

GESTION OPERACIONAL DE UN SISTEMA CICLICO CON DEMANDA VARIABLE

Rodrigo S. Parra Granifo

ICR Consultores Ltda.

Casilla 210, Providencia, Santiago, Chile

fax: (56-2)2359758, e-mail: icr-rpg@netline.cl

RESUMEN

Se describen los principales aspectos teóricos y algoritmos de solución involucrados en el desarrollo de un sistema computacional generador de programas de circulación de trenes. Los algoritmos permiten considerar adecuadamente la demanda por el servicio y generar programas de circulación que optimizan el consumo de recursos satisfaciendo la demanda.

El generador de programas funciona en una amplia gama de situaciones permitiendo la sensibilización de diversas variables de política determinantes de la oferta.

El sistema desarrollado estructura los horarios de salida y llegada de los trenes a los terminales, teniendo debidamente las restricciones y características particulares de operación. De esta manera, posibilita la experimentación de distintas configuraciones de intervalos y operaciones realizadas por los trenes, siendo útil en la aceptación ó rechazo de alternativas de gestión tendientes a una mejor satisfacción de la demanda.

El desarrollo del generador de programas de circulación requirió modelar las componentes relevantes del sistema: demanda de pasajeros, capacidad de los trenes, dotación, intervalos, marchas tipo, maniobras efectuadas por los trenes, operaciones especiales (inyección y eyección de trenes), tiempos auxiliares y salidas de cocheras.

La solución algorítmica encontrada depende fuertemente de ciertas políticas de prioridad descritas, las que son experimentalmente comparadas en diversas situaciones.

1. INTRODUCCION

El objetivo del presente artículo es describir los principales aspectos teóricos y algoritmos de solución involucrados en el desarrollo de un sistema computacional generador de programas de circulación de trenes (GPC). Aunque los algoritmos de solución se encuentran orientados al problema de transportar pasajeros mediante trenes, lo mismo debieran ser aplicables al caso de otros sistemas cíclicos con demandas variables.

En Diciembre de 1994, el desarrollo del sistema GPC fué encargado por la Empresa de Transporte de Pasajeros Metro S.A. a ICR Consultores (ICR, 1997). Concluyendo las fases de modelamiento conceptual y de simulación computacional en Julio 1996 y Abril 1997, respectivamente. El autor del artículo participó en el diseño conceptual y en la escritura del código fuente del sistema.

GPC es un sistema computacional optimizador de recursos que dimensiona adecuadamente la oferta de trenes frente a una determinada demanda. El sistema GPC es capaz de operar sobre cualquier línea de Metro admitiendo variaciones en la demanda cada cuarto de hora. No es tarea de GPC efectuar evaluaciones económicas en términos de ingresos y costos sobre las soluciones obtenidas, ni tampoco realizar simulaciones en tiempo real de la operación del Metro, siendo ésta efectuada por otro sistema computacional (Cannobbio, et. al, 1994), que actúa sobre el programa diario de explotación generado por GPC.

GPC es una herramienta que permite programar adecuadamente las operaciones diarias efectuadas por los trenes de manera de satisfacer adecuadamente la demanda utilizando un mínimo de recursos. El sistema tuvo su origen en la necesidad de formalizar y automatizar los procesos de circulación de trenes. Actualmente, el sistema GPC se encuentra en plena actividad en el departamento de operaciones de Metro S.A. siendo utilizado en la generación de diversos programas de circulación (línea1, línea2, línea5, días laborales, días sábados, días festivos, etc.).

Anteriormente, los programas de circulación de trenes eran generados en forma semi manual mediante hojas de cálculo ó utilizando métodos gráficos (diagramas de grilla), por ende, el proceso de generación de programas no se encontraba completamente formalizado, es decir, el proceso poseía un alto grado de subjetividad. Por otra parte, la generación de los programas de circulación era un proceso extremadamente lento y rígido, no siendo posible explorar adecuadamente los efectos de introducir cambios en la programación de los trenes (análisis de sensibilidad).

Metro S.A. ha sido una empresa de transporte de pasajeros interesada desde sus inicios en proveer un nivel de servicio adecuado a los usuarios. Debido a la siempre creciente afluencia de éstos (ARA, 1993), se requirió de un método que permitiera contrastar la oferta de trenes frente a la demanda y con ello distribuir los recursos en forma adecuada de acuerdo a los requerimientos. En términos generales, el problema resuelto por GPC puede plantearse:

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar} \quad & (\text{Oferta de transporte} - \text{Demanda de transporte}) \\
 \text{s.a.} \quad & (\text{Oferta de transporte} - \text{Demanda de transporte}) \geq 0 \\
 \text{s.a.} \quad & \text{Número de trenes circulando} \leq \text{Dotación de trenes para la línea}
 \end{aligned}$$

El sistema GPC, que ha sido desarrollado en lenguaje C++, se encuentra compuesto por una interfaz interactiva y una serie de módulos que interactúan entre sí con el fin de generar los programas de circulación diarios de una línea aislada de Metro. Posteriormente, los programas de circulación son ejecutados a través del Programador General de Tráfico (PGT).

GPC estructura los horarios de salida y llegada de los trenes desde y hacia los terminales, atendiendo debidamente a las restricciones y características particulares de operación, siendo capaz de operar sobre cualquier línea o sub-línea de Metro.

2. MODELACION DEL SISTEMA METRO

2.1. Vías y terminales

Previo a la definición de vías y terminales, es necesario considerar las operaciones de inserción y bloqueo de trenes. Inserción es el proceso de introducir trenes a la línea desde las cocheras y bloqueo es la operación inversa, es decir, se retiran trenes hacia las cocheras. Además, existen las operaciones especiales de inyección y eyección de trenes. Inyección es el proceso de insertar trenes vacíos a una hora específica en un punto intermedio de una determinada línea (por ejemplo, estación Los Héroes de la línea 1 en la hora punta de la mañana y en el sentido hacia el oriente), con la finalidad de solucionar situaciones críticas de demanda. Por su parte, eyección es el proceso de bloquear trenes artificialmente en una línea no prioritaria para posteriormente inyectarlos en la línea crítica (por ejemplo, en el terminal Calicanto de la línea 2).

Cada línea de Metro posee dos vías y dos terminales. Los terminales, ubicados al final de las vías, reciben las denominaciones de primario y secundario. El terminal primario es aquel donde es posible insertar y bloquear trenes desde (hacia) cocheras sin restricciones de cantidad ni de horario. En contraste, en el terminal secundario sólo es posible insertar un número predefinido de trenes en la mañana al inicio del servicio y bloquear un número predefinido de trenes en la noche al final del servicio (stack de trenes).

La vía primaria es la vía cuyo inicio coincide con el terminal primario. Análogamente, la vía secundaria es la vía cuyo inicio coincide con el terminal secundario. Los puntos A y B son los puntos inicial y final de la vía primaria, respectivamente. En la vía secundaria, estos puntos se denominan C y D. En la Tabla N°1 se muestran las vías y terminales de las líneas actuales y en la Figura N°1 aparece un esquema con las definiciones anteriores.

Tabla N°1
Vías y Terminales de las Líneas de Metro

Línea	Terminal Primario	Terminal Secundario	Vía Primaria	Vía Secundaria
1	San Pablo	Escuela Militar	SP-EM	EM-SP
2	Lo Ovalle	Calicanto	LO-CA	CA-LO
5	Baquedano	Baquedano	LF-BQ	BQ-LF

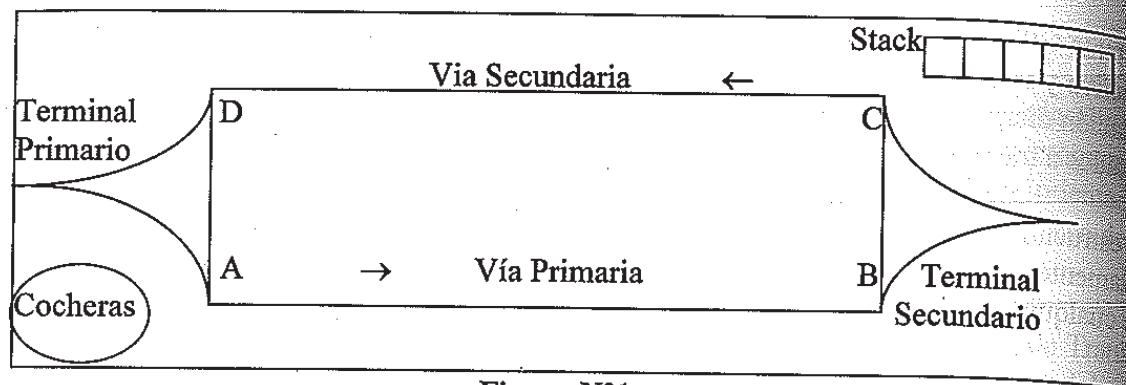


Figura N°1
Vías, Terminales y Puntos Singulares

En los terminales primario y secundario los trenes experimentan detenciones no ~~forzadas~~ denominadas tiempos auxiliares. Por tanto, los tiempos auxiliares son tiempos extras de detención entre los puntos B-C y D-A. El sistema, basado en algoritmos explicados posteriormente, decide el valor de los tiempos auxiliares. Sin embargo, existe la restricción de que el tiempo auxiliar no puede ser ni inferior al tiempo auxiliar mínimo ni superior al tiempo auxiliar máximo, estos tiempos límites se expresan como porcentajes del respectivo intervalo (separación temporal entre trenes consecutivos).

Al llegar a los terminales, los trenes efectúan maniobras, éstas pueden ser una de las 4 siguientes: tras estación normal (TRN), tras estación con refuerzo (TRF), ante estación normal (ANN) y ante estación con refuerzo (ANR). Las maniobras son tras estación, cuando los trenes efectúan el cambio de vía más allá de los puntos B y D. Por su parte, las maniobras son ante estación, cuando los cambios de vía son efectuados por los trenes antes de llegar a los puntos B y D. El término con refuerzo se refiere a la inclusión de un conductor extra que toma ubicación en la cabina posterior del tren (produciéndose un ahorro de tiempo al no ser necesario que el conductor que venía en el tren lo recorra caminando).

Valores típicos para los tiempos de maniobras (comunes a todas las líneas) son 125 segundos para la TRN, 100 segundos para la TRF, 90 segundos para la ANN y 75 segundos para la ANR. Un importante efecto de las maniobras ante estación, es el ahorro extra de tiempo verificado por los trenes al no ser necesario que éstos recorran la última interestación ni que se detengan en la última estación.

Las ecuaciones de continuidad para los terminales primario y secundario se presentan a continuación. La ecuación (1) corresponde al terminal secundario y la (2), al primario. Si la maniobra es ante estación, el último término en ambas ecuaciones es igual al recorrido de la última interestación más el tiempo de detención en la última estación. Si la maniobra es tras estación, estos términos son cero.

$$T_c = T_b + \text{taux}_{bc} + \text{tman}_{bc} - (\text{tvia}_n + \text{tdet}_n) \quad (1)$$

$$T_a = T_d + \text{taux}_{da} + \text{tman}_{da} - (\text{tvia}_n + \text{tdet}_n) \quad (2)$$

1.2. Tratamiento de la demanda

La demanda es de naturaleza exógena al sistema GPC, constituyéndose en un dato de entrada para la elaboración de un determinado programa de circulación. Esta se determina mediante encuestas origen/destino, matrices de tiempos de viajes, mediciones de cargas y factores de concentración. Luego de ser procesada esta información, se obtiene mediante algún sistema computacional el diagrama de carga por vía de una determinada línea. El sistema GPC, en lo relativo a demanda, utiliza exclusivamente el diagrama de carga.

El sistema computacional más utilizado para obtener diagramas de carga es SEM (CITRA, 1988), el que utilizando información sobre afluencia de pasajeros y una matriz de probabilidades de viajes entre los pares orígenes-destino obtenida para diferentes períodos en base a las encuestas de viajes en Metro, permite obtener los antecedentes de carga en cada tramo interestación, así como la información de subidas y bajadas de pasajeros por estación.

El siguiente paso es utilizar el Algoritmo de Selección de Cargas para transformar el diagrama de carga en una carga máxima por cuarto de hora. De esta forma, al final de la ejecución del Algoritmo de Selección de Cargas se dispondrá de una función $q(h)$ (cargas máximas por cuarto de hora). Finalmente, las cargas máximas por cuarto de hora son transformadas en un perfil diario de intervalos ($I(h)$), pudiendo, en un caso límite, existir un intervalo distinto para cada cuarto de hora.

Los intervalos obtenidos constituirán un reflejo de la demanda, siendo la relación carga máxima-intervalo inversa, debiendo los intervalos entre trenes reflejar las fluctuaciones de la demanda. En una etapa posterior, el Algoritmo de Captura de Itinerarios, considerando al perfil de intervalos y otros datos de entrada, determinará las operaciones diarias efectuadas por los trenes.

1.3. Variables de política

Las variables de política son aquellas cuya definición depende de la política operacional de la empresa y se especifican para cada cuarto de hora diario. Las principales son capacidad de los trenes, intervalos entre trenes, marchas tipo y disponibilidades de maniobras.

Capacidad: Según la expresión (3), la capacidad de los trenes (C) depende del número de carros por tren (n), de un indicador del nivel de servicio ofrecido al usuario (L) y de la capacidad física de los carros (F). Preferentemente, los trenes más largos son destinados a las horas punta.

$$C[\text{pax/tren}] = n[\text{carros/tren}] L[\text{pax/m}^2] F[\text{m}^2/\text{carro}] \quad (3)$$

Intervalo: El intervalo en un determinado punto de la línea es la separación temporal entre dos trenes consecutivos. Existe una restricción de intervalos por concepto de diseño debido a que el intervalo mínimo que permite la señalización es de 90 segundos. Mediante la expresión (4) (Cannobbio et. al, 1994), para cada cuarto de hora h , el perfil diario de intervalos, $I(h)$, es obtenido en función de la carga máxima por cuarto de hora, $q_{\max}(h)$, y la capacidad de los trenes, $C(h)$.

$$I(h)[\text{seg}] = 900[\text{seg/cuarto}] C(h)[\text{pax/tren}] / q_{\max}(h)[\text{pax/tren/cuarto}] \quad (4)$$

La elaboración de un programa de circulación requerirá, en general, suavizar el perfil de intervalos óptimo según demanda. Lo anterior se debe a que mientras la demanda es una variable aleatoria (presentando múltiples fluctuaciones), los intervalos no tienen por qué serlo, no siendo conveniente para efectos del programa de circulación, que presenten excesivas variaciones. En la Tabla N°2, muestran algunos ejemplos.

Tabla N°2
Perfiles Típicos de Intervalos (seg)

Línea 1-Día Laboral	Línea 2-Día Laboral	Línea 5-Día Laboral
06:15-07:00	195	06:15-07:15
07:00-07:30	125	07:15-08:45
07:30-08:45	105	08:45-09:45
08:45-09:15	120	09:45-10:15
09:15-13:00	180	10:15-11:15
13:00-14:15	150	11:15-13:00
14:15-16:45	180	13:00-14:15
16:45-17:30	150	14:15-15:45
17:30-18:15	120	15:45-17:15
18:15-19:00	110	17:15-18:00
19:00-19:30	150	18:00-18:45
19:30-23:00	195	18:45-19:45
		19:45-23:00
		360
Línea 1-Día Sábado	Línea 2-Día Sábado	Línea 1-Día Festivo
06:15-07:45	360	06:15-10:00
07:45-10:00	310	10:00-14:00
10:00-13:00	280	14:00-14:30
13:00-14:30	330	14:30-23:00
14:30-15:00	400	
15:00-23:00	500	

Marchas Tipo: El término marcha tipo involucra tanto al tiempo de recorrido interestación (tiempo de viaje) como al tiempo de detención en las estaciones (tiempo de detención). Marchas tipo típicas son la normal y la económica. La normal (más rápida) se usa principalmente en períodos punta de días laborales, mientras que la económica (más lenta), en períodos valle de días laborales, días sábados y festivos. Desde el punto de vista del GPC, una marcha tipo es un par de vectores tiempo de viaje y detención. Los tiempos de viaje y detención se asocian con estaciones y la convención empleada es definirlos como el tiempo en la interestación hacia "aguas abajo". Por lo tanto, es nulo el tiempo de viaje asociado a la última estación de cada vía.

Disponibilidades de Maniobras: Para cada cuarto de hora diario y para cada terminal existe un subconjunto de maniobras disponibles. El analista que esté generando un programa diario de circulación define cuáles maniobras se encuentran disponibles y el sistema decide, en tiempo de ejecución, cual de las maniobras disponibles efectúa cada tren.

GPC requiere que las maniobras disponibles sean consecutivas. Las disponibilidades se especifican como un rango entre paréntesis cuadrados. El límite inferior del rango es la primera maniobra disponible y el límite superior, la última maniobra disponible. La 1 es la maniobra más simple (la que necesita mayor tiempo) y la 4, la más compleja (la que requiere menor tiempo). Por ejemplo, [1,1] significa que sólo se encuentra disponible la maniobra 1 y [1,4] significa que se encuentran disponibles todas las maniobras.

3. ALGORITMOS DE SOLUCION

En lo posible, un determinado programa de circulación de trenes debería cumplir con las siguientes deseables características: reflejar adecuadamente la demanda, poseer intervalos regulares y emplear adecuadamente los recursos humanos y de material rodante disponibles. La utilización adecuada de recursos humanos guarda relación con la minimización de las operaciones de inserción y bloqueo de trenes. Por su parte, el no desperdiciar recursos de material rodante tiene que ver con la minimización de los tiempos auxiliares, la utilización de maniobras más complejas que la estación normal y la no aceptación de trenes blots. Los trenes blots son los que alcanzan a dar sólo una vuelta antes de ser bloqueados. En general, la existencia de estos trenes es indeseable, puesto que no se justifica incluir un tren para que sólo alcance a dar una vuelta.

Para conseguir los objetivos anteriores, el sistema GPC utiliza algoritmos que determinan donde y cuando se efectúan las operaciones de inserción y bloqueo de trenes, los valores de los tiempos auxiliares y las maniobras utilizadas por los trenes.

El diagrama del procedimiento general utilizado se muestra en la Figura N°2. Los elementos constituyentes del diagrama se describen a continuación.

- i) Utilizando SEM (u otro sistema computacional), se obtiene el diagrama de carga por cuarto de hora diario e interestación.
- ii) Mediante el Algoritmo de Selección de Cargas (ASC), explicado posteriormente, y utilizando el diagrama de carga, se obtiene la carga máxima para cada cuarto de hora.
- iii) A partir de las cargas máximas y capacidades de los trenes, mediante la expresión (4) se obtiene el perfil de intervalos.
- iv) Utilizando la expresión (5), se construyen los itinerarios óptimos. Estos se definen como las pasadas por el punto A generadas en base a la hora de inicio del servicio en el terminal primario y a los intervalos por cuarto de hora.
- v) Con las marchas tipo, disponibilidades de maniobras e itinerarios óptimos se aplica el Algoritmo de Captura de Itinerarios (ACI), explicado posteriormente, obteniéndose el régimen permanente.
- vi) El régimen permanente requerirá la circulación de una cierta cantidad de trenes en función del tiempo. La máxima cantidad de trenes circulando simultáneamente durante el día, se denomina

dotación resultante. La dotación resultante deberá ser menor o igual a la dotación introducida como dato. Si lo anterior no ocurre, GPC incrementa los intervalos en torno a la vecindad del cuarto de hora crítico (cuarto de hora con el máximo requerimiento de trenes), hasta que la dotación resultante iguale a la dotación introducida como dato. Si al concluir un predeterminedo número de iteraciones la convergencia no se alcanza, quiere decir que los datos introducidos son poco realistas y se debe proceder a incrementar la dotación y/o los intervalos. El sistema siempre tratará de respetar la dotación introducida como dato.

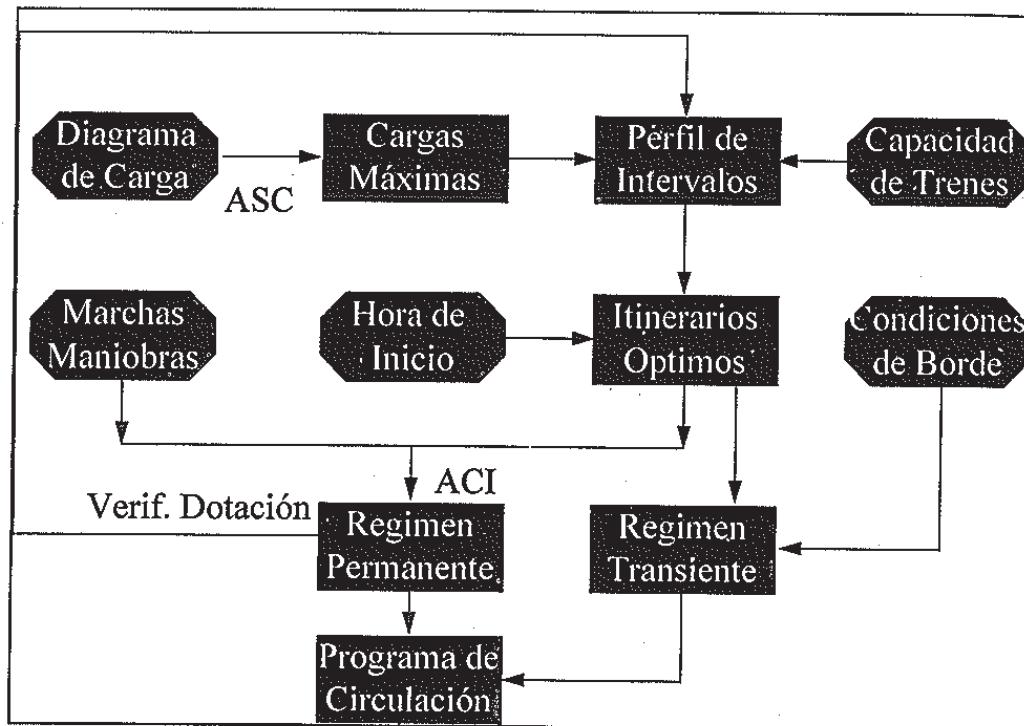


Figura N°2
Procedimiento General

vii) Con los itinerarios óptimos, dotación y condiciones de borde (número de trenes que inicialmente salen por ambos terminales, número de trenes que finalmente se guardan en ambos terminales y horas de inicio y cierre en ambos terminales), se generan los regímenes transientes inicial y final.

viii) Finalmente, se superpone el régimen permanente con los regímenes transientes inicial y final, determinándose un programa diario de circulación.

3.1. Algoritmo de selección de cargas

Si la demanda fuera constante, podrían utilizarse los algoritmos relativos a sistemas cílicos simples (ver por ejemplo, Gálvez, 1978). Debido a las fluctuaciones de la demanda, se hace necesario utilizar el siguiente algoritmo.

- i) Se hace partir desde el instante inicial del cuarto de hora un tren ficticio que recorre toda la línea desde el terminal primario. Al pasar por el terminal secundario, el tren utiliza la maniobra más rápida disponible y el tiempo auxiliar mínimo.
- ii) De acuerdo a su ubicación espacio-temporal, a medida que el tren va recorriendo la línea enfrenta distintas cargas. De todas las cargas percibidas en el recorrido del tren, se elige la mayor. Sea q_1 esta carga.
- iii) Se repite la operación i) con la diferencia que ahora el tren parte en el instante final del cuarto de hora y al pasar por el terminal secundario, utiliza la maniobra más lenta disponible y el tiempo auxiliar máximo.
- iv) De las cargas percibidas en el recorrido del tren, se elige la mayor. Sea q_2 esta carga.
- v) La carga máxima en el cuarto de hora será: $q_{\max} = \max\{q_1, q_2\}$.

La carga seleccionada, con el procedimiento anteriormente descrito, será representativa del cuarto de hora h debido a que es la máxima carga posible que enfrenta un tren a lo largo de la línea iniciando su recorrido al comienzo y al final del respectivo cuarto de hora. Si el tren ficticio inicia su recorrido al inicio del cuarto de hora y demora el mínimo tiempo posible en completar la vuelta completa, la carga máxima percibida por dicho tren será q_1 . Por su parte, si el tren ficticio inicia su recorrido al final del cuarto de hora y demora el máximo tiempo posible en completar la vuelta completa, la carga percibida por dicho tren será q_2 .

3.2. Determinación de itinerarios óptimos

Se construye una lista de itinerarios óptimos. El primer elemento de la lista (X_0) es igual a la hora de inicio del servicio en el terminal primario. Los restantes elementos de la lista se obtienen sumando el intervalo correspondiente al itinerario antecesor.

$$X_n = X_{n-1} + I(h(X_{n-1})) \quad n > 0 \quad (5)$$

En la expresión (5), la función $h(X)$ produce el cuarto de hora en que se ubica el itinerario X , y la función $I(h)$, el intervalo correspondiente al cuarto de hora h .

3.3. Algoritmo de captura de itinerarios

El Algoritmo de Captura de Itinerarios garantiza que en el terminal primario, en períodos de tiempo suficientemente alejados de los transientes inicial y final, y si la dotación lo permite, los intervalos resultantes coincidirán exactamente con el perfil de intervalos introducido como variable de política.

El algoritmo de Captura de Itinerarios consiste en asignar trenes a los itinerarios y consta de 7 pasos. Los pasos i), ii) y iii) constituyen la inicialización del algoritmo, el paso iv), la condición de término y los pasos v), vi) y vii) la fase repetitiva.

- i) Para cada elemento perteneciente a la lista de itinerarios óptimos (X_n), se determina su tiempo mínimo (T_{\min}) y su tiempo máximo (T_{\max}). Estos son los tiempos mínimo y máximo que le tomaría a un tren efectuar una vuelta completa partiendo en el itinerario X_n .
- ii) Se determinan los rangos $[A_n, B_n]$ con $A_n = X_n + T_{\min}$ y $B_n = X_n + T_{\max}$
- iii) Todos los itinerarios se inicializan a vacíos, es decir, sin trenes asignados.
- iv) Si no hay itinerarios vacíos, el algoritmo termina. Por el contrario, mientras hayan itinerarios vacíos ejecutar los pasos v) vi) y vii).
- v) Asignar un nuevo tren al primer itinerario vacío encontrado. Cada vez que se ejecuta este paso se inserta un nuevo tren. Sea t el nuevo tren insertado.
- vi) Recorrer la lista de itinerarios hasta hallar otro itinerario (no necesariamente vacío) que se ubique en el rango $[A_n, B_n]$, cuando se encuentra, se le asigna el tren t . Luego se lee el rango del nuevo itinerario encontrado.
- vii) Repetir el paso vi) hasta que no haya ningún itinerario en el rango actualizado $[A_n, B_n]$. Cuando esto ocurre, se retorna al paso iv) y el tren t es bloqueado. Por el contrario, cada vez que se encuentra un nuevo itinerario significa que el tren t debe recorrer una nueva vuelta.

Una vez concluida la ejecución del Algoritmo de Captura de Itinerarios, es necesario completar las medias vueltas determinando los tiempos auxiliares y las maniobras. Lo anterior siempre puede efectuarse debido a que por construcción cualquier itinerario perteneciente al rango $[A_n, B_n]$ es susceptible de ser alcanzado mediante ciertas combinaciones de maniobras y de tiempos auxiliares. En la práctica, se elige aquella combinación que produce un intervalo en el terminal secundario lo más parecido posible al del terminal primario.

3.4. Políticas de prioridad

Los programas de circulación generados con los procedimientos mostrados en la Figura N°2 dependerán de ciertas políticas de prioridad adoptadas. Durante el proceso de verificación de la dotación, la política de prioridad se refiere a la determinación del cuarto crítico (cuarto de hora con el máximo requerimiento de trenes). Por otra parte, cuando se ejecuta el Algoritmo de Selección de Itinerarios, la política de prioridad se refiere al criterio de selección del siguiente itinerario disponible.

a) Selección del cuarto crítico

Cuando el cuarto crítico es seleccionado, se incrementan los intervalos correspondientes a los cuartos de hora inmediatamente anteriores. Puede ocurrir que la dotación máxima se verifique para más de un cuarto de hora crítico. Por ejemplo, podría darse para los cuartos 08:30-08:45 y 19:00-19:15. Debido a que sería exagerado incrementar simultáneamente dos vecindades de intervalos, se hace necesario adoptar una política de decisión.

La política de decisión se denomina PCC (Primer Cuarto Crítico) cuando el cuarto crítico es seleccionado adoptando la primera ocurrencia diaria. Por el contrario, cuando se selecciona la última ocurrencia diaria, la política de decisión se denomina UCC (Ultimo Cuarto Crítico). Lo anterior equivale a afirmar que la política PCC verifica la ocurrencia del primer cuarto crítico desde el inicio del día y la política UCC verifica la ocurrencia del primer cuarto crítico desde el final del día.

Las políticas de prioridad PCC necesitarán menos iteraciones entre el perfil de intervalos y la dotación resultante, por ende, los intervalos obtenidos serán más próximos a los del perfil óptimo según demanda. La conveniencia de las políticas UCC radica en que posibilitan la existencia de intervalos finales más pequeños en la hora punta de la mañana.

b) Selección de itinerarios

En el Algoritmo de Captura de Itinerarios se eligen itinerarios según si su valor pertenece o no al rango $[A_n, B_n]$. Podría ocurrir que dos o más itinerarios consecutivos pertenezcan al mismo rango.

La política de decisión se denomina PIC (Primer Itinerario Capturado) si se adopta la primera ocurrencia de itinerarios verificada. Por el contrario, si la política de decisión es adoptar la última ocurrencia de itinerarios, se denomina UIC (Ultimo Itinerario Capturado). Una ventaja de las políticas PIC, es que los trenes capturan itinerarios cronológicamente anteriores a los que capturarían bajo políticas UIC, por ende, los trenes efectúan maniobras más rápidas y experimentan tiempos auxiliares inferiores. Sin embargo, las políticas UIC son interesantes, ya que minimizan la probabilidad de ocurrencia de trenes blots (trenes que recorren una sola vuelta).

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Con los perfiles de intervalos de la Tabla N°2 se generan programas de circulación cuyos principales resultados se muestran en la Tabla N°3.

En la primera columna de la Tabla N°3 aparece el número de la línea de Metro, el tipo de día, la dotación disponible y el número de trenes inyectados/eyectados (cuando es el caso).

En la segunda columna, se muestran las políticas de prioridad, marcándose con un asterisco la que produce los mejores resultados para la situación considerada. A veces, seleccionar una política de prioridad es difícil ya que involucra un compromiso entre intervalos, blots, iteraciones e inserciones.

Posteriormente, en la tercera columna se muestran los cuartos de hora críticos, como era de esperarse, las políticas UCC tienden a ubicar el cuarto de hora crítico final al comienzo del día al contrario de lo que ocurre con las políticas PCC.

El número de iteraciones se muestra en la cuarta columna. Claramente, las políticas PCC y PIC requieren de menos iteraciones para alcanzar la convergencia que las UCC y las UIC. Un número alto de iteraciones implica muchas amplificaciones del perfil de intervalos original (óptimo según demanda) para cumplir con la dotación disponible.

El número de trenes blots aparece en la quinta columna. La existencia de este tipo de trenes es relativamente poco común y se verificó siempre con políticas de prioridad PIC. La existencia de trenes blots produce el descarte inmediato de la respectiva política de prioridad.

Tabla N°3
Generación de Programas de Circulación para Distintas Situaciones

Programa de Circulación	Política de Prioridad	Cuarto Crítico	Número de Iteraciones	Trenes Blots	Intervalos min-max (s)	Trenes Insertados
Línea 1 Día Laboral Dotación 32 trenes 3 trenes inyectados	PIC-PCC	19:15-19:30	6	0	87-975	48
	PIC-UCC	08:30-08:45	8	1	79-807	50
	UIC-PCC	19:00-19:15	9	0	90-838	46
	UIC-UCC*	08:30-08:45	12	0	91-836	47
Línea 2 Día Laboral Dotación 17 trenes 3 trenes eyectados	PIC-PCC	08:45-09:00	3	2	81-720	25
	PIC-UCC	08:15-08:30	9	1	57-720	25
	UIC-PCC*	09:00-09:15	7	0	112-720	24
	UIC-UCC	08:30-08:45	14	0	36-720	24
Línea 5 Día Laboral Dotación 11 trenes	PIC-PCC*	19:15-19:30	4	0	138-767	14
	PIC-UCC	08:45-09:00	18	0	147-780	14
	UIC-PCC	19:15-19:30	5	0	141-776	14
	UIC-UCC	08:45-09:00	18	0	135-609	14
Línea 1 Día Sábado Dotación 13 trenes	PIC-PCC*	13:30-13:45	6	0	265-1000	14
	PIC-UCC	08:30-08:45	15	0	267-1000	15
	UIC-PCC	13:45-14:00	6	0	265-1000	13
	UIC-UCC	12:30-12:45	18	0	249-1000	15
Línea 2 Día Sábado Dotación 7 trenes	PIC-PCC*	14:30-14:45	3	0	306-1091	7
	PIC-UCC	06:45-07:00	15	0	296-1072	8
	UIC-PCC	14:30-14:45	5	0	275-1051	7
	UIC-UCC	06:45-07:00	15	0	296-1072	9
Línea 1 Día Festivo Dotación 9 trenes	PIC-PCC	22:45-23:00	12	0	362-884	11
	PIC-UCC	20:00-20:15	21	0	310-1065	12
	UIC-PCC*	22:30-22:45	14	0	402-884	10
	UIC-UCC	19:30-19:45	21	0	290-1105	12

Los intervalos mínimo y máximo se muestran en la sexta columna. Es deseable que el intervalo mínimo tenga el mayor valor posible y que el intervalo máximo tenga el menor valor posible.

Finalmente, en la última columna se visualiza al número de trenes insertados, es decir, el número de trenes que es necesario sacar de cocheras durante el día. Es deseable que este valor sea lo más reducido posible. Es interesante notar que, generalmente, la política de prioridad que logra los mejores resultados de intervalos es la que también produce menores inserciones de trenes.

5. CONCLUSIONES

El sistema desarrollado estructura los horarios de salida y llegada de los trenes a los terminales, atendiendo debidamente a las restricciones y características particulares de operación. Mediante la automatización de este proceso, se da satisfacción a los requerimientos, optimizando los costos de operación involucrados tales como material rodante, energía y personal.

El sistema desarrollado permite experimentar distintas configuraciones de intervalos siendo útil en la aceptación o rechazo de alternativas de gestión tendientes a una mejor satisfacción de la demanda. Además, permite cuantificar el deterioro producido en otros sectores de la red al utilizar operaciones de inyección y eyeción de trenes. Sin embargo, resulta difícil evaluar el beneficio producido al inyectar trenes, debido al desconocido impacto asociado a la introducción de trenes vacíos en intersecciones estratégicas.

Tras múltiples pruebas, es posible afirmar que para una gran variedad de situaciones, el tiempo auxiliar mínimo óptimo resulta ser siempre del orden de un 1% del intervalo y el tiempo auxiliar máximo, un 55% del intervalo. Además, la mejor vecindad para incrementar intervalos resultó de 8 cuartos de hora con un 2.5% de incremento por iteración.

Dado un perfil de intervalos óptimo (para una situación determinada), no es posible establecer a priori cual política de prioridad es la más adecuada, siendo necesario proceder experimentalmente. El sistema GPC prueba todas las políticas de prioridad y luego selecciona la mejor estableciendo un compromiso entre una serie de variables tales como trenes blots, número de trenes insertados e intervalos máximos y mínimos resultantes.

REFERENCIAS

ARA (1993) Estudio de Investigación de Alternativas para el Mejoramiento del Sector Los Heroes-Baquedano. Informe Final a la Empresa de Transporte de Pasajeros Metro S.A.

Cannobbio, J.E., J.Borzone y L.Rojo. (1994) Modelamiento y Simulación de una Línea de Metro de Santiago de Chile. Actas del VII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte. México, D.F.

CITRA (1988) Sistema SEM, Manual del Usuario. Versión final entregada al Departamento de Planificación de la Empresa de Transporte de Pasajeros Metro S.A.

Gálvez, T. (1978) Análisis de Operaciones en Sistemas de Transporte. Publicaciones de la Sección Ingeniería de Transporte de la Universidad de Chile. Santiago de Chile.

ICR (1997) Sistema GPC, Manual del Usuario. Versión final entregada al Departamento de Operaciones de la Empresa de Transporte de Pasajeros Metro S.A.