

Artículo

# Data Analytics y sistemas computacionales: elementos claves para la mejora del rendimiento de un operador del Transantiago



**Diego Muñoz Carrasco**

Gerente de Operaciones y Estudios STP  
Santiago S.A.

## Resumen

El sistema de transporte público de Santiago es un eje fundamental para el movimiento de la economía. Si consideramos que los ciudadanos de la capital, en muchos casos, deben lidiar con largos tiempos de viaje, resulta natural pensar que al disminuir los tiempos de traslado mejorará considerablemente la calidad de vida de todos los ciudadanos. En este artículo, mostramos cómo con la incorporación de enfoques matemáticos basados en *business analytics* fue posible mejorar el rendimiento y la eficiencia de un operador del Transantiago. Estos enfoques apuntaron a mejorar tanto, la frecuencia, como la regularidad de la flota de buses, con el fin de mejorar la calidad del servicio a un mínimo costo. Cabe destacar que esta compañía pasó de estar en las últimas posiciones del Ranking de Calidad de Servicio de las Empresas. Concesionarias de Transantiago, en el año 2013, a liderarlo, ubicándose en la primera posición desde inicios del 2018 hasta la fecha.



**Jaime Miranda Pino**

Director Centro en Sistemas de Información  
y Ciencias de la Decisión, Universidad de Chile.

## Introducción

Una gran parte de la población de Santiago de Chile se moviliza en el sistema de transporte público para realizar sus actividades cotidianas o imprevistas, teniendo que lidiar, en muchos casos, con largos tiempos de viaje que resultan ser significativos respecto del tiempo total disponible. Si consideramos por ejemplo que una persona gasta en promedio dos horas en trasladarse a su lugar de trabajo, esto corresponde entre un 20 a un 25% de su jornada laboral. Por tanto, resulta evidente que tener un sistema de transporte público eficiente genera enormes externalidades positivas y mejora la calidad de vida de todos los ciudadanos de la capital.

El sistema actual de transporte público en Santiago, llamado Red Metropolitana de Movilidad (RMM), está regulado por el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM). Este organismo es el encargado de articular, coordinar y supervisar las acciones, programas y medidas tendientes a gestionar el transporte público de la ciudad de Santiago de Chile.

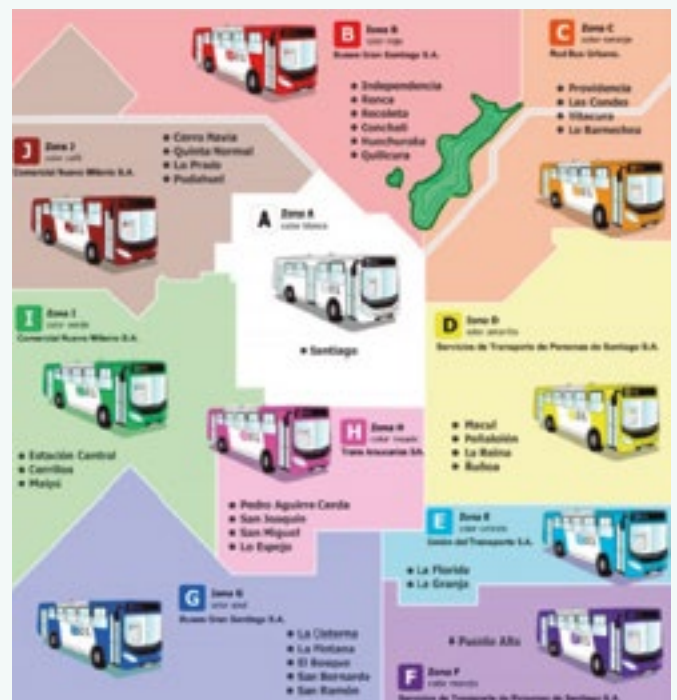
Para entender el actual funcionamiento del sistema, es necesario remontarse a su origen. El 10 de febrero 2007 se instaura un nuevo modelo de transporte público impulsado por el Gobierno de Chile, denominado Transantiago, el cual correspondía a un sistema de transporte completamente nuevo para la ciudad de Santiago que cambió por completo el diseño utilizado hasta ese momento. Este surge con el propósito de hacer un sistema más eficiente y organizado, que pudiera ofrecer un mejor nivel de servicio para los usuarios.

**Si consideramos que los ciudadanos de la capital, en muchos casos, deben lidiar con largos tiempos de viaje, resulta natural pensar que al disminuir los tiempos de traslado mejorará considerablemente la calidad de vida de todos los ciudadanos.**

Este modelo contemplaba la integración tarifaria entre el sistema de buses y trenes interurbanos, lo que no ocurría antes. En términos operacionales, el Transantiago reemplazaría la estructura de las antiguas líneas de buses por un sistema troncal-alimentador, que conceptualmente estaba basado en un diseño de una red de nodos de transferencia, idea propuesta por Schneider y Smith en 1981. Por esta razón, la ciudad de Santiago fue dividida en 10 áreas de servicio, las cuales incluían un pequeño grupo de unidades administrativas denominadas comunas. Las rutas locales o alimentadoras se definieron dentro de cada área de servicio, ya fuese para viajes locales o para aquellos que requerían al menos un trasbordo a otra ruta. Por lo tanto, el diseño de estas rutas alimentadoras debía considerar el trasbordo de los usuarios, aspecto que ayudaría a conectar zonas distantes de la ciudad a través de corredores.

En el contrato original del Transantiago, los recorridos fueron divididos en cinco servicios troncales y seis servicios alimentadores, siguiendo una clasificación con base operacional (Ver Figura 1), para poder ordenar el sistema de transporte público de la capital y, de ese modo, eliminar la competencia entre operadores que existía con el sistema original de "micro amarillos". Este esquema se inició con 11 empresas del sector privado.

**FIGURA 1: PLANO ORIGINAL DEL SISTEMA TRANSANTIAGO**  
Fuente: Transantiago



En este contrato, los ingresos percibidos por los concesionarios se desglosaban en una parte fija relacionada a los kilómetros recorridos; y otra variable correspondiente a los pasajeros transportados. Un aspecto importante de este contrato es que la parte fija, asociada a los kilómetros efectivamente recorridos, correspondía a un 70% de los ingresos percibidos por los concesionarios. En relación a los descuentos, estos se establecieron en base a los incumplimientos en los Indicadores de Frecuencia (ICF) y Regularidad (ICR), siendo fiscalizados de manera presencial por la autoridad desde la salida del terminal. Se consideraba una muestra del orden del 5% de todos los servicios-sentido (o rutas) y periodos del día afectos a sanción.

Lo anterior cambia radicalmente con los nuevos contratos del año 2012. En la nueva estructura del sistema, se estableció la reducción a solo siete empresas privadas (Ver Figura 2). Este nuevo esquema puso énfasis en la mejora de la calidad de servicio entregado al usuario, siendo sus puntos centrales los siguientes:

- » **Fin de la exclusividad del uso de las vías.**
- » **Mejorar el diseño de los recorridos, enfocándose en disminuir la cantidad de trasbordos.**
- » **Mayor fiscalización a los operadores para mejorar la calidad de servicio.**

En estos nuevos contratos, los ingresos continuaron dividiéndose en una parte fija, relacionada a los kilómetros y otra parte variable que se determinó en base a los pasajeros transportados. Sin embargo, se establecieron dos cambios profundos. El primero consistió en que el 70% de los ingresos dependían de los pasajeros transportados, por lo que se traspasó el problema de la evasión directamente al operador. El segundo tuvo que ver con modificaciones de multas y descuentos, incluyéndose sanciones sobre el incumplimiento de cualquier obligación asumida por el operador. Los cambios más drásticos tuvieron que ver con los índices ICF e ICR, que medían diariamente los niveles de cumplimiento y la calidad del servicio entregado respecto de las operaciones en los periodos de hora punta en la mañana, tarde y día completo, generándose trimestralmente el Ranking de Calidad de Servicio de Empresas Operadoras del Transantiago<sup>1</sup> que empezó a comparar las siete empresas operadoras.

1 <http://www.dtpm.gob.cl/index.php/documentos/ranking-calidad-de-servicio>

**FIGURA 2: PLANO DEL SISTEMA TRANSANTIAGO**

Fuente: Transantiago

Unidad	Empresa Operadora	Recorridos
Unidad N°1	Recorridos Alsacia <small>También opera los recorridos 408 - 410</small>	100
Unidad N°2	Recorridos Su Bus	200 G
Unidad N°3	Recorridos Buses Vule	300 E H I
Unidad N°4	Recorridos Express <small>No opera los recorridos 408 - 410</small>	400 D
Unidad N°5	Recorridos Buses Metropolitanas	500 J
Unidad N°6	Recorridos Red Bus Urbano	B C
Unidad N°7	Recorridos STP Santiago	F

Nuevamente, en marzo 2019, el sistema cambió de denominación. De Transantiago pasó a llamarse Red Metropolitana de Movilidad de Transporte, de ahora en adelante Red. Tras esta nueva modificación, se impulsó un nuevo estándar de transporte público, el que busca brindar un mayor confort a los usuarios del sistema, que incluye, en el caso de los buses, aire acondicionado, Wifi y puerto USB para los pasajeros, y que las máquinas sean más amigables con el medio ambiente (diésel euro VI y eléctricos).

Para efectos de este estudio, analizaremos la empresa STP Santiago S.A., de ahora en adelante STP, la que corresponde a la Unidad 7. Al inicio de los contratos del año 2012, contaba con 331 buses de flota base. Además, el primer ranking de Transantiago del trimestre julio-septiembre del mismo año evidenció resultados desfavorables para la compañía, posicionándola en cuarto y quinto lugar en los indicadores ICF e ICR, respectivamente (Ver Tabla).

**TABLA 1: RESULTADOS DEL PRIMER RANKING DE CALIDAD DE SERVICIO DE EMPRESAS OPERADORAS DEL TRANSANTIAGO AÑO 2012, CORRESPONDIENTE AL TRIMESTRE JULIO-SEPTIEMBRE.**

Lugar	Empresa	ICF Día Completo	Lugar	Empresa	ICR Día Completo
1	Metbus	97,9%	1	Metbus	87,4%
2	Vule	95,3%	2	Vule	86,4%
3	Redbus	95,0%	3	Redbus	84,6%
4	STP	94,8%	4	Subus	82,1%
5	Subus	93,0%	5	STP	81,1%
6	Alsacia	92,8%	6	Express	79,1%
7	Express	90,3%	7	Alsacia	76,9%

Fuente: Transantiago.

Debido al bajo nivel de operación de STP, desde junio a diciembre del año 2012, se generaron diferentes descuentos por frecuencia y regularidad, los cuales equivalían a un 4,5% del ingreso mensual de la compañía. Una de las principales razones que explica este bajo rendimiento es que la compañía no contaba con una herramienta que le permitiera diseñar su planificación de manera adecuada y, por ende, dimensionar correctamente la flota para su operación. En concreto, la empresa no contaba con la información de cuántos eran los buses necesarios para lograr cumplir con la mayor demanda de pasajeros que exigía la hora punta, generando un costo extra por uso de flota adicional, el cual no se encontraba cubierto en la estructura financiera de la compañía.

### Planificación estratégica y sistemas de transporte público

De acuerdo con (Ceder 2002, 2007), el problema de planificación de un sistema de transporte público comprende cuatro etapas fundamentales: (1) diseño de la red de transporte, (2) diseño de los horarios de los viajes, (3) asignación de buses y (4) asignación de conductores. En la literatura especializada, se encuentran diferentes enfoques para abordar las diferentes etapas del proceso de planificación del transporte público antes descrito, las cuales generalmente se tratan de manera secuencial.

Las restricciones asociadas a la capacidad de transporte y a los rangos de frecuencias impuestas en los contratos de concesión, permiten al administrador elegir entre diferentes combinaciones de buses de múltiples tamaños para cumplir con los requisitos del transporte. Bajo este esquema, el diseño de horarios de viaje, independiente de la asignación de buses, produciría decisiones poco eficientes, ya que no se sabe a priori cuál es el tamaño del bus óptimo para un viaje en particular. En general, la literatura aborda el diseño de horarios de viajes de forma separada a la asignación de buses como se mencionó anteriormente. Este enfoque tradicional o enfoque secuencial resuelve primero el diseño de los viajes y luego asigna los buses. No obstante, el enfoque analítico de la solución propuesta considera un esquema que integra ambas etapas y busca encontrar una solución óptima del problema global.

Para el diseño del horario de viajes, se encuentran soluciones proporcionadas tanto por métodos heurísticos como de optimización exacta, dependiendo de las características específicas del problema. (Wirasinghe, 2003) introduce el concepto de optimizar el horario de tiempos muertos en puntos intermedios de la ruta junto con la minimización de los tiempos de espera, así como los costos de operación. Uno de los casos más difíciles que contempla el diseño de horarios de viaje en el sistema de buses es aquel

en el que el horario se intenta coordinar en ciertas paradas de transbordo. Esto ocurre, porque las transferencias dentro de la red deben estar bien sincronizadas.

Inicialmente, se propusieron métodos para la sincronización en un solo punto, en el que los tiempos muertos se podían optimizar con el fin de minimizar la espera de los pasajeros (Klemt y Stemme, 1988). También se presentan modelos analíticos que optimizan los tiempos muertos y los *headways* de las rutas de conexión en las estaciones de transferencia (Chien y Schonfeld, 1998), extendiendo los tiempos de espera en algunos casos para cubrir múltiples puntos de transferencia. Debido a la complejidad de los problemas enteros mixtos resultantes, se han desarrollado métodos heurísticos que buscan encontrar tiempos muertos y *headways* comunes entre rutas (Chowdhury y Chien, 2001; Ting y Schonfeld, 2005). (Ceder y Tal 1999, 2001) introducen un modelo para maximizar el número de conexiones sincronizadas entre rutas. Eranki (2004), redefine el concepto de la sincronización como el evento de dos buses llegando a un punto en común, con tiempo de separación acotado por una ventana de tiempo. Posteriormente, Ibarra-Rojas y Rios-Solis (2012), adecúan los modelos de Ceder (2001) y Eranki (2004) para maximizar el número de sincronizaciones de dos buses, permitiendo la transferencia de pasajeros o la separación de dos buses en los puntos de congestión, garantizando regularidad a lo largo del periodo de planificación.

Ahora bien, la asignación de buses busca resolver el problema de distribución de viajes para los buses en el día de manera de poder realizar todos los traslados en un conjunto de horarios de salida determinado (*timetabling*). Esto con el objetivo de reducir el tamaño de la flota y/o los costos operacionales. La estructura del problema a resolver puede ser muy variada, dependiendo de algunos factores, tales como si se cuenta con buses con capacidades de transporte homogéneas o heterogéneas; la cantidad de terminales, y si se considera el uso de *deadheading*. Esta última es una estrategia de asignación de flota que consiste en que los buses puedan realizar rutas a puertas cerradas y sin pasajeros, para así disminuir los tiempos de viaje y lograr una mayor disponibilidad de máquinas que sirven en la ruta con mayor demanda.

El problema básico de distribución de flota es conocido en la literatura como *Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem* (MDVSP), el cual ha sido estudiado no solo en el contexto de buses (Daduna y Paixao, 1995), sino que también en el estudio de otros medios de transporte, por ejemplo, el caso de los trenes (Cordeau et al., 2001) y aerolíneas (Hane et al., 1995).

(Forbes et al., 1994), aplica una red de tiempo expandida a un problema similar al descrito por nosotros. En su trabajo, los nodos de transbordo no

son incluidos; como consecuencia, un bus que sale desde un terminal no puede regresar a este y permanecer esperando para realizar otro viaje. (Lobel 1998,1999) y (Mesquita y Paixao, 1999) han propuesto formulaciones para el MDVSP así como métodos capaces de resolver tales formulaciones de manera exacta; los primeros a través de un algoritmo *branch-and-cut*; mientras que los segundos por un proceso de búsqueda en árbol. (Kwan y Rahin 1999) elaboraron un enfoque orientado al objeto para programación de buses. (Dell Amico et al., 1993) desarrollan heurísticas basadas en construcciones de rutas mínimas con el objeto de minimizar el tamaño de flota. (Haghani y Banihashemi 2002) modificaron la estructura de red propuesta por (Forbes et al., 1994), añadiendo nodos de trasbordo, los cuales permiten a los buses retornar al terminal para realizar otro viaje. En este caso, se enfocan en resolver una aplicación real del MDVSP, en la que desarrollan heurísticas y métodos exactos que aplican sobre ciudades reales. (Freling et al., 2001a) usa algoritmos del tipo *auction* para resolver el problema con un terminal y vehículos idénticos. (Pepin et al., 2006) prueban que la solución óptima *Single Depot Vehicle Scheduling Problem* (SDVSP) puede encontrarse en tiempo polinomial. (Ceder 2005, 2007) muestran una técnica interactiva para asistir al operador, proponiendo programaciones variables. (Kliwer et al. 2006), proponen una formulación basada en una estructura de red espacio-tiempo para resolver el MDVSP de manera exacta para instancias reales. Posteriormente, (Kliwer et al. 2010) resuelven el MDVSP de manera integrada al Crew Scheduling Problem (CSP), utilizando una estructura de red espacio-tiempo. Ellos proponen una formulación de flujo *multicommodity* para la asignación de vehículos, combinándolo con una formulación *set partitioning* para la programación de conductores y, de esa manera, resuelven el problema con generación de columnas mezclado con relajación Lagrangeana.

**El problema básico de distribución de flota es conocido en la literatura como *Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem* (MDVSP), el cual ha sido estudiado no solo en el contexto de buses (Daduna y Paixao, 1995), sino que también en el estudio de otros medios de transporte, por ejemplo, el caso de los trenes (Cordeau et al., 2001) y aerolíneas (Hane et al., 1995).**

Por lo general, la literatura considera una flota homogénea, lo que no se ajusta a la realidad del transporte público chileno, que cuenta con diferentes tipos de buses, que van desde uno mini de 42 plazas hasta los articulados que incluyen 163 plazas. Este importante elemento fue incorporado en el enfoque analítico que detallamos a continuación.

### Analytic approach

Nuestro enfoque analítico busca resolver las etapas que determinan los horarios de viaje y la asignación de buses de manera conjunta para el concesionario STP Santiago S.A. del sistema Red. El enfoque propuesto utiliza un modelo de programación lineal entero mixto, en el cual se relaciona de manera conjunta la decisión de la determinación de los horarios de viaje con la asignación de buses. Adicionalmente, se incorpora la estrategia de *deadheading*, para hacer más eficiente el uso de buses y ajustar la oferta en los periodos, en el que existe una mayor demanda en una ruta del servicio.

El enfoque propuesto tiene por objetivo minimizar los costos totales de la operación y busca decidir el terminal inicial, la hora de salida y el tipo de vehículo que debe realizar el viaje considerando el mínimo costo operacional posible. Este problema es modelado a través de una red de nodos expandida en función del tiempo. Bajo este modelo, el tiempo, que es de carácter continuo a lo largo de la jornada de trabajo, es discretizado en periodos de duración fija (índice). Cada combinación de terminal y tipo de bus es representado por una red diferente. Para cada red en un periodo, se construye una capa que contiene cuatro tipos de nodos (Ver Figura 3), que se describen a continuación.

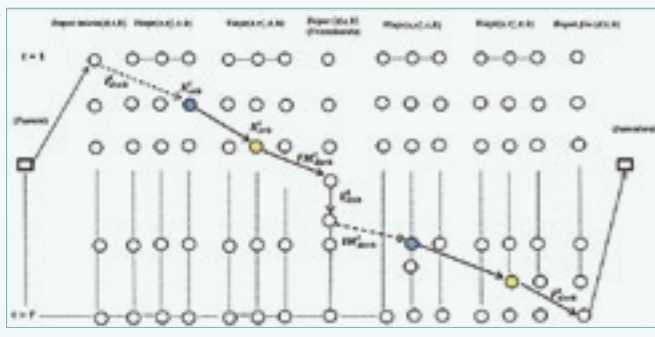
- » **Nodos viaje:** Representan un viaje iniciado en el período por alguna ruta específica.
- » **Nodos inicio de día:** Representan el comienzo de un día de trabajo de un bus en un periodo.
- » **Nodos depot:** Representan la situación de un bus cuando debe esperar en un depot entre dos viajes consecutivos.
- » **Nodos fin de día:** Representan el fin del día de trabajo de un bus en el periodo. Este bus se mantendrá en el terminal hasta el siguiente día.

Adicionalmente a lo anterior, la red incluye cinco tipos de arcos descritos a continuación:

- » **Arcos inicio de día:** Conectan los nodos de inicio de día con los nodos viajes.

- » **Arcos viaje a viaje: Conectan los nodos correspondientes a dos viajes consecutivos realizados por un mismo bus.**
- » **Arcos depot: Conectan los nodos viaje a nodos depot y nodos depot a nodos viajes.**
- » **Arcos de espera en depot: Conectan los nodos depot desde el período  $t$  al  $t+1$ .**
- » **Arcos fin de día: Conectan nodos viajes a nodos de fin de día.**

**FIGURA 3: RED EXPANDIDA EN EL TIEMPO PARA UN TERMINAL Y UN TIPO DE BUS.**



El modelo de optimización incluye restricciones de conservación de flujo, en el que un camino de un nodo fuente a un nodo sumidero en nuestra red, representa una secuencia de viajes y períodos de espera para un tipo de bus en un día de operación, considerando las condiciones asociadas a la capacidad de los buses que posee la compañía.

Cabe destacar que los contratos de concesión imponen que tanto la frecuencia como la capacidad de transporte, se deben cumplir con umbrales mínimos para cada periodo de operación. Nuestro enfoque incorpora restricciones específicas para asegurar que la capacidad de transporte ofrecida para cada periodo de operación y recorrido contemple a lo menos la demanda mínima requerida. Por otra parte, para satisfacer las frecuencias exigidas, las restricciones se formulan en términos de *headways* (tiempo entre la salida de dos buses de un mismo recorrido), para así añadir la condición de regularidad al sistema con el fin de minimizar los tiempos de espera y garantizar un adecuado nivel de servicio para los usuarios. Se incluye para cada recorrido *headways* mínimos y máximos, de modo de limitar las salidas breves y extensas.

Debido a que la flota de bus es acotada, es necesario incorporar una restricción por tipo de bus que limite la cantidad de máquinas utilizadas. Adicional a esto, se deben limitar las salidas de un tipo

particular de bus por cierto recorrido, ya sea por las condiciones viales, que incluye virajes muy estrechos o las exigencias de la empresa, por la utilización de buses de gran capacidad para servicios con alta demanda.

Finalmente, la función objetivo comprende la minimización de los costos fijos y operacionales por kilómetro, asociados con la programación elegida. El costo fijo se calcula a través del número de buses utilizado, teniendo en cuenta su primer viaje. El otro término cuantifica el costo variable de operación de flota, incluyendo el costo de realizar viajes más la porción de *deadheading* (desde y hacia el terminal). La formulación general del modelo es capaz de manejar varias flexibilidades operacionales. Por ejemplo, las rutas no tienen necesariamente que partir de un terminal y, además, un bus específico puede ser asignado a diferentes rutas durante la jornada laboral.

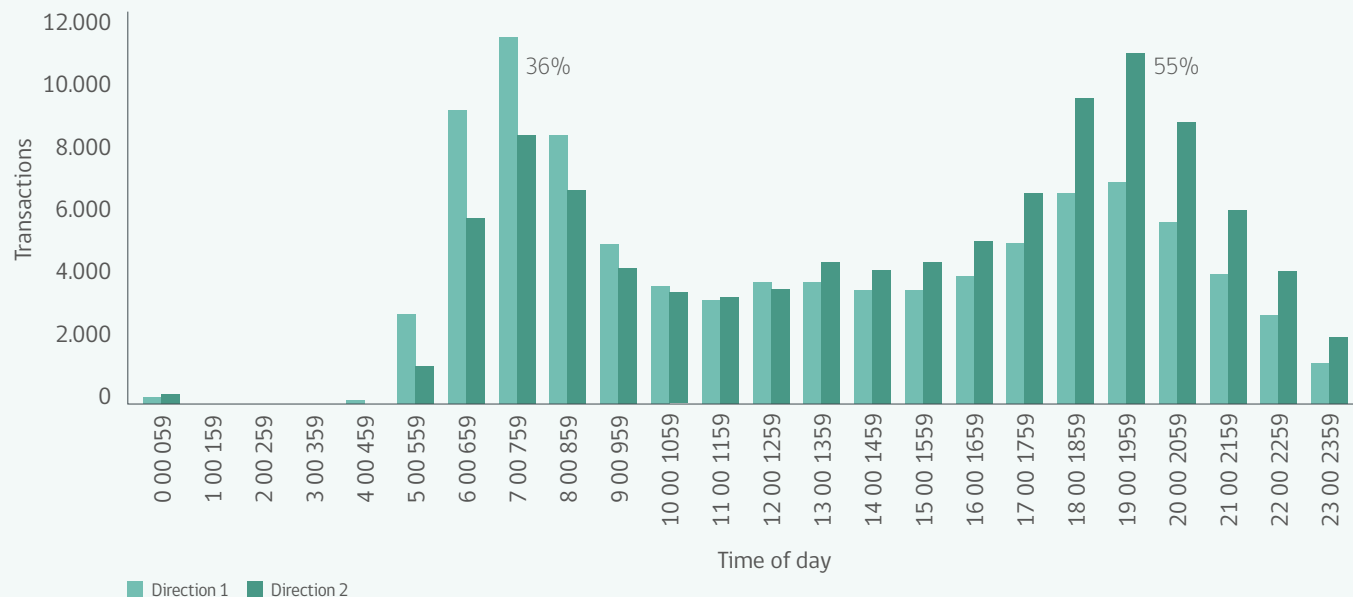
### Nuestra aplicación en el mundo real

Entre junio 2012 y noviembre 2015, la Unidad 7 tuvo a cargo la operación de los servicios de transporte público de la comuna de Puente Alto, la cual posee una superficie de 88 Km<sup>2</sup> y 586.106 habitantes, según el Censo del año 2017, siendo la comuna más poblada de Chile. En ese periodo, contaba con cuatro terminales, 30 recorridos, 331 buses de flota base y una participación de mercado del 5,9% sobre un total de 90 millones de transacciones mensuales generadas en el sistema de buses.

Respecto a la demanda de los usuarios, se observa que el número de viajes o transacciones cambia a lo largo del día (Ver Figura 4). En ella, se muestra que en los horarios punta existen grandes desbalances de carga en la demanda. Esto se debe a que en la mañana los usuarios de esta unidad se desplazan principalmente desde la periferia al centro de la capital y, en la tarde, el recorrido lo hacen a la inversa. Por ejemplo, entre 7:00 y 8:00 AM existe una diferencia del 36% entre ambos sentidos; mientras que entre las 19:00 y las 20:00 PM esa diferencia crece llegando al 58% (Ver Figura 4).

**Cabe destacar que los contratos de concesión imponen que tanto la frecuencia como la capacidad de transporte, se deben cumplir con umbrales mínimos para cada periodo de operación.**

FIGURA 4: ASIMETRÍAS DE DEMANDA QUE ENFRENTA STP SANTIAGO S.A.



Para poder hacer frente a la situación antes descrita, nuestro enfoque analítico incorpora la estrategia de *deadheading*, permitiendo que un bus realice rutas a puertas cerradas y sin pasajeros por caminos no comerciales. Esta estrategia tiene como objetivo disminuir los tiempos de viaje entre terminales, aumentando la disponibilidad de buses que sirven en la ruta de mayor demanda.

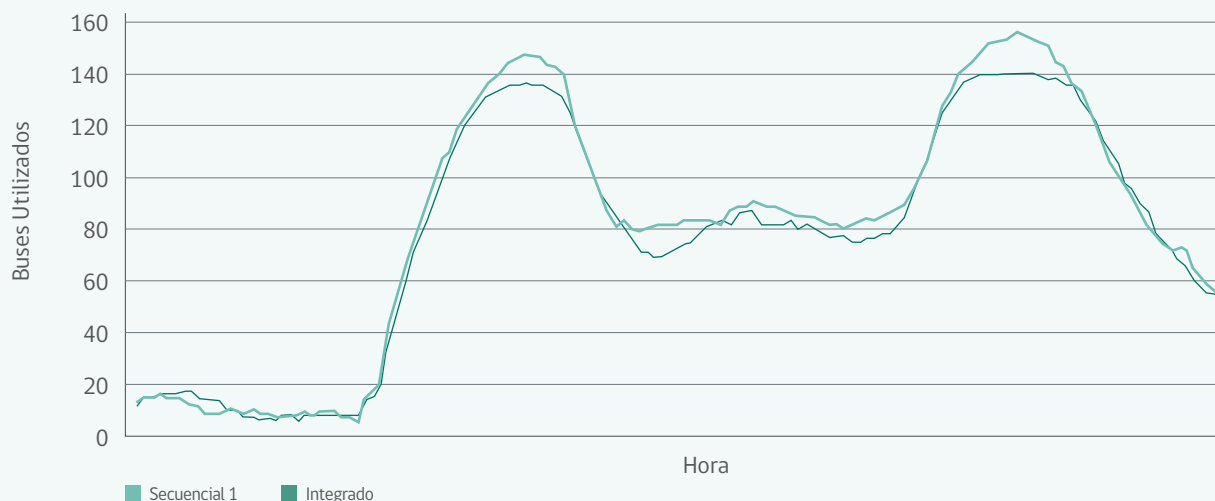
Para evaluar nuestro enfoque analítico integrado con el enfoque secuencial, se utilizó el terminal Juanita ubicado en Puente Alto. Este terminal tiene a cargo nueve recorridos (R1 al R9), permitiendo su circulación durante el día por distintos recorridos. Por ejemplo, un bus que inicia su operación en el recorrido R3, también puede circular durante el día por los recorridos R4, R5 y R6.

Conjunto de recorridos	Cantidad de buses		
	Secuencial (1)	Integrado (2)	(2)-(1)
R1-R2	63	58	-5
R3-R4-R5-R6	47	42	-5
R7	18	15	-3
R8-R9	28	25	-3
<b>Total</b>	<b>156</b>	<b>140</b>	<b>-16</b>

**Se muestra que en los horarios punta existen grandes desbalances de carga en la demanda. Esto se debe a que en la mañana los usuarios de esta unidad se desplazan principalmente desde la periferia al centro de la capital y, en la tarde, el recorrido lo hacen a la inversa.**

Al aplicar ambos enfoques en el terminal Juanita, se obtuvo que el enfoque integrado utiliza menos del 10% de los buses para realizar la operación. Para todos los recorridos analizados (Ver tabla 2), el enfoque analítico propuesto muestra resultados superiores respecto del enfoque secuencial en el caso de estudio. Si analizamos el efecto durante el día, se observa que las mayores diferencias ocurren en los períodos de mayor demanda, o sea en los horarios punta de la mañana y tarde, en el que se puede programar un número menor de buses, para asegurar que las condiciones de operación de la flota sean óptimas. Este efecto se observa en la Figura 5, que muestra el número de buses utilizados para cada horario del día.

FIGURA 5: NÚMERO DE BUSES UTILIZADOS PARA AMBOS ENFOQUES, SEGÚN LA HORA DEL DÍA



Cabe destacar que el día 16 de junio de 2013, se implementó la propuesta de nuestro enfoque analítico integrado en la planificación de horarios y asignación de buses para los cuatro terminales de la compañía STP S.A en la operación. Para realizar esta acción, fue necesario incorporar 43 buses nuevos a la flota base de la compañía.

### Análisis del mercado y empresas del sector

Para validar el impacto de nuestro enfoque de solución respecto de las demás compañías que operan en el sistema de transporte público, utilizamos el quinto Ranking de Calidad de Servicio de Empresas Operadoras del Transantiago julio-septiembre 2013 (Ver Tabla 3). En él, se observa que la compañía STP mejora su situación luego de la incorporación de nuestro enfoque analítico (Ver Tabla 1). En concreto, la empresa mejora sus índices de frecuencia (ICF) como de regularidad (ICR), pasando de un 94,8% a un 97,4%, y de un 81,1% a un 92,1%, respectivamente. Cabe destacar que, a pesar de mantener el cuarto lugar en términos de frecuencia, con la inclusión de este enfoque, la compañía logra el primer lugar del ranking en términos de regularidad.

**A pesar de mantener el cuarto lugar en términos de frecuencia, con la inclusión de este enfoque, la compañía logra el primer lugar del ranking en términos de regularidad.**

TABLA 3: RESULTADOS DÍA COMPLETO DEL QUINTO RANKING DE CALIDAD DE SERVICIO DE EMPRESAS OPERADORAS DEL TRANSANTIAGO DEL AÑO 2013 (TRIMESTRE JULIO-SEPTIEMBRE).

Lugar	Empresa	ICF Día Completo	Lugar	Empresa	ICR Día Completo
1	Metbus	99,30%	1	STP	92,10%
2	Vule	98,00%	2	Metbus	88,80%
3	Redbus	97,50%	3	Vule	85,70%
4	STP	97,40%	4	Redbus	84,90%
5	Subus	97,00%	5	Subus	83,40%
6	Express	96,70%	6	Express	82,70%
7	Alsacia	93,20%	7	Alsacia	77,80%

Gracias a los buenos resultados y al incumplimiento de los índices de calidad mínima impuestos a otra empresa operadora por parte del gobierno, STP se convirtió en la primera compañía del Transantiago en obtener un recorrido reasignado desde otro operador. La primera reasignación se realizó el 01 de diciembre de 2015. En ese entonces, STP absorbió 19 buses, correspondientes a la operación del recorrido 213e, que pertenecía a Subus. Casi un año más tarde, el 24 de septiembre de 2016, se llevó a cabo la segunda reasignación del Transantiago. En ella, STP absorbió 44 buses del recorrido 112 de Alsacia, el que se fusionó con el recorrido F21 de STP, creándose el recorrido más largo del sistema: 712, el cual contempla cerca de 100 kilómetros totales entre la ida y vuelta. Cabe destacar que la compañía STP mantuvo el liderato en el índice de regularidad desde el 2013; no obstante, en términos de



frecuencia siempre ocupó el segundo o tercer lugar. Este ítem se ha transformado en el próximo desafío a superar.

### Nuestro enfoque analítico llevado a un sistema computacional

Debido al crecimiento de la compañía STP, se hizo cada vez más complejo controlar la operación de manera exhaustiva y mantener los índices de calidad de servicio. Producto de lo anterior, la compañía decidió desarrollar un nuevo sistema computacional que le permitiera controlar, tanto la planificación y diseño de horarios, así como también la asignación de los buses en los distintos recorridos.

Este nuevo sistema computacional contempla cuatro módulos principales (Ver Figura 6). El Módulo Información de Entrada contiene la base de datos del sistema, o sea la información relacionada a los recorridos, tales como los buses; tiempos de viaje y distancias; costo de operación; capacidades; choferes; esquemas de turnos, entre otros, datos que son relevantes para la resolución del problema. El Módulo Analytics cuenta con el código fuente que detalla nuestro enfoque de solución y resuelve el modelo de programación lineal entera mixta. Este modelo entrega el diseño de horarios y asignación de buses de manera óptima. En tanto, el Módulo Reportes genera una serie de vistas, gráficos y tablas de distintos indicadores de la operación y negocio, los cuales permiten a los administradores verificar el

normal funcionamiento de la operación de buses. Finalmente, el Módulo Interfaz de usuario permite administrar y gestionar los módulos anteriormente descritos.

Este sistema computacional permite ingresar horarios de viaje comerciales y *deadhead*, que en la jerga de la operación se denominan despacho. Basado en nuestro enfoque, en cada fila, aparecen los horarios de despacho de las máquinas y el tipo de bus que debe salir a la ruta. Según este modelo, cada usuario asigna a cada despacho un conductor, bus y el horario de salida para realizar la ruta. En cada uno de ellos, existen puntos de control en la ruta (geocercas virtuales), las cuales se activan y registran la hora de paso del bus (Ver Figura 7). Con estos controles, se puede observar la regularidad de los buses, el tiempo de salida entre buses consecutivos; así como la diferencia existente entre el tiempo en que fue asignado el despacho y la hora real de salida (PC1).

Este sistema computacional se utilizó en modo marcha blanca desde el 24 de septiembre de 2016 hasta el 17 de abril de 2017, momento en que la programación comenzó a controlarse, según los datos ingresados en el sistema. En este caso, empezó a compararse la cantidad de despachos a realizarse en el día, generándose un reporte (Ver Figura 8), el cual se envía a los diferentes terminales. Luego de controlar los despachos ingresados al sistema (Ver Figura 8), estos aumentan considerablemente, oscilando entre 96% a 100% en cada terminal. Adicional a esto, los índices de ICF e ICR mostraron una clara tendencia al alza (Ver Figuras 9 y 10).

**FIGURA 6: MÓDULOS PRINCIPALES DEL SISTEMA COMPUTACIONAL IMPLEMENTADO POR STP S.A.**

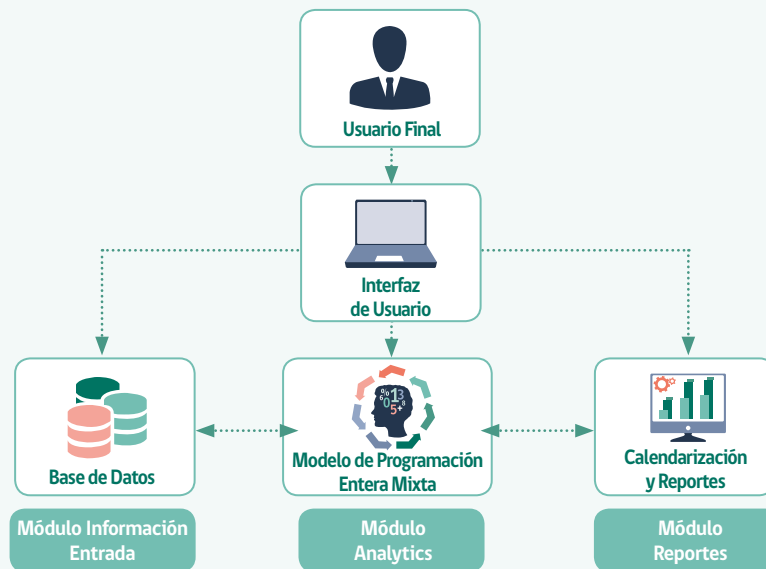


FIGURA 7: IMAGEN DEL SISTEMA COMPUTACIONAL EN LÍNEA DESARROLLADO PARA EL CONTROL DE LAS SALIDAS

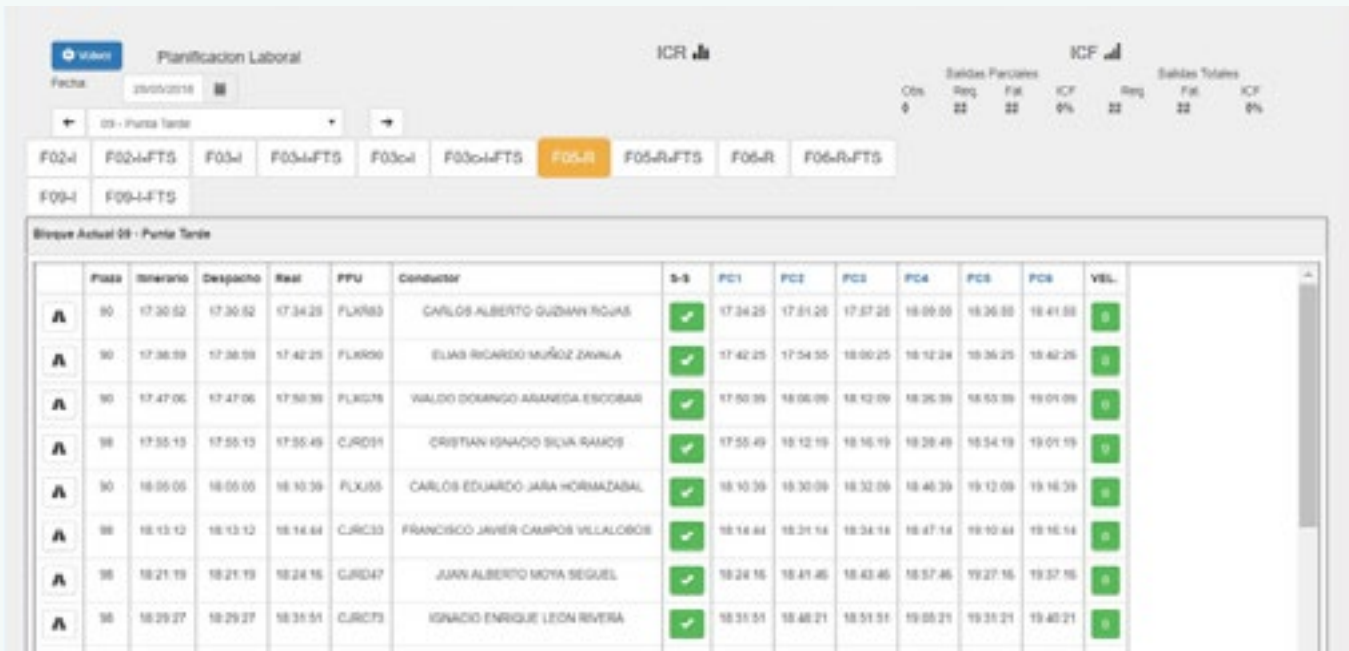


FIGURA 8: CONTROL DEL USO DEL SISTEMA DE DESPACHO

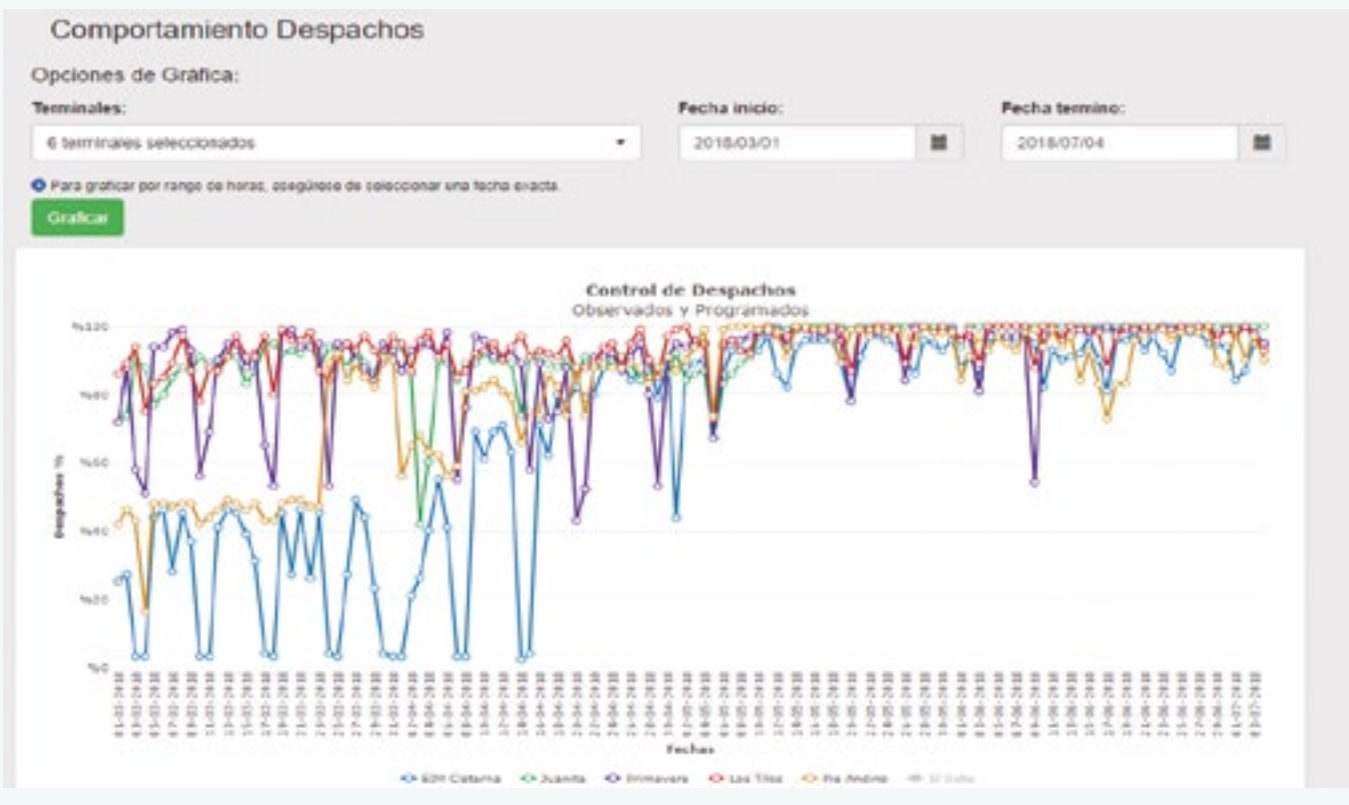


FIGURA 9: EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE FRECUENCIA ICR DE STP SANTIAGO

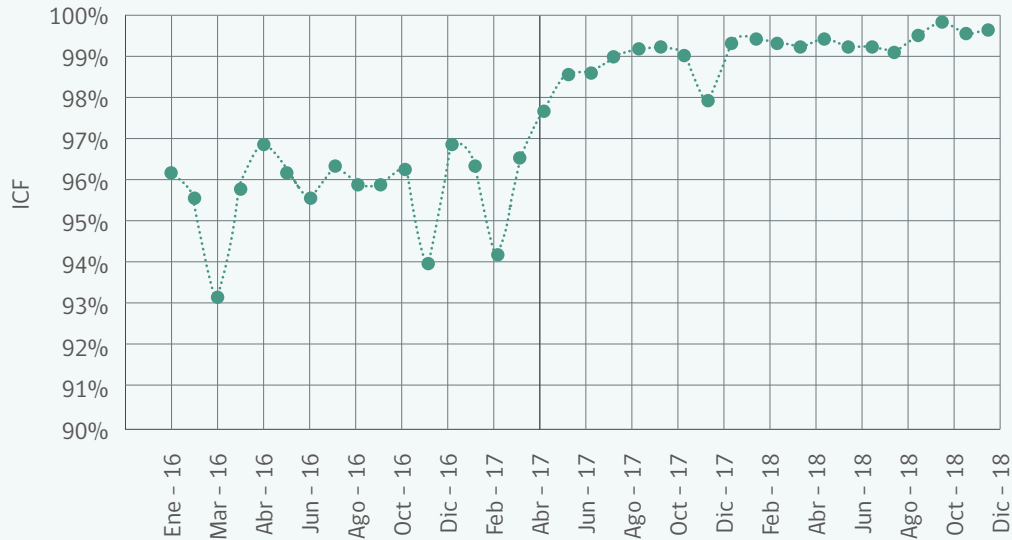
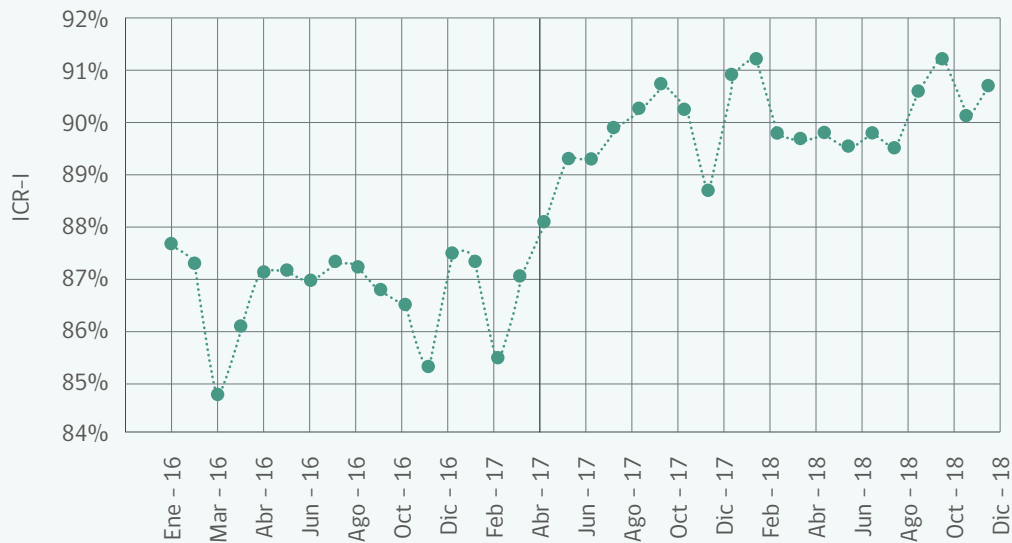


FIGURA 10: EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD ICR DE STP SANTIAGO



**Fruto del exitoso resultado de la operación, STP logró el año 2018 ser la primera compañía del sistema de transporte de Santiago en obtener los mejores resultados en términos de frecuencia y de regularidad, en todos los rankings de calidad de servicio elaborados por el DTPM.**

Fruto del exitoso resultado de la operación (Ver Figuras 9 y 10), STP logró el año 2018 ser la primera compañía del sistema de transporte de Santiago en obtener los mejores resultados en términos de frecuencia y de regularidad, en todos los rankings de calidad de servicio elaborados por el DTPM.

Adicional a esto, en octubre 2018 la empresa logró el más alto índice de cumplimiento de frecuencia en la historia del sistema, alcanzando un valor de 99,79% (Ver las Tablas 4 y 5, respectivamente). El listado de las empresas está ranqueado por la columna promedio anual en orden descendente. En ella, se aprecia que STP

lidera el cumplimiento de ICF e ICR, con un promedio anual de cumplimiento de 99,4% y 90,2%, respectivamente.

Finalmente, el 16 de febrero de 2019 STP asume la operación de los recorridos 102, 104, 112N y 114 de Alsacia, debido al cese de la concesión de esta última empresa por rendimientos deficientes. Con la incorporación de estos recorridos, la empresa suma 111 máquinas, alcanzando una flota base de 548 buses en la actualidad. Esta nueva inversión de la compañía busca aumentar la cobertura de los recorridos para entregar un servicio de calidad a los usuarios del transporte público de la ciudad de Santiago.

**TABLA 4: INDICADORES MENSUALES DE ICF DEL AÑO 2018**

Ranking	Empresas	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio anual
1	<b>STP</b>	99,3%	99,4%	99,3%	99,2%	99,4%	99,2%	99,2%	99,1%	99,5%	99,8%	99,5%	99,6%	99,4%
2	<b>Metbus</b>	99,0%	99,2%	98,8%	98,9%	99,2%	99,0%	99,2%	99,2%	99,1%	99,2%	99,1%	98,7%	99,0%
3	<b>Redbus</b>	98,7%	98,2%	97,9%	97,4%	97,4%	96,7%	97,6%	97,5%	97,0%	97,7%	98,0%	97,8%	97,6%
4	<b>Vule</b>	96,9%	96,2%	96,4%	97,0%	96,9%	96,5%	97,4%	97,4%	96,8%	97,5%	97,6%	96,8%	97,0%
5	<b>Subus</b>	95,3%	95,2%	93,2%	93,1%	93,7%	90,8%	92,2%	92,5%	91,0%	90,8%	90,8%	90,8%	92,4%
6	<b>Express</b>	94,6%	93,0%	89,2%	91,0%	91,2%	90,2%	92,3%	93,1%	92,2%	91,6%	90,7%	89,9%	91,6%
7	<b>Alsacia</b>	92,8%	91,3%	88,9%	90,4%	91,1%	89,6%	90,8%	90,3%	90,4%	89,7%	86,1%	82,0%	89,4%

Fuente: DTPM.

**TABLA 5: INDICADORES MENSUALES DE ICR DEL AÑO 2018**

Ranking	Empresas	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio anual
1	<b>STP</b>	90,9%	91,2%	89,8%	89,7%	89,8%	89,5%	89,8%	89,5%	90,6%	91,2%	90,1%	90,7%	90,2%
2	<b>Metbus</b>	88,2%	88,1%	87,2%	87,1%	87,5%	87,5%	88,1%	87,4%	87,8%	87,4%	87,3%	86,6%	87,5%
3	<b>Redbus</b>	85,3%	85,1%	82,9%	82,3%	82,8%	82,1%	83,2%	82,9%	83,0%	83,2%	83,8%	84,3%	83,4%
4	<b>Vule</b>	83,8%	82,6%	82,6%	82,9%	82,9%	82,9%	84,3%	83,5%	83,5%	84,1%	83,8%	83,7%	83,4%
5	<b>Express</b>	83,6%	82,5%	79,6%	80,3%	80,3%	79,0%	81,0%	81,3%	81,3%	80,7%	80,0%	79,5%	80,7%
6	<b>Subus</b>	79,9%	80,2%	79,4%	79,4%	79,8%	78,1%	79,1%	79,2%	78,4%	78,4%	77,9%	78,3%	79,0%
7	<b>Alsacia</b>	80,5%	79,9%	78,0%	78,6%	79,5%	78,3%	79,5%	78,4%	78,6%	78,0%	75,7%	72,9%	78,2%

Fuente: DTPM.

## Conclusiones y Comentarios Finales

Este trabajo ha tenido como objetivo presentar un enfoque analítico basado en un modelo de optimización que fue incorporado dentro de un sistema computacional, el cual permitió mejorar la eficiencia de uno de los operadores del sistema de transporte público de Santiago.


La función de este sistema determina el diseño de horarios óptimo y la asignación de buses de la compañía, de manera integrada, para asegurar una mayor eficiencia y el correcto control de la planificación de buses. Para la empresa, resulta esencial resolver de manera eficiente estas etapas del proceso de planificación de transporte. De esta manera, se pueden satisfacer los requerimientos de frecuencia y regularidad -asociados a los índices de calidad-, establecidos en los contratos.

Este enfoque propuesto incorpora la decisión del diseño de horarios, asignación y programación de buses utilizando una estructura *ad hoc* de red expandida en el tiempo, transformándose en una propuesta novedosa. Nuestro enfoque es lo suficientemente flexible como para adaptarse a los distintos requerimientos de las empresas, en cuanto a los niveles de capacidad de transporte, frecuencia y tiempos de viaje en varios periodos de tiempo, tanto en rutas comerciales como en *deadhead*.

En términos concretos, el uso de sistemas computacionales basados en enfoques analíticos permitió a STP mejorar de manera considerable y sostenida en el tiempo sus indicadores de calidad del servicio. Desde el año 2012 a la fecha, esta empresa pasó de estar en la zona baja del *ranking* a liderarlo en los últimos dos años. Esta mejora, además, le permitió aumentar la cobertura de recorridos en la Región Metropolitana.

Es importante mencionar que el éxito de esta iniciativa se debe a dos factores fundamentales. El primero corresponde a la calidad de la solución obtenida en el Módulo Analytics y, el segundo tiene que ver con el conjunto de reportes que se pueden extraer del sistema, los cuales permiten visualizar, sobre la base de los indicadores calculados en el Módulo Reportes, las alternativas de rutas disponibles. Para la empresa, esta información es clave, puesto que puede gestionar de mejor manera los recursos.

También, gracias a la incorporación del sistema computacional se modificó la manera en que la compañía llevaba su operación por más de nueve años, obteniendo beneficios considerables producto de la aplicación de este sistema. Estos se tradujeron

en la entrega de una mejor calidad de servicio a los usuarios y a que la compañía logró implementar un plan operacional eficiente, reduciendo sus costos por incumplimiento de los índices ICF e ICR. En este punto, se debe recalcar que STP el año 2018 logró ser la compañía con los mejores índices de frecuencia y regularidad en todos los *rankings* de calidad de servicio. Ninguna empresa del Transantiago lo había logrado hasta ahora. 



**Es importante mencionar que el éxito de esta iniciativa se debe a dos factores fundamentales.**

**El primero corresponde a la calidad de la solución obtenida en el Módulo Analytics y, el segundo tiene que ver con el conjunto de reportes que se pueden extraer del sistema, los cuales permiten visualizar, sobre la base de los indicadores calculados en el Módulo Reportes, las alternativas de rutas disponibles.**

## Referencias

- Banihashemi, M. and Haghani, A. (2000).** Optimization model for large-scale bus transit scheduling problems. *Transportation Research Record*, Issue Number 1733, pp. 23-30.
- Ceder, A. and Tal, O. (2001).** Designing synchronization into bus timetables. *Transportation Research Record*, 1760, 3-9.
- Ceder, A., Golany, B., Tal, O., 2001.** Creating bus timetables with maximal synchronization. *Transportation Research Part A* 35, 913-928.
- Ceder, A., (2002)** Urban transit scheduling: framework, review and examples. *J. Urban Plann. Dev.*, 128(4), 225-244.
- Ceder, A., (2002).** A step function for improving transit operations planning using fixed and variable scheduling. In *Transportation and Traffic Theory* (M. A. P. Taylor, ed.), pp. 1-21, Elsevier Ltd.
- Ceder, A., (2005).** Estimation of fleet size for variable bus schedules. *Transportation Research Record*, 1903, 3-10.
- Chien, S. and Schonfeld, P. (1998)** Joint Optimization of a Rail Transit Line and its Feeder Bus System. *Journal of Advanced Transportation*, 32(3), 253-284.
- Chowdhury, S.M. and Chien, S. (2001)** Intermodal Transit System Coordination. *Transportation Planning and Technology*, 25(4), 257-287.
- Cordeau J-F, Laporte G, Mercier A (2001)** A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *Journal of the Operational Research Society* 52: 928- 936.
- Daduna, J. R. and Paixao, J. M. P. (1995).** Vehicle scheduling for public mass transit, an overview. In *Computer-Aided Transit Scheduling*, (J. R. Daduna, I. Branco and J. M. P. Paixao, eds), pp. 76-90, Springer-Verlag.
- Dell Amico, M., Fischett, M. and Toth, P. (1993).** Heuristic algorithms for the multiple depot vehicle scheduling problem, *Management Science*, 39(1), 115-123.
- Forbes, M.A., Holt, J.N., Watts, A.M., (1994).** An exact algorithm for multiple depots bus scheduling. *European Journal of Operational Research* Vol. 72, 115-124
- Haghani, A., Banihashemi, M. (2002).** Heuristic approaches for solving large-scale bus transit vehicle scheduling problem with route time constraints. *Transportation Research* Vol. 36A, 309-333.
- Haghani, A., Banihashemi, M., Chiang K.H. (2003).** A comparative analysis of bus transit vehicle scheduling models. *Transportation Research* Vol. 37B, 301-322.
- Hane, C. A., Barnhart, C., Johnson, E. L., Marsten, R., Nemhauser, G. L. and Sigismondi, G., (1995)** The Fleet Assignment Problem: Solving a Large-Scale Integer Program. *Mathematical Programming Study*, Vol. 70, pp. 211-232.
- Hastie, T., Tibshirani R., y Friedman, J. (2001),** *The Elements of Statistical Learning*, Springer.
- Klemt, W. D. and Stemme, W. (1988).** Schedule synchronization for public transit networks. In *Computer-Aided Transit Scheduling* (J. R. Daduna and A.Wren, eds), pp. 327-335, *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 308, Springer-Verlag.
- Kliwer, N., T, Mellouli, L. Suhl. (2006).** A time-space network based exact optimization model for multi-depot bus scheduling. *Eur. J. Oper. Res.* 175(3) 1616-1627.
- Kliwer, N., Steizen, I., Gintner, V., Suhl, L. (2010).** A time-space network approach for the integrated vehicle and crew scheduling problem with multiple depots. *Transportation Science* Vol. 44, 367-382
- Kwan, R. S. K. and Rahin, M. A. (1999).** Object oriented bus vehicle scheduling-the BOOST system. In *Computer-Aided Transit Scheduling. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 471 (N. H. M. Wilson, ed.), pp. 177-191, Springer-Verlag.
- Mesquita, M. and Paixão, J. M. P. (1999).** Exact algorithms for the multi-depot vehicle scheduling problem based on multicommodity network flow type formulations. In *Computeraided Transit Scheduling. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 471 (N. H. M. Wilson, ed.), pp. 221-243, Springer-Verlag.
- Pepin, A., Desaulniers, G., Hertz, A., and Huisman, D. (2006).** Comparison of Heuristic Approaches for the Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem. *Odysseus*, Altea, Spain.
- Schneider J.B., Smith S.P. (1981),** Redesigning urban transit system: a transit-center-based approach, *Transportation Research Record* 798, 56-65.
- Ting, C. and Schonfeld, P. (2005).** Schedule Coordination in a Multiple Hub Transit Network. *J. Urban Plann. Dev.* 131, Special Issue: Urban Public Transportation world review: challenges and innovations, 112-124.
- Transantiago (2012),** Página Web <http://www.transantiago.cl>
- Coordinación Transantiago (2010),** Metodología de cálculo de velocidades por servicio, disponible en <http://www.dtpm.gob.cl/descargas/archivos/Doc>.
- Tirachini A., C.E. Cortés (2006).** La estrategia Deadheading en Corredores de Transporte Público, Actas del XIV Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, Las Palmas de Gran Canaria, España, 20-23 septiembre 2006.
- Wirasinghe, S. C. (2003).** Initial planning for an urban transit system. In *Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning* (W. Lam and M. Bell, eds), pp. 1-29, Elsevier Ltd.