de pasajeros

Por su parte, la dinámica de pasajeros en un andén utiliza las siguientes variables y parámetros:

Variable	Descripción
$PB_{i,j}$	Personas que suben al tren i en el andén j .
$PU_{i,j}$	Personas que bajan del tren i en el andén j .
$PT_{i,j}$	Personas que viajan en el tren i desde el andén j hacia el próximo andén ($j+1$).
$espacio_{i,j}$	Espacio disponible que tiene el tren i en la estación j .
$Pr m_{i,j}$	Pasajeros que dejó el tren i en la estación j , dado que la cantidad de personas que

	estaban esperando sobrepasaban la capacidad disponible del tren.
$e_{i,j}$	1 si el tren i tiene espacio disponible en la estación j , y 0 si no tiene espacio.
$r_{i,j}$	1 si el tren i deja pasajeros en la estación j , y 0 si no deja.

Parámetro	Descripción	Unidad
QPM_{ax_i}	Capacidad del tren i .	personas/tren
FPM_{ax_i}	Flujo máximo de subida y bajada de personas en tren i	personas/s
M_j	Espacio que dispone la estación	personas
μ_j	Tasa de afluencias para tren i en estación j	personas/s

Balance de pasajeros: el número de pasajeros en tren i que sale de una estación j es igual al número de personas que venían desde la estación anterior, menos los pasajeros que bajan en dicha estación más aquellos que suben

$$PT_{i,j} = PT_{i,j-1} - PU_{i,j} + PB_{i,j}$$

Pasajeros que abordan el tren: Cuando se habla del número de pasajeros que suben al tren es necesario el considerar que esta relación depende de la capacidad actual del tren a llevar pasajeros, es decir, el espacio es representado por la capacidad del tren menos el número de pasajeros que vienen desde la estación anterior más los pasajeros que bajan menos los que suben

$$espacio_{i,j} = QPM_{ax_i} - PT_{i,j-1} + PU_{i,j} - PB_{i,j}$$

Por esto la cantidad de pasajeros que suben a un tren i depende del espacio disponible y la demanda de personas en esta estación la cual queda representada por el número de personas que llegan a la estación j más los pasajeros que no pudo transportar el tren anterior ($i-1$) llamados remanente tren anterior menos el número de personas que puede llevar el tren i por su capacidad actual

$$PB_{i,j} = PLL_{i,j} + Prm_{i-1,j} - Prm_{i,j}$$

Capacidad de espacio disponible del tren: hay espacio en el tren mientras $e=1$.

$$\frac{espacio_{i,j}}{QPM_{ax_i}} \leq e,$$

Capacidad de la estación: Si $r=1$ significa que el tren i dejó personas en la estación j para el siguiente tren, por lo cual M es un parámetro que indica la capacidad de personas para un andén

$$Prm_{i,j} \leq M \times r$$

Pasajeros que bajan: la cantidad de pasajeros que bajan en una estación está asociada a la probabilidad de bajada Rat_j y a la cantidad de pasajeros transportada al ingreso del tren al andén j :

$$PU_{i,j} = Rat_j * PT_{i,j}$$

Pasajeros que llegan a una estación:

$$PLL_{i,j} = \mu_j \times (L_{i,j} - L_{i-1,j} - FS)$$

Flujo máximo de pasajeros: el flujo de pasajeros que suben/bajan en una tren-estación particular no debe exceder el máximo flujo posible para un tren tipo ξ , como:

$$\frac{PB_{i,j} + PU_{i,j}}{W_{i,j}} \leq FPM_{ax_\xi}$$

Condición de unicidad para pasajeros: Esta ecuación permite condicionar que suban pasajeros a un tren sólo si hay espacio ($e=1, r=0$)

$$e + r \leq 1$$

Modelo generalizado para ventanas de tiempo: la función objetivo generalizada, expresada como el consumo de energía eléctrica de tracción, con una componente “fija” dependiente del tren-anden-marcha respectivo ($C_{i,j,v} Y_{i,j,v}$) y otra componente variable proporcional a la cantidad de pasajeros transportados ($P_{i,j} \times PT_{i,j}$) es:

Minimizar

$$Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=x(i)}^{J(i)} \sum_{v=1}^V C_{i,j,v} \times Y_{i,j,v} + \sum_i \sum_j P_{i,j} \times PT_{i,j}$$

Para efectos prácticos, a través del monitoreo prolongado de la operación de trenes en diferentes condiciones de carga se ha llegado a confirmar la dependencia lineal (segunda componente de la

función objetivo), sin embargo, para efectos de optimización también se ha verificado una relación perfectamente transitiva en los consumos promedios de perfiles de velocidad diferentes, por cuanto es posible (por simplificación) emplear un modelo que sólo considere la componente “fija” de la función objetivo (asociada a las variables $Y_{i,j,v}$).

4. Resolución con herramientas de optimización

Este modelo, considerando sólo la primera componente de la función objetivo y algunas de sus variaciones, ha sido implementado y resuelto exitosamente usando tanto la plataforma de optimización open source LPSolve como heurísticas evolutivas implementadas para tal propósito por los autores, pudiéndose comparar el desempeño de ambos enfoques.

Considerando horizontes de planeación de 15 minutos y condiciones de operación específicas para la línea 1 del Metro de Santiago se ha generado instancias de modelos enteros mixtos con alrededor de 2000 variables y 1500 restricciones.

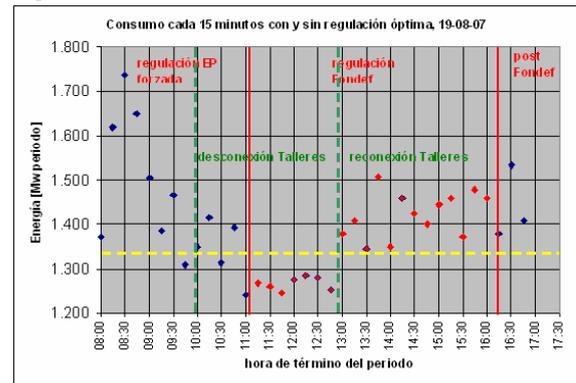
La resolución de cada instancia con ambas plataformas permitió generar propuestas de esquemas de operación aplicables y óptimas (o casi-óptimas), lográndose soluciones en tiempos de minutos (o segundos). Para efectos de pruebas en terreno, se utilizó la heurística evolutiva desarrollada debido a su buen desempeño en calidad de soluciones y su corto tiempo de ejecución (uno a tres segundos) en un PC Core Duo 1.6 GHz.

5. Resultados Obtenidos

El sistema de monitoreo y optimización desarrollado ha sido implementado en la Línea 1 del Metro de Santiago, permitiendo establecer (en línea) acciones de regulación del tráfico de trenes balanceando el uso de energía con la calidad de servicio requerida para la línea. El sistema fue desplegado en terreno y sometido a pruebas de validación en condiciones comparables de operación en ambiente real de operación. La figura 7 muestra los consumos eléctricos medidos por la empresa en intervalos de 15 minutos, antes, durante (11 a 13 hrs) y después de las pruebas de regulación con el sistema propuesto. Para ello se tuvo especial cuidado en mantener la misma flota de trenes y sólo modificar las políticas de operación. Claramente se aprecia una reducción (de aproximadamente un 6%) en el consumo promedio durante la operación según las recomendaciones del

sistema de optimización. Los ahorros obtenidos varían según el escenario de regulación, lográndose valores considerables teniendo en cuenta la significancia de los consumos presentados en sistemas de metro como el considerado.

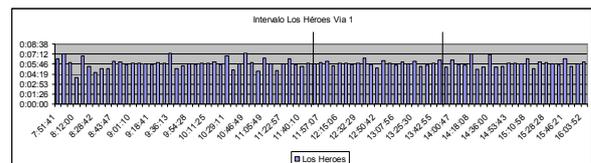
Figura 6. Comparación de consumos antes-durante y después de las pruebas de validación



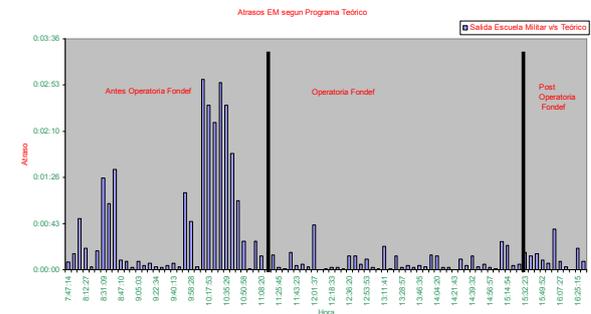
Por otro lado, el monitoreo de variables relevantes para la calidad de operación no muestran alteraciones significativas, como se ve en la figura 7.

Figura 7. Comparación de algunos parámetros de calidad de servicio antes-durante y después de las pruebas de validación

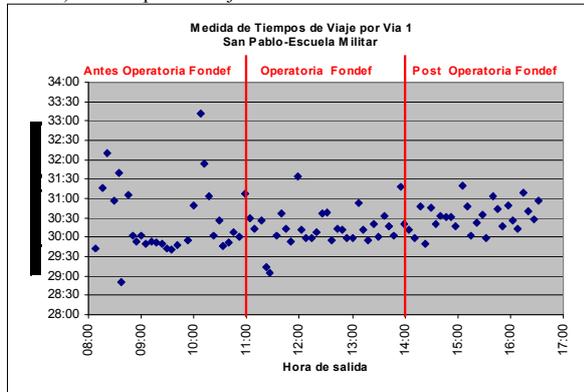
a) Intervalos entre trenes



b) Retrasos de salida respecto del itinerario



c) Tiempos de viaje en la línea



6. Conclusiones

Se ha presentado un caso de ejemplo que ilustra la integración científico-tecnológica de TICs y Gestión en el ámbito de la optimización en línea del tráfico de trenes en la línea 1 del Metro de Santiago orientado al ahorro de energía eléctrica de tracción bajo restricciones de calidad de servicio.

Se han descrito los principales componentes del sistema: captura y transmisión de datos desde trenes hacia central de operaciones, análisis de datos e instanciación, optimización en línea y finalmente interfase de comunicación con el regulador de tráfico. Se han presentado a nivel general los diferentes componentes del sistema analizándose sus principales características de operación y desempeño en terreno. Los resultados de pruebas en terreno permiten verificar que el prototipo permite alcanzar ahorros de energía de tracción (3-6% en periodos probados) sin afectar negativamente indicadores de calidad de servicio medidos.

Por otro lado, se verifica la necesidad de mejorar el sistema de comunicaciones utilizado para asegurar una operación continua.

Se concluye que aunque el desarrollo de este tipo de integraciones presenta un gran impacto potencial en el desempeño de los sistemas en los que son aplicados, su ejecución representa un desafío de articulación y gestión de los participantes claves en la integración tecnológica y su uso apropiado como optimizador de la eficiencia global de un sistema complejo.

Como posibles extensiones de este trabajo se consideran la configuración variable de convoyes que permita cambios de cantidad y tipo de carros durante la operación, la integración multi-líneas considerando

redes de tráfico complejas, la coordinación “eficiente” del frenado regenerativo y un análisis más profundo del modelo de optimización que permita explotar la estructura intrínseca del problema subyacente.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado con financiamiento del Proyecto FONDEF D03i1122 realizado con la contribución de Fondef de Conicyt, La Universidad de La Frontera, Metro de Santiago y la empresa CONECTA S.A. los autores agradecen la colaboración de todos quienes contribuyeron a su realización.

REFERENCIAS

- [1] Arisawa, M., “How Should Universities and Railways Cooperate in a New Era?”. Japan Railway & Transport Review, March 1996, pp. 2-5.
- [2] Sussman, J., “Industry/Academia Cooperation in Transportation: The Partnership of JR East and MIT. Japan Railway & Transport Review, March 1996, pp. 26-33.
- [3] Guihaire, V., J. Hao, 2008. “Transit network design and scheduling: A global review”, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 42, Issue 10, Dec 2008, Pages 1251-1273.
- [4] Chang, S., Y. Chung, “From timetabling to train regulation—a new train operation model”, Information and Software Technology, Volume 47, Issue 9, 15 June 2005, Pages 575-585
- [5] Li, F, G. Ziyou, K. Li, L. Yang “Efficient scheduling of railway traffic based on global information of train”, Transportation Research Part B: Methodological, Volume 42, Issue 10, December 2008, Pages 1008-1030
- [6] Carey, M., I. Crawford “Scheduling trains on a network of busy complex stations” Transportation Research Part B: Methodological, Volume 41, Issue 2, February 2007, Pages 159-17
- [7] Carey, M., S. Carville, “Scheduling and platforming trains at busy complex stations”, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 37, Issue 3, March 2003, Pages 195-224
- [8] Liu, S., E. Kozan, “Scheduling trains as a blocking parallel-machine job shop scheduling problem”, Computers & Operations Research, Volume 36, Issue 10, October 2009, Pages 2840-2852

- [9] D'Ariano, A., D. Pacciarelli, M. Pranzo, "A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network", *European Journal of Operational Research*, Volume 183, Issue 2, 1 December 2007, Pages 643-657
- [10] Zhou, X., M. Zhong, "Bicriteria train scheduling for high-speed passenger railroad planning applications", *European Journal of Operational Research*, Volume 167, Issue 3, 16 December 2005, Pages 752-771
- [11] Adenso-Díaz, B., M. Oliva González, P. González-Torre, "On-line timetable re-scheduling in regional train services", *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 33, Issue 6, August 1999, Pages 387-398
- [12] Lawley, M., V. Parmeshwaran, J. Richard, A. Turkcan, M. Dalal, D. Ramcharan, "A time-space scheduling model for optimizing recurring bulk railcar deliveries", *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 42, Issue 5, June 2008, Pages 438-454
- [13] Törnquist, J., J. A. Persson, "N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances", *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 41, Issue 3, March 2007, Pages 342-362
- [14] Burdett, R.L., E. Kozan, "A disjunctive graph model and framework for constructing new train schedules", *European Journal of Operational Research*, Volume 200, Issue 1, 1 January 2010, Pages 85-98
- [15] Lee, Y., C. Chen, "A heuristic for the train pathing and timetabling problem", *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 43, Issues 8-9, September 2009, Pages 837-851
- [16] Burdett, R., E. Kozan, "Techniques for inserting additional trains into existing timetables", *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 43, Issues 8-9, September 2009, Pages 821-836
- [17] Burdett, R., E. Kozan, "Techniques for restricting multiple overtaking conflicts and performing compound moves when constructing new train schedules", *Mathematical and Computer Modelling*, Volume 50, Issues 1-2, July 2009, Pages 314-328
- [18] Gutiérrez, J., R. González, G. Gómez, "The European high-speed train network : Predicted effects on accessibility patterns", *Journal of Transport Geography*, Volume 4, Issue 4, December 1996, Pages 227-238
- [19] Mao, B., B. Wang, B. Xu, H. Liu, J. Chen, P. Du, "On Integrated Train Operational Scheme Drawing-up Platform of China", *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Volume 9, Issue 2, April 2009, Pages 27-37
- [20] Haghani, A., "Formulation and solution of a combined train routing and makeup, and empty car distribution model", *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 23, Issue 6, December 1989, Pages 433-452
- [21] Ferreira, L., "Planning Australian freight rail operations: An overview", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 31, Issue 4, July 1997, Pages 335-348
- [22] Ortuzar, J., A. Iacobelli, "Mixed modelling of interurban trips by coach and train", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 32, Issue 5, September 1998, Pages 345-357
- [23] Fiiole, P., L. Kroon, G. Maróti, A. Schrijver, "A rolling stock circulation model for combining and splitting of passenger trains", *European Journal of Operational Research*, Volume 174, Issue 2, 16 October 2006, Pages 1281-1297
- [24] Marin, A., J. Salmerón, "A simulated annealing approach to the railroad freight transportation design problem", *International Transactions in Operational Research*, Volume 3, Issue 2, April 1996, Pages 139-149
- [25] Kraay, D., P. T. Harker, "Real-time scheduling of freight railroads", *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 29, Issue 3, June 1995, Pages 213-229
- [26] Tapiador, J., K. Burckhart, J. Martí-Henneberg, "Characterizing European high speed train stations using intermodal time and entropy metrics", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 43, Issue 2, February 2009, Pages 197-208
- [27] Caprara, A., L. Kroon, M. Monaci, M. Peeters, P. Toth, "Chapter 3 Passenger Railway Optimization", *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Volume 14, 2007, Pages 129-187
- [28] Caprara, A., M. Monaci, P. Toth, P. Guida, "A Lagrangian heuristic algorithm for a real-world train timetabling problem", *Discrete Applied Mathematics*, Volume 154, Issue 5, 1 April 2006, Pages 738-753
- [29] Lee, Y., C. Chen, "A heuristic for the train pathing and timetabling problem", *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 43, Issues 8-9, September 2009, Pages 837-851

- [30] Cheng, Y., “Optimal train traffic rescheduling simulation by a knowledge-based system combined with critical path method”, *Simulation Practice and Theory*, Volume 4, Issue 6, 15 November 1996, Pages 399-413
- [31] Chakroborty, P., D. Vikram, “Optimum assignment of trains to platforms under partial schedule compliance”, *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 42, Issue 2, February 2008, Pages 169-184
- [32] Li, F., Z. Gao, K. Li, L. Yang, “Efficient scheduling of railway traffic based on global information of train”, *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 42, Issue 10, December 2008, Pages 1008-1030
- [33] Flamini, M., D. Pacciarelli, “Real time management of a metro rail terminus”, *European Journal of Operational Research*, Volume 189, Issue 3, 16 September 2008, Pages 746-761
- [34] “Chapter XXXIII Railroad, Subway, and Car Traffic Problems”, *Mathematics in Science and Engineering*, Volume 27, Part 2, 1966, Pages 213-229
- [35] Assis, W. and B. Milani. “Generation of optimal schedules for metro lines using model predictive control”, *Automatica* 40(2004), 1397-1404.
- [36] Olsson, N., H. Haugland, “Influencing factors on train punctuality—results from some Norwegian studies”, *Transport Policy*, Volume 11, Issue 4, October 2004, Pages 387-397
- [37] Wardman, M., J. Shires, W. Lythgoe, J. Tyler, “Consumer benefits and demand impacts of regular train timetables”, *International Journal of Transport Management*, Volume 2, Issue 1, 2004, Pages 39-49
- [38] Vansteenwegen, P., D. Van Oudheusden, “Decreasing the passenger waiting time for an intercity rail network”, *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 41, Issue 4, May 2007, Pages 478-492
- [39] Vansteenwegen, P., D. Van Oudheusden, “Developing railway timetables which guarantee a better service”, *European Journal of Operational Research*, Volume 173, Issue 1, 16 August 2006, Pages 337-350
- [40] Sistema METROMISER, Siemens: <http://www.siemens.es>
- [41] “Ampliación del Metro de Madrid 1999 – 2002. Sistemas de Regulación SIRAT”. <http://www.madrid.org/metrosur/sirat.htm>