

## PLANIFICACIÓN DE OFERTA EN EL METRO DE SANTIAGO

Juan Fco. Flores Mardones, Erwin Constanzo Oñate  
Empresa de Transporte de Pasajeros Metro S.A.  
Alameda del Libertador Bernardo O'Higgins 1414, Santiago, Chile  
Fax 252 63 63, e-mail: jflores@metro-chile.cl

### RESUMEN

Actualmente la explotación de un sistema de Metro depende de una importante cantidad de variables que pueden llegar a ser muy complejas, básicamente están relacionadas con: las restricciones operacionales que debe enfrentar, el comportamiento de la demanda por viajes en el sistema y la infraestructura tecnológica empleada. Para franquear exitosamente estos obstáculos es preciso estar permanentemente realizando controles y ajustes en el servicio ofrecido.

En este artículo se presenta un modelo conceptual concebido como elemento de apoyo para las tareas de planificación de la Oferta de Transporte; surgió ante la necesidad de responder eficazmente a crecientes exigencias que debía enfrentar Metro S.A., debidas a un sostenido incremento de la Demanda de viajes y la incapacidad física para aumentar la oferta de transporte. Tiene sus orígenes en una época en que la Empresa no podía ampliar el parque de Material Rodante.

Nacen de esta forma, una serie de ideas innovadoras en el ámbito de la explotación del servicio, que a través del tiempo fueron aplicadas en forma sucesiva y complementaria; en conjunto ellas permitieron incrementar en alrededor de un 9% la oferta disponible en los tramos de mayor demanda, sin aumentar el parque de trenes. Una de estas nuevas formulas de explotación es conocida como "*operación en bucle*"; se destaca por su impacto directo en los sistemas de control de tráfico y en la forma tradicional de operar el sistema; ha sido utilizada exitosamente desde el año 1997.

A partir de la experiencia adquirida por Metro S.A, el presente artículo muestra las bases de una estructura metodológica, en la cual se describe la composición y relaciones de las diferentes variables que constituyen la plataforma para dimensionar la oferta de este servicio de transporte.

Para ello se ha considerado en primer lugar una descripción breve sobre los parámetros más importantes que intervienen en el sistema, seguido por la presentación de un modelo conceptual utilizado para la confección de los programas de circulación de trenes, enfocado también desde una perspectiva general.

## 1. INTRODUCCIÓN

La empresa Metro S.A ha dedicado importantes esfuerzos a mantener un mejoramiento continuo del servicio ofrecido a sus clientes; para lograr este propósito ha sido necesario revisar sus procedimientos, la forma de hacer las cosas y adecuarse a los nuevos requerimientos; llegando a poner en práctica innovadoras estrategias operacionales y obtener así la máxima utilización de los recursos disponibles.

De esta experiencia se desprende el presente artículo, el cual tiene como objetivo describir conceptualmente un proceso de planificación de la oferta de transporte de pasajeros en el sistema Metro, particularmente bajo condiciones de alta exigencia.

Las variables que intervienen en el proceso, sus inter relaciones, los algoritmos que describen sus comportamientos y la forma de componer el producto final son presentadas como un conjunto de etapas que deben ser combinadas adecuadamente para determinar el nivel de oferta esperado.

## 2. PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN LA OFERTA

Si bien las variables que intervienen en la oferta pueden ser calculadas en forma secuencial; no obstante, la aplicación práctica de sus resultados debe contemplar una fase de sensibilización, con una rutina de iteraciones que permita encontrar el valor más adecuado que responda a los requerimientos del servicio. A continuación se presentan los 5 parámetros más relevantes.

## 3. DEMANDA

El primer elemento que entra en acción al planificar la oferta de transporte en el servicio de Metro, es la cantidad de pasajeros o *Afluencia* que será movilizada a través de este sistema. Aún cuando existen instrumentos para contabilizar con certeza la afluencia que ingresa al sistema, tanto en el ámbito espacial (ingreso por estaciones) como en el ámbito temporal (períodos horarios); sin embargo, no siempre es posible conocer con la misma precisión la dirección del viaje.

Cabe destacar que esta última característica es muy importante para dimensionar finalmente los recursos involucrados en la oferta; entendida como plazas de transporte. Por lo tanto, no basta con conocer la cantidad de personas que acceden al sistema, es necesario además cuantificar el nivel de carga máxima que deberán enfrentar los trenes en algún punto de la línea.

A esta variable referida a la carga de los trenes se le ha denominado *Demanda Máxima*  $Q_p$ , y su unidad de medida es: *pasajeros por hora y sentido*; ella permite determinar la frecuencia y el intervalo de circulación de los trenes, de tal modo que la oferta responda a los niveles de Calidad de Servicio establecidos corporativamente. La *Demanda máxima*, por lo tanto, es la que indica el nivel de pasajeros que será transportado por un punto crítico de cada línea y en los diferentes períodos característicos de la explotación del sistema.

Al no contar con dispositivos físicos que permitan medir directamente  $Q_p$ , resulta necesario utilizar otro tipo de instrumentos que ayuden a obtener esta información. Para este propósito es posible usar una variada gama de fórmulas y métodos particulares, que abarcan desde el conteo directo de carga de pasajeros a bordo de los trenes en los puntos neurálgicos de cada línea, hasta complejos algoritmos que relacionan la subida y bajada de pasajeros en cada estación.

Una opción probada para estimar el nivel de *Demanda Máxima* consiste en realizar periódicamente encuestas de Origen y Destino de viajes que son aplicadas en forma directa a los usuarios del sistema de transporte. De estas encuestas es posible obtener matrices de probabilidad de viajes al interior de la red; a través de ellas se puede identificar patrones de dirección o sentido de los flujos de pasajeros.

Dichas matrices de probabilidad de viajes, obtenidas sobre muestras representativas de la población, pueden ser expandidas al universo de la afluencia medida en todos los períodos horarios de interés. Utilizando algoritmos implementados en programas de computación, estas matrices de *Probabilidad de viajes*  $[P]$  deben ser combinadas con matrices de *Afluencia*  $[A]$  y de *Tiempos de viaje*  $[T]$ , y así obtener perfiles de carga para cada inter-estación y vía de cada línea.

Finalmente de este perfil de carga se obtiene la Demanda Máxima de cada línea de la red, que para estos casos se define genéricamente como una función de dichas variables:

$$Q_p = f(P, A, T)$$

Los resultados de este tipo de encuestas aún cuando pueden mostrar un comportamiento relativamente estable respecto a los flujos de viajes, requiere sin embargo, de calibración periódica para corregir las variaciones temporales en cuanto a las magnitudes y distribución de viajes en la red.

#### 4. VARIABLES DE CALIDAD DE SERVICIO

Una vez conocido el requerimiento de *Demanda*  $Q_p$  (pasajeros/hora/sentido) en los diversos períodos característicos punta y fuera de punta de cada tipo de día (laboral, sábado y festivo); es preciso establecer las variables de calidad de servicio que serán aplicadas en cada uno de esos períodos, principalmente la *Densidad de pasajeros de pie*  $\delta_p$  (pasajeros/m<sup>2</sup>) al interior de los trenes y los *intervalos máximos y mínimos* que serán utilizados; de estos últimos se obtiene la estimación de los tiempos medios de espera de los usuarios para abordar los trenes.

#### 5. Marcha Tipo

Esta variable constituye la *Duración de la Vuelta* ( $D_v$ ) en cada línea, depende principalmente de las características del material rodante y en particular de los trenes de menor desempeño dispuestos para circular en dicha línea; también está condicionada a las limitaciones tecnológicas de los equipos de control de tráfico instalados en terreno.

Esta Marcha Tipo además está relacionada con aspectos que inciden directamente en el consumo de energía de tracción de los trenes; es posible disponer de una variada gama de posibilidades de marcha en función de un resultado económico.

En términos generales la marcha tipo se puede expresar de la siguiente forma:

$$D_v = T_r + T_d + T_m \quad (1)$$

Donde:

- $D_v$  = Duración de la vuelta completa (ciclo)  
 $Tr$  = Sumatoria de tiempos de recorrido entre estaciones  
 $Td$  = Sumatoria de tiempos de detención en estaciones  
 $Tm$  = Tiempos de maniobra para el retorno en estaciones terminales

## 6. INTERVALO DE OPERACIÓN

El intervalo de operación del sistema, entendido como la separación temporal entre trenes sucesivos, está en directa relación con la modalidad de explotación utilizada; la que a su vez puede contemplar varias posibilidades, tales como:

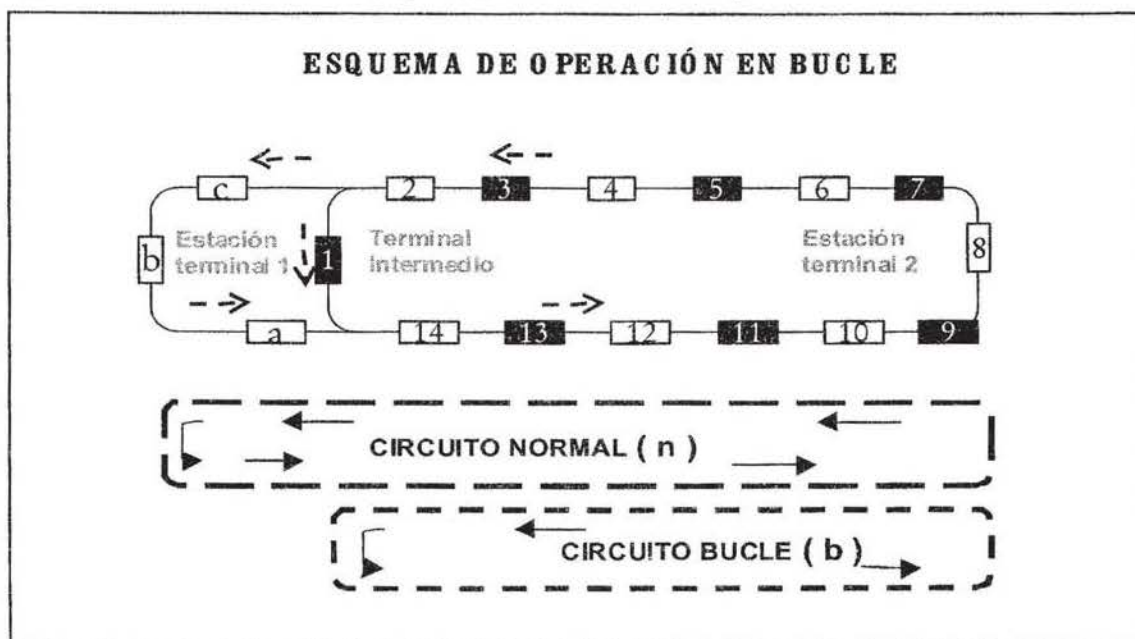
- Circulación de trenes en circuito normal entre estaciones terminales de la línea.
- Circuitos sincronizados en operación simultánea en una línea, conocido como operación en bucle.
- Incorporar durante la explotación trenes provenientes de otra línea (inyección de trenes).

Dependiendo de las condiciones de operación señaladas anteriormente, el cálculo del intervalo que será utilizado en cada período de explotación del servicio definirá la frecuencia y por ende la oferta final de una línea.

Para efectos de este artículo sólo se presentará una base de cálculo asociado a la operación en bucle (del tipo 1 por 1), en el período punta, que es donde se presenta la mayor exigencia operativa y se dispone para ello de la mayor dotación de material rodante.

La operación en bucle tiene como objetivo focalizar el recurso tren, para maximizar su uso en los tramos donde el perfil de demanda presente su mayor concentración, sin que por ello se desconozca los requerimientos de transporte que se generan en las áreas de baja demanda.

**Figura N° 1 Concepto bucle (1 por 1), con dos circuitos operando sincronizadamente.**



Condición base:  $I_n = I_b$  (2)

Donde:

$$I_n = \text{Intervalo del circuito normal}$$

$$I_b = \text{Intervalo del circuito en bucle}$$

Deben cumplirse también las siguientes condiciones:

$$NT = NT_n + NT_b \quad (3)$$

$$Dv_n / NT_n = Dv_b / NT_b \quad (4)$$

Donde:

$NT$  = Número de trenes que circularán en la línea.

$NT_n$  = Número de trenes en circuito normal.

$NT_b$  = Número de trenes en bucle.

$Dv_n$  = Duración de la vuelta en ciclo normal.

$Dv_b$  = Duración de la vuelta en bucle.

De estas expresiones se obtiene una constante de bucle  $Kb$  definida como:

$$Kb = Dv_b / Dv_n \quad (5)$$

Con lo anterior se puede determinar la combinación adecuada de trenes que circularán simultáneamente en el circuito normal y el circuito bucle, por lo tanto:

El número de trenes requeridos en el circuito bucle será igual a:

$$NT_b = Kb * NT / (1 + Kb) \quad (6)$$

Y el número de trenes requeridos en el circuito normal será:

$$NT_n = NT - NT_b \quad (7)$$

Por otra parte, con estos parámetros obtenemos el intervalo de servicio  $I_s$ , que será aplicado en el tramo de mayor demanda; éste se define a partir de la superposición de los dos circuitos como:

$$I_s = 0,5 * \frac{Dv_n}{NT_n} \quad (8)$$



## 7. FRECUENCIA

Esta variable es la que determina finalmente el nivel de oferta resultante, estableciendo así una relación  $Oferta / Demanda > 1$

La frecuencia indica la cantidad de trenes -pueden ser de diferente tipo y capacidad- que marcarán una pasada por el tramo más cargado durante cada período de la explotación.

A partir del intervalo, la Frecuencia  $F_p$  queda representada por:

$$F_p = (3600 / I_p) + 1 \quad (9)$$

## 8. OFERTA

Es preciso considerar que la *Oferta de Transporte*  $OT_p$  en cada período será la capacidad que presenta el sistema para responder a los requerimientos de la *Demanda*  $Q_p$  tanto en magnitud como en parámetros de calidad de servicio.

Por otra parte, la oferta de cada línea puede estar condicionada además por algunas restricciones tales como:

- la duración de la vuelta.
- limitaciones tecnológicas asociadas con la capacidad de respuesta de los equipos de control y supervisión del sistema.
- la dotación de trenes y personal calificado para su explotación,
- diferentes tipos y tamaños de trenes.
- el perfil de la vía.
- los trenes que salen de un terminal no pueden retornar desde cualquier punto de las vías.
- los trenes no pueden quedar estacionados en las vías.
- la distribución de la carga de trenes en línea.
- el transbordo de pasajeros entre líneas.
- otras características propias de cada línea.

La condición básica que debe cumplir la oferta en un período  $p$  determinado es:

$$OT_p > Q_p \quad (10)$$

Y quedará representada a través de la siguiente expresión:

$$OT_p = \sum (F_i * C_i) \quad (11)$$

Donde:

- $OT_p$  = Oferta de Transporte en el período  
 $Fi$  = Frecuencia de cada tipo de tren  $i$   
 $Ci$  = Capacidad nominal de pasajeros por tipo de tren  $i$

La *Oferta (pasajeros/hora/sentido)* máxima se obtiene entonces al lograr la más alta frecuencia de pasada de trenes por el punto de mayor demanda de la línea.

## 9. SENSIBILIZAR LA OFERTA

Una vez dimensionado el nivel de oferta en términos de intervalo y frecuencia por período, es necesario retroalimentar el proceso. El principal elemento que indica si estos resultados responden a los requerimientos de calidad de servicio como ya se señaló, es la *Densidad*  $\delta_p$ .

Entonces debe cumplirse lo siguiente:

$$\delta_p \leq \delta_{cs} \quad (12)$$

Donde:

- $\delta_p$  = Densidad programada para el período  
 $\delta_{cs}$  = Densidad prevista como norma de calidad de servicio.

Considerando que existe un parque de trenes con diferentes tamaños y configuraciones de coches; este parámetro se estimará aplicando la siguiente expresión:

$$\delta_p = \frac{Q_p - \sum Na_i}{\sum Ad_i} \quad (13)$$

Donde:

- $Q_p$  = Demanda Máxima del período  
 $Na_i$  = Número de asientos disponibles en el tren tipo  $i$ .  
 $Ad_i$  = Área total disponible para pasajeros de pie en el tren tipo  $i$

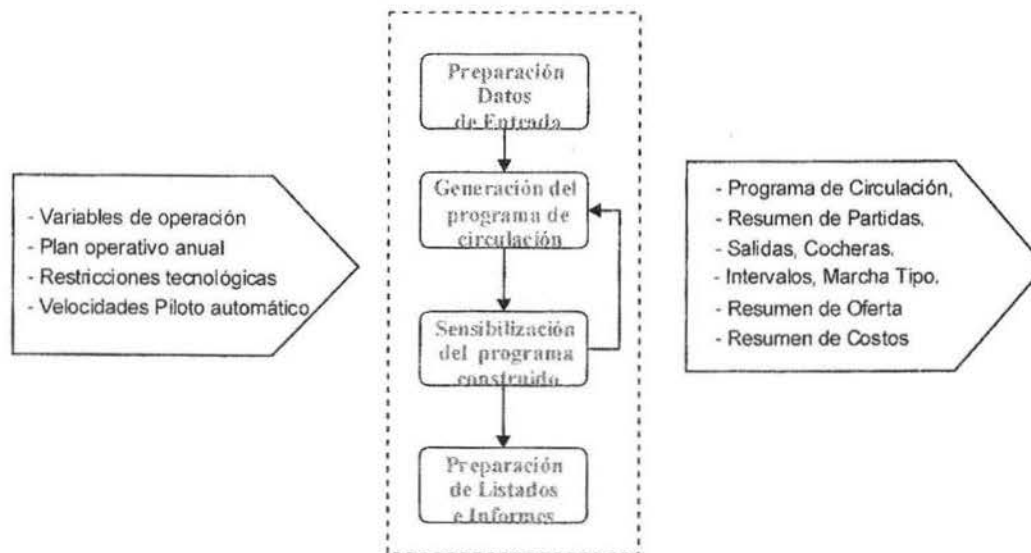
## 10. PROGRAMA DE CIRCULACIÓN DE TRENES

Luego de haber verificado que los parámetros de oferta y calidad de servicio son consistentes en todos los períodos típicos según el tipo de día; se procede a la confección de los programas de circulación de trenes, en los cuales quedará establecida la secuencia de partidas de trenes desde cada terminal, ya sea extremo o intermedio para cumplir con los niveles de oferta programada.

Este programa de circulación debe considerar a su vez una serie de restricciones y parámetros particulares, los que a través de una serie de rutinas van siendo iteradas y finalmente incorporadas a este producto.

El diagrama conceptual presentado a continuación se refiere al proceso básico en la confección de los programas de circulación de trenes, donde se resume la experiencia de Metro S.A. acerca del tema.

**Figura N°2: Esquema Generación de Programas de Circulación en Metro S.A**



En este diagrama se observa el contexto general bajo el cual se desarrolla un programa de circulación de trenes, allí es posible identificar los flujos de entrada y salida de datos y los principales procesos involucrados en la generación de estos programas.

A continuación se presenta un desglose de este sistema en términos de sus componentes principales: entradas, procesos y salidas.

### 10.1. Entradas Sistema Generador de Programas de Circulación

- ♦ **Variables de Operación:** representan a todas aquellas consideraciones básicas, especificaciones (marchas tipos, maniobras, dotaciones, operación en bucles, etc.) o requerimientos (N° de salidas y entradas a Cocheras, horarios inicio fin de servicio e intervalos, numeración de trenes, etc.) que deben ser atendidas por el programa de circulación en desarrollo.
- ♦ **Plan Operativo Anual:** corresponde al plan detallado de implementación de la oferta de transporte en términos de parámetros de Calidad de Servicio y operación (Oferta, Dotación de trenes, frecuencia, intervalo, densidad, N° de vueltas, etc.).



- ♦ **Restricciones Tecnológicas:** representan a las normas de diseño que debe satisfacer un programa de circulación para ser reconocido y operado por el sistema Programador General de Tráfico (PGT). El cual tiene como propósito mantener la regulación y el control diario de la ejecución de los programas de circulación.
- ♦ **Velocidades del Piloto Automático:** corresponden a las distintas opciones de velocidad para los recorridos en las interestaciones, que permite el actual sistema de Pilotaje Automático de Metro S.A. (denominado Sacem).

## 10.2. Procesos Sistema Generador de Programas de Circulación

Así también, los procesos involucrados en la elaboración de un programa de circulación pueden describirse de la siguiente forma:

- a) **Preparación de datos de entrada:** En este proceso se deben realizar los cálculos de los principales parámetros requeridos en la construcción de un programa de circulación. Para ello se consideran las siguientes etapas:
  - ♦ **Etapla I:** Determinación del Tiempo de viaje entre terminales principales, secundarios y en circuitos de Bucle, de acuerdo a las diferentes marchas tipo y maniobras a utilizar en cada uno de los periodos horarios considerados en el programa de circulación.
  - ♦ **Etapla II:** Cálculo de Intervalo por periodo horario según estrategia de operación (circulación Normal o circulación en Bucle), según ecuación N°8.
  - ♦ **Etapla III:** Definición de secuencia de numeración de trenes. (según criterios de circulación normal o en bucle).
- b) **Generación del Programa de Circulación:** En este proceso se comienza con la elaboración de un programa sobre la base de los datos de entrada del proceso anterior y a una serie de algoritmos y ecuaciones diseñados para este fin. A continuación se presenta un proceso simplificado, válido para trenes en circulación normal o en bucle, orientado a la generación de programas estructurado de acuerdo con las siguientes etapas:
  - ♦ **Etapla I:** Generación de partidas de cada tren desde terminales principales, hasta secundarios e intermedios y viceversa, según intervalos y estrategia de operación definida por cada periodo horario según la siguiente ecuación:

$$HP_{ijk} = HP_{i-1jk} + Int_p \quad (14)$$

Donde:

$HP_{ijk}$  = Hora de partida del tren  $i$  desde el terminal  $j$  en la vuelta  $k$

$HP_{i-1jk}$  = Hora de partida del tren  $i-1$  desde el terminal  $j$  en la vuelta  $k$

$Int_p$  = Intervalo en el periodo horario  $p$

- ♦ **Etapa II:** A continuación se realiza el cálculo de la hora de llegada de cada tren al terminal, mediante la siguiente ecuación.

$$HLL_{ijk} = TV_{jlp} + Man_{jp} \quad (15)$$

Donde:

$HLL_{ijk}$  = Hora de llegada del tren  $i$  al terminal  $j$  en la vuelta  $k$

$TV_{jlp}$  = Tiempo de viaje entre el terminal  $j$  y el  $l$  en el periodo horario  $p$

$Man_{jp}$  = Tiempo de maniobra en el terminal  $j$  en el periodo horario  $p$

- ♦ **Etapa III:** El procedimiento continúa con el cálculo del tiempo auxiliar en cada terminal según tipo de maniobra aplicada mediante la siguiente ecuación.

$$Taux_{ijk} = HP_{ijk} - HLL_{ijk} \quad (16)$$

Donde:

$Taux_{ijk}$  = Tiempo auxiliar del tren  $i$  en el terminal  $j$  en la vuelta  $k$

$HLL_{ijk}$  = Hora de llegada del tren  $i$  en el terminal  $j$  en la vuelta  $k$

En esta etapa se deben verificar las siguientes condiciones y realizar la medida correctiva que se indica:

- $0 < Taux_{ijk} < Int_p$  : tren con partida óptima, implica seguir con la partida del próximo tren desde el terminal.
- $Taux_{ijk} > Int_p$  : tren con adelanto, implica modificar maniobra o disminuir el intervalo.
- $Taux_{ijk} < 0$  : tren con atraso, implica modificar maniobra o aumentar el intervalo.

- ♦ **Etapa IV:** La generación de las partidas de los siguientes trenes desde cada terminal en las restantes vueltas queda determinada por las ecuaciones (14), (15) y (16).

### c) Sensibilización del Programa Construido:

En esta etapa se genera la retrolimentación de todo el proceso de elaboración de programas de circulación. En él se realiza la validación del programa construido frente a las especificaciones y/o requerimientos iniciales, ya sea, en términos de dotación de trenes, intervalos, tiempos auxiliares, maniobras o cualquier otra condición que pudiera ser inconsistente con lo planeado.

#### d) Preparación de Listados e Informes:

En esta etapa se realiza la creación de los distintos listados e informes, en los formatos requeridos, que permiten la carga del programa de circulación en el PGT, como así también, la verificación de algunos indicadores y parámetros de calidad de servicio resultantes de la construcción dicho programa de circulación.

### 10.3. Salidas Sistema Generación de Programas de Circulación

Finalmente las salidas del proceso de generación de programas son una serie de listados e informes con propósitos, contenidos y destinatarios específicos. Dichos informes y sus principales características se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla N°1: Listados e informes generación de programas de circulación en el Metro de Santiago**

Listado/ Informes	Objetivo	Contenido	Destinatario
1.- Planilla horaria del Programa de Circulación.	Presentar el programa de circulación definitivo a implementar	Por cada terminal: Intervalo- N° de tren- Hora partida- Tpo.Aux- maniobra	Depto. Administración de Tráfico Depto. Control de Procesos
2.-Resumen de partidas de trenes	Condensar la información de partidas de trenes desde todos los terminales, con el propósito de dimensionar la cantidad de conductores y Horas - Hombre necesarios para implementarlo	Por cada terminal: N° de tren- Hora partida	Depto. Administración de Tráfico
3.-Resumen de salidas y cocheras	Organizar la entrada y salida del material rodante hacia y desde las cocheras	Por cada terminal: N° de tren- Hora salida/Cochereo	Depto. Control de Procesos
4.-Resumen de Intervalos	Condensar la cantidad y variación de intervalos en cada uno de los terminales.	Por cada terminal: Intervalo - N° de tren	Depto. Control de Procesos
5.-Resumen de maniobras y marchas tipo	Condensar la cantidad y variación de las maniobras y marchas tipos en cada uno de los terminales.	Por cada terminal: N° de tren -Hora partida - maniobra	Depto. Control de Procesos
6.-Resumen de Costos	Presentar una estimación de los principales indicadores de costos derivados de la ejecución del programa de circulación construido.	- N° de vueltas: Circulación Normal Circulación en Bucle - Coches- Kilómetros - KWh de Energía de Tracción	Depto. Control de Procesos Estudios de Operaciones
7.-Resumen de Oferta	Presentar una estimación de los principales parámetros de calidad de servicio derivados de la ejecución del programa de circulación construido.	Por cada periodo horario: Oferta y Demanda Máxima- Dotación de trenes - frecuencia-intervalo - densidad- configuración	Depto. Control de Procesos Estudios de Operaciones

## 11. CONCLUSIÓN

La sistematización en el manejo de las variables que componen la oferta en un sistema de Metro, permite responder en forma más eficiente a los nuevos requerimientos, que cada día son crecientes en exigencias tanto de calidad de servicio como de productividad.

Este modelo de análisis de las principales variables que determinan la oferta, ha permitido enfrentar las actuales estrategias operacionales aplicadas con ese objetivo, de las cuales el bucle que se realiza hoy en la línea 1 en el Metro de Santiago es el reflejo de una innovadora y eficiente fórmula de explotación de los recursos disponibles.

Antecedentes finales:

Los autores son ingenieros de la Gerencia de Operaciones del Metro de Santiago.