



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**PROGRAMACIÓN DEL HORARIO DE SALIDAS Y ASIGNACIÓN DE
BUSES PARA UN ALIMENTADOR DEL TRANSANTIAGO**

*TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL*

DIEGO MAXIMILIANO MUÑOZ CARRASCO

PROFESOR GUÍA :

SR. CRISTIAN E. CORTÉS CARRILLO

PROFESOR CO-GUÍA :

SR. PABLO A. REY SOSA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

SR. RICHARD WEBER HAAS

SR. JAIME MIRANDA PINO

SANTIAGO DE CHILE

MAYO 2014

PROGRAMACIÓN DEL HORARIO DE SALIDAS Y ASIGNACIÓN DE BUSES PARA UN ALIMENTADOR DEL TRANSANTIAGO

Una gran parte de la población de Santiago de Chile se moviliza en sistemas de transporte público para realizar sus actividades cotidianas (o imprevistas), consumiendo tiempos de viaje que resultan ser en muchos casos significativos respecto del tiempo disponible; por lo tanto, la calidad que ofrecen estos servicios juega un rol fundamental en la calidad de vida de las personas. El sistema de transporte público en Santiago, denominado Transantiago, es un organismo del Estado que administra los recursos y fiscaliza la prestación de servicios.

En el problema de planificación de un sistema de transporte público existen cuatro etapas a resolver, las cuales son diseño de recorridos, determinación de horarios de viaje, asignación de buses y asignación de conductores. En los contratos de concesión, existen restricciones de calidad de servicio que impone la autoridad a los operadores, las que corresponden a regularidad, rangos de frecuencia y capacidad de transporte, donde esta última no permite resolver la determinación de horarios de viaje y asignación de buses por separado, ya que al haber varios tipos de buses no se sabe de antemano cuál es el más conveniente de utilizar.

En este trabajo se resuelven las etapas de la determinación de horarios de viaje y asignación de buses, para el concesionario STP Santiago. La formulación propuesta para resolver el problema es un modelo lineal entero mixto, con el cual se relaciona la decisión de la determinación de 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 periodos donde existe mayor demanda en una ruta del servicio.

La estrategia de *deadheading* redujo el tamaño de la flota necesaria hasta en un 9%, comparado al caso de no utilizarla. Al implementar los resultados, se obtuvo un aumento del cumplimiento de los viajes exigidos de 2.8% en punta mañana y 5.6% en punta tarde, y un aumento en la regularidad de 7.5% en punta mañana y 11.4% en punta tarde. Las multas por frecuencia y regularidad se redujeron en un 50% y en los ranking de calidad de servicio generados por la autoridad, STP se posicionó dentro de los primeros lugares.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Metodología a utilizar	5
1.2. Objetivos del trabajo	6
1.3. Estructura de la Tesis	7
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	8
2.1. Problema de planificación del transporte público	8
2.1.1. Diseño de la red de servicios de transporte público.	9
2.1.2. Determinación de horarios de viaje o Timetabling.	9
2.1.3. Asignación de buses.	10
2.1.4. Asignación de conductores.	10
2.2. Estado del Arte	11
3. FORMULACIÓN PROPUESTA PARA EL TIMETABLING Y ASIGNACIÓN DE BUSES	26
3.1. Formulación del modelo y enfoque de solución	26
3.1.1. Red expandida en el tiempo para la planificación de viajes	27
3.2. Formulación I	30

3.2.1.	Conjuntos	30
3.2.2.	Parámetros del modelo	33
3.2.3.	Variables del modelo	34
3.2.4.	Restricciones	35
3.2.5.	Función Objetivo	40
3.2.6.	Resumen formulación I	41
3.2.7.	Consideraciones	42
3.3.	Formulación II	42
3.3.1.	Parámetros del modelo	43
3.3.2.	Variables del modelo	44
3.3.3.	Restricciones	45
3.3.4.	Función Objetivo	47
3.3.5.	Resumen formulación II	48
3.3.6.	Consideraciones	49
3.4.	Formulación III	49
3.4.1.	Conjuntos	53
3.4.2.	Parámetros, Variables y Función Objetivo	54
3.4.3.	Restricciones	54
3.4.4.	Resumen formulación III	58
3.5.	Estimación de parámetros	59
3.5.1.	Parámetros de capacidad de transporte a ofertar	59
3.5.2.	Parámetro de tiempo de viaje	62
3.6.	Procedimiento de asignación de viajes a buses	68

4. CASO DE ESTUDIO	70
4.1. Descripción de la Unidad de Negocio 7	70
4.1.1. Particularidades del terminal Juanita	72
4.2. Tamaño de las instancias	76
4.2.1. Formulación I	76
4.2.2. Formulación II	77
4.2.3. Formulación III	78
4.3. Resolución de los modelos	79
4.3.1. Resultados Formulación I	80
4.3.2. Resultados Formulación II	82
4.3.3. Resultados Formulación III	85
4.3.4. Cálculo de tiempos de viaje rutas <i>deadheading</i>	85
4.4. Análisis de resultados	91
4.4.1. Sensibilidad del tamaño de flota respecto a la velocidad de <i>deadheading</i>	93
4.5. Caso terminal Pie Andino	95
5. APLICACIÓN TECNOLÓGICA DEL MODELO PROPUESTO	96
5.1. ICF por servicio sentido	97
5.2. ICR por servicio sentido	97
5.3. Intervalo óptimo de la próxima salida	99
5.4. Intervalo óptimo de las próximas n salidas	101
5.5. Implementación herramienta computacional	104
5.6. Implementación del itinerario programado por bus	105

5.7. Implementación real	108
5.8. Rendimientos operacionales	110
6. CONCLUSIONES	116
BIBLIOGRAFÍA	119
A. ANEXOS	123
A.1. Anexo 1	123
A.2. Anexo 2	124
A.3. Anexo 3	125
A.4. Anexo 4	126
A.5. Anexo 5	126
A.5.1. Obtención de información por Servicio	127

Índice de tablas

2.1. Variables del modelo propuesto por Forbes et al. (1994).	16
2.2. Parámetros del modelo propuesto por Forbes et al. (1994).	17
2.3. Variables del modelo propuesto por Haghani y Banihashemi (2002).	21
2.4. Parámetros del modelo propuesto por Haghani y Banihashemi (2002).	22
3.1. Conjuntos de índices del modelo.	30
3.2. Intervalos horarios para el tipo de día laboral.	32
3.3. Parámetros del modelo de programación y asignación de vehículos.	33
3.4. Variables del modelo de diseño de programación y asignación de vehículos.	34
3.5. Parámetros del modelo de programación y asignación de vehículos.	43
3.6. Variables del modelo de diseño de programación y asignación de vehículos.	44
3.7. Conjuntos de índices del modelo III.	53
4.1. Número de servicios asignados a cada terminal.	71
4.2. Número de buses por tipo en cada terminal.	72
4.3. Servicios y su porcentaje de participación sobre el total de transacciones.	72
4.4. Variables operacionales de los servicios del terminal Juanita.	75
4.5. Cantidad de variables Formulación I.	76

4.6. Cantidad de restricciones Formulación I.	77
4.7. Cantidad de variables Formulación II.	77
4.8. Cantidad de restricciones Formulación II.	78
4.9. Cantidad de variables Formulación III.	78
4.10. Cantidad de restricciones Formulación III.	79
4.11. Diseño de flota para la Formulación I para una instancia de 2 servicios.	81
4.12. Extracto de la programación del bus 6 del servicio F12.	81
4.13. Comparación del tamaño de la Formulación I y II.	82
4.14. Diseño de flota para la Formulación II.	82
4.15. Kilometraje asociado a la solución de la Formulación II.	82
4.16. Diseño de flota para la Formulación III.	86
4.17. Comparación del diseño de flota para la Formulación II y III.	86
4.18. Kilometraje asociado a la solución de la Formulación III.	87
4.19. Extracto del detalle de programación de la flota.	90
4.20. Comparación al resolver instancia F12 y F12C.	91
4.21. Comparación resultado de variables X activas para servicio F12C.	91
4.22. Diseño de flota para el terminal Pie Andino.	95
5.1. Número de buses en cada terminal post-negociación.	108
5.2. Diferencia de rendimientos de frecuencia entre periodos punta mañana y tarde.	110
5.3. Diferencia de rendimientos de regularidad entre periodos punta mañana y tarde.	112
A.1. Intervalos horarios para tipo de día sábado y domingo.	124
A.2. Tiempo de viaje para cada servicio, ruta y periodo del terminal Juanita.	125

A.3. Costo variable por kilómetro y tipo de bus 126

Índice de figuras

1.1.	Plano original, del sistema Transantiago. Fuente: Transantiago	2
1.2.	Esquema de remuneración del sistema original del Transantiago.	2
1.3.	Plano actual, del sistema Transantiago. Fuente: Transantiago.	3
1.4.	Esquema de remuneración del sistema actual de Transantiago.	4
2.1.	Etapas de planificación de las operaciones en una empresa de transporte. . .	8
2.2.	Ejemplo de un servicio F13C del Terminal Juanita.	9
2.3.	Red correspondiente a la formulación de Forbes et al. (1994).	18
2.4.	Red correspondiente a la formulación de Haghani y Banihashemi (2002). . .	22
3.1.	Red expandida en el tiempo para un terminal d y un bus b	28
3.2.	Visualización de un servicio.	29
3.3.	Trayectorias asociadas a conjuntos $R^+(s)$ y $R^-(s)$	31
3.4.	Horas continuas para el intervalo de operación Punta Mañana.	32
3.5.	Conservación en nodo terminal.	36
3.6.	Relación entre variable X_{srb}^t con I_{dsrb}^t e IM_{dsrb}^t	37
3.7.	Red expandida en el tiempo: conservación en nodos de viaje.	38
3.8.	Demanda promedio por media hora del servicio F05 en Junio 2012.	50

3.9. Ruta de tránsito y ruta de deadheading.	51
3.10. Paradas servicio sentido F05-I.	51
3.11. Visualización de un servicio.	52
3.12. Trayectorias asociadas a conjuntos de rutas.	53
3.13. Conservación en nodo terminal.	55
3.14. Conservación en nodos de viaje.	57
3.15. Regresión Kernel sobre una muestra de datos.	60
3.16. Estimación de la demanda, periodo julio-diciembre 2012	61
3.17. Diferencias en la transmisión.	63
3.18. Ejemplo del reporte Registros de paso por punto de control.	63
3.19. Ejemplo del reporte Detalle condiciones matriz PPU servicio-sentido.	64
3.20. Bitácora de eventos exógenos de STP.	64
3.21. Tiempo muerto.	65
3.22. Tiempo de viaje servicio F03 (+), periodo julio-diciembre 2012.	65
3.23. Suavización del tiempo de viaje F03 (+), periodo julio-diciembre 2012.	66
3.24. Suavización del tiempo de viaje F03 (-), periodo julio-diciembre 2012.	66
3.25. Tiempo de viaje lineal entre medias horas.	67
3.26. Flujo del procedimiento de asignación de viajes a buses.	68
4.1. Terminales pertenecientes a STP SANTIAGO en la comuna de Puente Alto.	71
4.2. Salidas por bloque horario para un día Laboral, P.O. válido hasta el 16/06/2013.	73
4.3. Mapa servicios de Juanita.	74
4.4. Capacidad de Transporte periodo Punta Mañana para Formulación II.	83

4.5. Capacidad de Transporte periodo Punta Tarde para Formulación II.	83
4.6. Frecuencia periodo Punta Mañana para Formulación II.	84
4.7. Frecuencia periodo Punta Tarde para Formulación II.	84
4.8. Costos operacionales de una empresa de Transporte Público.	87
4.9. Capacidad de Transporte periodo Punta Mañana para Formulación III.	88
4.10. Capacidad de Transporte periodo Punta Tarde para Formulación III.	88
4.11. Frecuencia periodo Punta Mañana para Formulación III.	89
4.12. Frecuencia periodo Punta Tarde para Formulación III.	89
4.13. Comparación de viajes, solución empresa y modelo.	90
4.14. Simetría del modelo por efecto de los <i>headways</i>	92
4.15. Buses requeridos para cada instancia.	94
5.1. Próxima salida en intervalo óptimo.	99
5.2. Intervalos óptimos para las próximas n salidas.	101
5.3. Herramienta ICF-ICR online.	104
5.4. Programación de buses servicio F03C.	105
5.5. Operación real F03C entre 17:33-17:55.	106
5.6. Operación real F03C entre 18:04-18:41.	107
5.7. Evolución rendimiento indicador Frecuencia para terminal Juanita.	110
5.8. Comparación con ICF PMA promedio del sistema periodo Abril-Junio 2013.	111
5.9. Comparación con ICF PTA promedio del sistema periodo abril-junio 2013.	111
5.10. Evolución rendimiento indicador Regularidad para terminal Juanita.	112
5.11. Comparación ICF punta mañana.	113

5.12. Comparación ICR-I punta mañana.	114
5.13. Comparación ICF punta tarde.	114
5.14. Comparación ICR-I punta tarde.	115
5.15. Evolución descuentos contractuales de frecuencia y regularidad.	115
A.1. Mecanismo de triada. Fuente: Transantiago.	127

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El transporte público representa un rol fundamental en el desarrollo de la vida de los habitantes de la Región Metropolitana, ya que constituye el principal modo de transporte para trasladar a la mayor parte de la población para realizar sus actividades diarias, con un promedio de demanda de 144 millones de viajes por mes¹ considerando los viajes obtenidos por Metro en conjunto con buses en servicios Troncales y Alimentadores.

El sistema actual de transporte público en la capital de Santiago de Chile denominado Transantiago, ha tenido como misión implementar un sistema de transporte moderno, eficiente, integrado y con un buen nivel de servicio. Comenzó a operar el 10/02/2007 y dada su drástica forma de implementación ha sido punto de duras críticas desde el comienzo.

Esta tesis se inicia en agosto del año 2011, con un sistema operando ya por 4 años. En octubre del año 2011, se inició un nuevo proceso de licitación el cual culminó en diciembre del 2011, entrando en vigencia el primer semestre del año 2012 y transformando por ende la estructura del mercado. En el anterior contrato, los recorridos fueron divididos en 5 servicios troncales y 6 servicios alimentadores siguiendo una clasificación con base operacional como se muestra en la Figura 1.1, contando en total con 11 empresas del sector privado. La idea de este esquema fue ordenar el sistema de transporte público y eliminar la competencia entre operadores que existía con el sistema original de “micros amarillos”.

¹Dato obtenido de las transacciones reportadas por AFT, incluye los meses de Marzo a Octubre 2012.

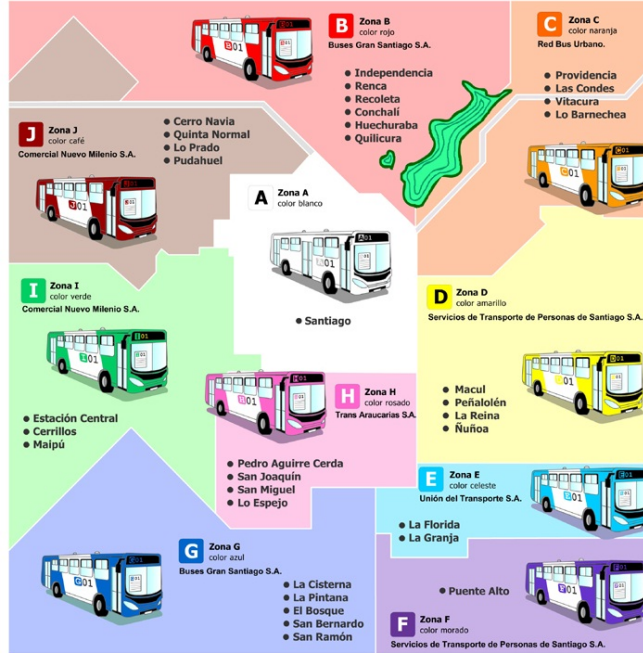


Figura 1.1: Plano original, del sistema Transantiago. Fuente: Transantiago

STP Santiago S.A. operó de forma permanente en este período de concesión la zona D con un terminal y 20 servicios, mientras que la zona F con 3 terminales y 27 servicios.

En este contrato, los ingresos percibidos por los concesionarios se desglosaban en una parte fija relacionada con el *plan operacional*², asociado a los kilómetros recorridos; y una parte variable correspondiente a los pasajeros transportados; ambos valores como se observa en la Figura 1.2 se multiplicaban por el índice ICPKH, el cual mide el cumplimiento de las Plazas-Kilómetros-Hora ofrecidas en función de las programadas. Un aspecto importante de este contrato es que la parte fija asociada a los kilómetros recorridos, correspondía a un 70 % de los ingresos percibidos por los concesionarios.

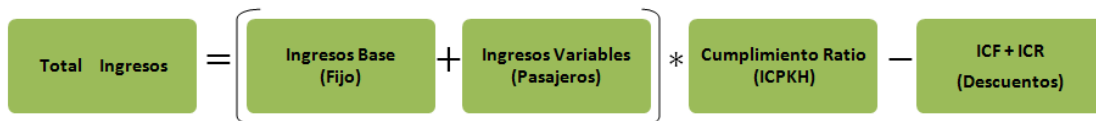


Figura 1.2: Esquema de remuneración del sistema original del Transantiago.

²El término Plan Operacional (P.O.) se define en la sección 2.1.2.

En cuanto a los descuentos, estos se basaban por incumplimientos en los indicadores de frecuencia (ICF) y regularidad (ICR)³, siendo fiscalizados en terreno desde la salida del terminal y considerando una muestra del orden del 5 % de todos los servicios-sentido-período afectos a multa.

Lo anterior cambia de forma radical con la entrada en vigencia del nuevo contrato en el año 2012. La estructura del sistema se reduce a solo 7 empresas como se observa en la Figura 1.3, donde STP obtuvo la concesión de la zona F exclusivamente.

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 Metropolitana	500	J		
Unidad N°6	 Recorridos Red Bus Urbano		B	C	
Unidad N°7	 Recorridos STP Santiago		F		

Figura 1.3: Plano actual, del sistema Transantiago. Fuente: Transantiago.

Este nuevo esquema pone énfasis en mejorar la calidad de servicio al usuario. Sus puntos centrales son los siguientes:

- Fin de la exclusividad del uso de las vías.
- Mejorar el diseño de los recorridos, enfocándose a disminuir la cantidad de transbordos.
- Mayor fiscalización a los operadores.
- Calidad de servicio como foco del sistema de transporte.

El sistema de pago continúa con una parte fija y otra variable. La parte variable corresponde a las transacciones obtenidas por el concesionario de forma mensual, pagando un

³La metodología de cálculo de estos indicadores se define en la sección 5.1 y 5.2.

valor fijo llamado PPT por cada pasajero transportado; la parte fija esta relacionada con el plan operacional, la cual básicamente está asociada a los kilómetros recorridos, pagando un valor fijo por kilómetro llamado PK, donde tal parte fija tal como se observa en la Figura 1.4 se multiplica por el índice ICT, el que mide el cumplimiento de Plazas-Kilómetros-Hora ofrecidas en función de las programadas a nivel unidad.

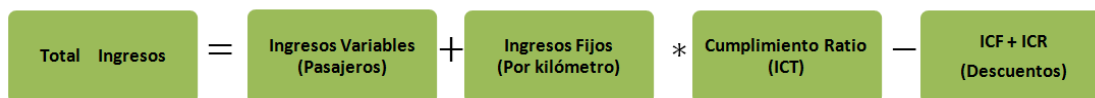


Figura 1.4: Esquema de remuneración del sistema actual de Transantiago.

El nuevo sistema tiene 2 cambios profundos respecto de la propuesta anterior. El primero consiste en que el 70 % de los ingresos que antes correspondían al ingreso base ponderado por el nivel de cumplimiento de ICPKH ahora corresponde a las personas que pagan al utilizar el sistema. Es decir, el problema de la evasión se le traspasa directamente al operador, tal como ocurría en el sistema de “micros amarillos” previo al año 2007. El segundo cambio corresponde a las modificaciones en la estructura de los sistemas de multas y descuentos, donde existirán sanciones sobre el incumplimiento de cualquiera de las obligaciones asumidas por el operador en el contrato de concesión. Particularmente los cambios más drásticos son sobre los indicadores ICF e ICR, los cuales se desagregan en capas y son medidos en cada servicio-sentido-período-tipo día; la definición de cada capa se encuentra en el Anexo A.1.

Considerando el escenario de operación desde junio a diciembre del año 2012, la suma de descuentos (ICF+ICR) pagados por STP ascienden a 1.111.774 (USD), siendo en promedio 158.536 (USD) mensuales, equivalentes a un 4 % de los ingresos aproximadamente. Lo anterior se genera por que la empresa no posee una herramienta que permita diseñar un adecuado plan operacional, por lo que no puede dimensionar de manera correcta la flota mínima necesaria para operar. Como consecuencia, el número de buses necesarios para lograr cumplir en los horarios de mayor exigencia es muy superior al exigido por su planificación, generando costos adicionales que no se encuentran cubiertos en la estructura de precios⁴.

⁴Cada bus de la flota Base tiene asociado una participación en el PPT de la Unidad.

La motivación de esta Tesis surge debido al mal dimensionamiento de la flota requerida para la operación, lo cual tiene como repercusión altos descuentos asociados a los indicadores ICF e ICR y una deficiente calidad de servicio entregada a los usuarios. Por lo tanto, con una adecuada planificación operacional se conseguirá una mejor prestación de servicio, para así evitar costosas multas que podrían llevar a la empresa eventualmente a la quiebra.

1.1. Metodología a utilizar

La utilización de modelos de optimización, permiten reducir el tiempo en explorar diferentes instancias de parámetros para una formulación, logrando así encontrar escenarios en los cuales se puede operar de forma más eficiente que la manera actual. Para lograr esto, es necesario representar el problema como un modelo de optimización, por lo que es necesario conocer a cabalidad el problema que enfrenta la empresa. La metodología a utilizar para resolver el problema será la siguiente:

Definición del problema. Se presenta detalladamente el problema general de planificación de las operaciones que enfrenta el transporte público. Se recolecta información de los requerimientos y exigencias que enfrenta la empresa, con lo cual se pueden identificar los puntos críticos de la operación e investigar medidas que permitan mejorar el desarrollo de las etapas del proceso de planificación.

Construcción del modelo. Se desarrolla un modelo de programación lineal entero, con las restricciones operativas que presenta la empresa, en conjunto con las impuestas por la autoridad, tales como rangos de frecuencia y capacidad, donde estas últimas no permiten resolver las etapas del diseño de horarios de forma independiente a la asignación de buses.

Resolución del modelo. Se define el valor de los parámetros involucrados en el modelo planteado, desarrollando para esto metodologías para estimar el tiempo de viaje y la demanda, parámetros claves para obtener un buen dimensionamiento de la flota y su asignación.

Ajustes del modelo. Se estudia la capacidad del modelo para resolver el problema. Considerando su complejidad, se decide modificar la formulación de manera de reducir tan-

to el número de variables como restricciones y además eliminar la simetría del problema producto de buses con características idénticas.

Control del modelo. Se analiza la posibilidad de generar cambios, en beneficio de una solución mejor, donde se decide incluir al modelo una estrategia de control de flota y de este modo ajustar de manera más eficiente la oferta de transporte a la demanda.

1.2. Objetivos del trabajo

Objetivo General

- El objetivo general de esta Tesis es diseñar un modelo de programación entera mixta, que permita resolver las etapas de determinación de horarios de viaje y asignación de buses con aplicación en la operación del concesionario STP de Transantiago .

Objetivos Específicos

- Modelar el problema, utilizando un enfoque de programación entera mixta.
- Desarrollar metodologías para estimar los parámetros de tiempo de viaje y demanda.
- Resolver el problema para los terminales Juanita y Pie Andino, obteniendo el diseño de flota para cada terminal y el itinerario de operación para cada bus en el día.
- Desarrollar herramienta tecnológica que permita controlar en línea los resultados de la programación propuesta en la operación real de la empresa, a través de indicadores de cumplimiento de la cantidad de salidas y de la regularidad entre despachos.
- Implementar piloto de itinerario programado por bus en el sistema Sinóptico⁵.
- Analizar los beneficios cuantitativos y cualitativos de la solución propuesta.

⁵<http://www.sonda.com/gestion-de-flotas/>

1.3. Estructura de la Tesis

Esta Tesis se encuentra estructurada en seis capítulos: Introducción, Descripción del problema, Formulación propuesta para el timetabling y asignación de buses, Caso de estudio, Aplicación tecnológica del modelo propuesto y Conclusiones.

En el capítulo segundo se detalla el problema en estudio, presentando una descripción del proceso general de planificación de las operaciones del transporte público de buses. El capítulo finaliza con una revisión de las principales publicaciones en la literatura sobre las etapas de la determinación de horarios de viaje y asignación de buses.

En la primera parte del tercer capítulo se describe el enfoque de solución propuesto y luego las formulaciones matemáticas para resolver el problema. El capítulo finaliza con la presentación de metodologías para estimar los parámetros de tiempo de viaje y capacidad de transporte, además de un procedimiento para asignar viajes a los buses.

En el cuarto capítulo, se describe en detalle el caso de estudio a resolver. Luego se presentan los resultados obtenidos y se finaliza con el análisis de estos resultados.

El capítulo cinco, detalla la herramienta tecnológica desarrollada para lograr implementar los resultados obtenidos en la operación real de la empresa. Luego se presenta una comparación de los indicadores de operación previos y post implementación, finalizando con una comparación de las siete concesionarias del sistema en relación de los indicadores de calidad de servicio.

En el último capítulo se presentan las principales conclusiones del trabajo.

Capítulo 2

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el presente capítulo se realiza una descripción del proceso general de planificación de las operaciones del transporte público de buses, y particularmente se describe cómo STP se hace cargo de las etapas de planificación en la actualidad. Finalmente se exhibe el estado del arte para las etapas a resolver en esta Tesis, lo cual sirve de base para el desarrollo de los modelos propuestos, los que corresponden al diseño de horarios y asignación de buses.

2.1. Problema de planificación del transporte público

El proceso de planificación de las operaciones en una empresa de transporte público consta básicamente de 4 etapas de acuerdo a Ceder (2002,2007), las cuales como se observa en la Figura 2.1 conducen a un proceso secuencial.

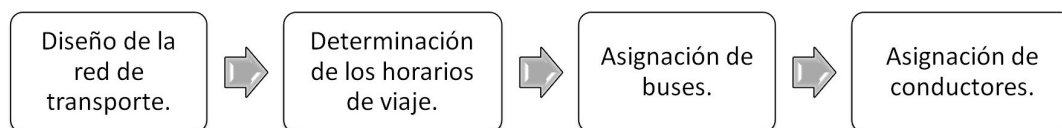


Figura 2.1: Etapas de planificación de las operaciones en una empresa de transporte.

A continuación se explica cada etapa del proceso de planificación:

2.1.1. Diseño de la red de servicios de transporte público.

Esta etapa corresponde al diseño de recorridos, a los cuales se les asigna una trayectoria; es decir, se define su trazado de circulación y los puntos en los cuales puede cargar y/o descargar pasajeros (paraderos). La Figura 2.2, ilustra en un mapa el recorrido de un servicio que contempla dos *cabezas*¹ (círculos de color verde) unidos a través de dos rutas (línea sólida azul y roja punteada), las cuales definen el sentido del viaje (desde o hacia el terminal).

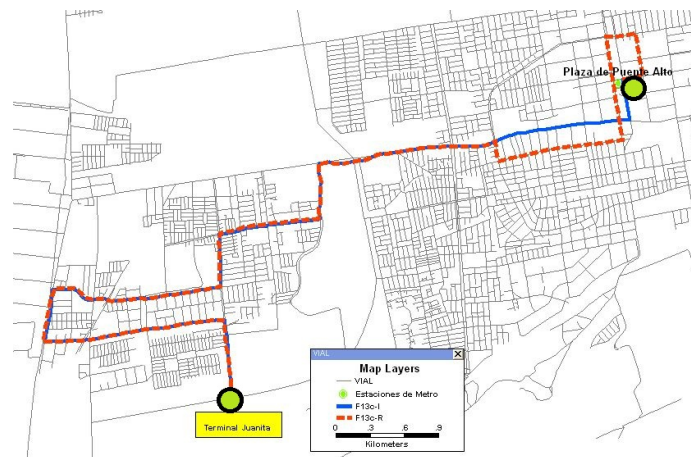


Figura 2.2: Ejemplo de un servicio F13C del Terminal Juanita.

Los recorridos ya están diseñados y establecidos, por lo que se conocen las distancias entre cabezas para cada servicio; sin embargo, los concesionarios pueden proponer nuevos servicios, fusiones de servicios o modificaciones mediante común acuerdo con Transantiago por motivos fundamentados, basando los criterios en un mejor servicio para los usuarios.

2.1.2. Determinación de horarios de viaje o Timetabling.

En esta etapa se debe decidir la hora de inicio en la cual un bus saldrá a realizar un determinado viaje por un servicio ruta, desde qué terminal se realizará ese viaje y además el tipo de bus con su respectiva plaza² que debe realizar el viaje. El resultado de esta etapa corresponde al itinerario del Programa Operacional (de ahora en adelante PO).

¹Un cabezal corresponde al punto de inicio o término de una ruta.

²El término plaza se utiliza para dimensionar la capacidad de transporte en cantidad de pasajeros.

En este punto es importante definir el concepto de *headway*, el que corresponde al tiempo entre viajes consecutivos por un mismo servicio desde un *cabecal* de inicio de una ruta.

Actualmente la empresa STP trata esta etapa de forma muy sencilla, obteniendo *headways* uniformes a través de la división del largo del bloque y la cantidad de salidas a realizar.

2.1.3. Asignación de buses.

En esta etapa se debe realizar la asignación de buses a los viajes establecidos en la etapa anterior, de manera de cumplirlos todos y realizando la asignación de forma de minimizar los costos fijos y/o variables. En esta etapa además se determina la flota mínima necesaria para cumplir el itinerario del PO propuesto, considerando los periodos más exigentes que corresponden a las puntas mañana y tarde.

Actualmente la empresa STP no posee una herramienta que permita obtener el itinerario de cada bus en el día. Solo obtiene la cantidad de buses requeridos por servicio, ruta y bloque horario, considerando para el cálculo la frecuencia multiplicado por el tiempo de viaje.

2.1.4. Asignación de conductores.

Una vez establecidos los itinerarios de viaje de los buses en la etapa anterior, es necesario asignar a estos viajes los conductores de forma tal de minimizar los costos y respetar las restricciones contractuales. Para ello se deben generar jornadas diarias de trabajo, indicando la secuencia de viajes a realizar, que permitan cubrir la totalidad de los viajes utilizando la menor cantidad posible de conductores. Finalmente las jornadas diarias se deben asignar para un horizonte de planificación mayor, respetando las restricciones contractuales de la jornada semanal de trabajo y días de descanso semanal, proceso conocido como *Rostering*.

Actualmente la empresa STP posee cuatro tipos de turnos los que corresponden a mañana, medio día, tarde y nocturno. Adicionalmente los conductores tienen jornadas semanales de seis días de trabajo y un día libre o cinco días de trabajo y dos días libres.

2.2. Estado del Arte

En la literatura especializada se encuentran diferentes enfoques para resolver cada una de las etapas del proceso de planificación de transporte público. Por lo general cada una de las etapas se resuelve de forma separada y en el orden de la Figura 2.1, donde los resultados de una etapa son utilizados como datos de entrada para la siguiente etapa.

Para el diseño de horarios, tanto métodos heurísticos como exactos han sido propuestos dependiendo del problema específico. De acuerdo a Ceder (1986), la creación de horarios para buses puede llegar a ser sencilla bajo el supuesto de *headways* y demanda uniforme. Los primeros modelos desarrollados por Newell (1971), Salzborn (1972), y Hurdle (1973a, 1973b) buscan la minimización del tiempo de espera de los pasajeros en una sola ruta. Sheffi y Sugiyama (1982) extienden el modelo a múltiples pares origen-destino, y luego Wirasinghe y Liu (1995) añaden el concepto de optimizar el horario de tiempos muertos en puntos intermedios de la ruta junto con minimizar los tiempos de espera y los costos de operación.

Los casos más difíciles que contemplan el diseño de horarios de viaje en el sistema de buses son aquellos en los cuales los horarios se intentan coordinar en ciertas paradas de transbordo, por lo que las transferencias deben estar bien sincronizadas. Inicialmente, se propusieron métodos para la sincronización en un solo punto, donde los tiempos muertos son optimizados a fin de minimizar la espera de los pasajeros (Salzborn, 1980; Hall, 1985; Klemm y Stemme, 1988). Knoppers y Muller (1995) también investigan posibles reducciones en el tiempo promedio de espera al considerar líneas que tienen que ser sincronizadas. También se encuentran algunos modelos analíticos que optimizan tanto los tiempos muertos como los *headways* de las rutas de conexión en las estaciones de transferencia (Schonfeld, 1991; Chien y Schonfeld, 1998), extendiendo en algunos casos la modelación para cubrir múltiples puntos de transferencia. Dada la complejidad de los problemas enteros mixtos resultantes, métodos heurísticos han sido desarrollados para encontrar los tiempos muertos y *headways* comunes entre rutas (Chowdhury y Chien, 2002; Ting y Schonfeld, 2005).

Ceder y Tal (1999) y Ceder et al. (2001) introducen un modelo lineal entero mixto para maximizar el número de conexiones sincronizadas entre rutas, utilizando una red de transporte $G = (A, \bar{N})$ donde:

- A = el conjunto de arcos representando las rutas de viaje de los buses.
- \bar{N} = el conjunto de los nodos de transferencia.
- T = el horizonte de planificación.
- M = número de rutas en la red.
- N = número de nodos de transferencia en la red.
- $Hmin_k$ = *headway* mínimo entre dos salidas de la ruta k ($1 \leq k \leq M$).
- $Hmax_k$ = *headway* máximo entre dos salidas de la ruta k ($1 \leq k \leq M$).
- F_k = número de salidas a ser programadas para la ruta k en el intervalo $[0, T]$ ($1 \leq k \leq M$).
- T_{jk} = tiempo de viaje desde el comienzo de la ruta k al nodo j ($1 \leq k \leq M, 1 \leq j \leq N$).

Los autores definen la variable X_{ik} para representar el tiempo de inicio de la salida i en la ruta k , Y_{kq} representa el número total de llegadas simultáneas de vehículos en la ruta k con los vehículos de la ruta q , D_{nikq} representa las llegadas simultáneas del bus i de la ruta k y el bus j de la ruta q en el nodo n y B un gran número igual a $T + \max_{ij} \{T_{ij}\}$.

El modelo utilizado busca maximizar el número de sincronizaciones en la red:

$$\text{máx} \sum_{k=1}^{M-1} \sum_{q=k+1}^M Y_{kq}, \quad (2.1)$$

s.a.

$$X_{1k} \leq Hmax_k \quad 1 \leq k \leq M, (2.2)$$

$$X_{F_k k} \leq T \quad 1 \leq k \leq M, (2.3)$$

$$Hmin_k \leq X_{(i+1)k} - X_{ik} \leq Hmax_k \quad 1 \leq k \leq M, 1 \leq i \leq F_k - 1, (2.4)$$

$$B \cdot D_{nijq} \geq X_{ik} + T_{kn} - (X_{jq} + T_{qn}), \quad \forall k \in M, \forall n \in \bar{N}, \forall q \in M, i \leq F_k, j \leq F_q, (2.5)$$

$$B \cdot D_{nijq} \geq X_{jq} + T_{qn} - (X_{ik} + T_{kn}), \quad \forall k \in M, \forall n \in \bar{N}, \forall q \in M, i \leq F_k, j \leq F_q, (2.6)$$

$$Y_{kq} < \sum_{n \in A_{kq}} \sum_{i=1}^{F_k} \sum_{j=1}^{F_q} (1 - D_{nijq}) \quad 1 \leq k \leq M, 1 \leq q \leq M, q \neq k, (2.7)$$

$$X_{ik} \in [0, T], Y_{kq} \in \mathbb{Z}^+, D_{nijq} \in \{0, 1\} \quad (2.8)$$

Debido a la intratabilidad del problema, Ceder (2001) propone algoritmos heurísticos para su resolución. El enfoque anterior es extendido en Eranki (2004) redefiniendo la sincronización como el evento de dos buses llegando a un punto en común con tiempo de separación acotado por una ventana de tiempo.

Ceder (2011) aborda un problema de timetabling para lograr cargas de pasajeros incluso con *headway* irregulares en los puntos de carga máxima de usuarios. Ibarra-Rojas y Rios-Solis (2012), adecuan los modelos de Ceder (2001) y Eranki (2004) para maximizar el número de sincronizaciones de dos buses permitiendo transferencia de pasajeros o la separación de dos buses en puntos de congestión garantizando regularidad de servicios a lo largo de un periodo de planificación. Los autores demuestran que su problema y los de Ceder (2001) y Eranki (2004) son NP-duros. Posteriormente Ibarra-Rojas et al. (2012), definen formulaciones que permiten resolver en minutos instancias de hasta 200 líneas de transporte y 40 nodos de sincronización utilizando un solver comercial. Es importante notar que dicho problema está basado en un solo periodo de planificación.

La asignación de vehículos se concentra en resolver el problema de distribución de viajes para los buses en el día, de manera de realizar todos los viajes de un conjunto de horarios de salida dado (*timetabling*), considerando una función objetivo que generalmente trata de reducir el tamaño de la flota y/o los costos operacionales, tanto fijos como variables. La estructura del problema a resolver puede ser muy variada dependiendo básicamente de la cantidad de terminales, buses con capacidades de transporte homogénea o heterogénea y además las rutas de *deadheading* permitidas (viajes sin pasajeros a puertas cerradas), donde este último ítem a diferencia de los vuelos aéreos no está restringido. La literatura que cubre la asignación de vehículos es extensa al igual que la forma de resolución (exacta o heurística), donde existen soluciones a problemas tanto con un solo depot como múltiples, problemas que se conocen como *Single Depot Vehicle Scheduling Problem* (SDVSP) y *Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem* (MDVSP) respectivamente. La mayoría de los problemas resueltos en la literatura consideran una flota homogénea, lo que no se ajusta a la realidad del transporte público chileno, que en la actualidad cuenta con 19 tipos de buses diferentes, que van desde un mini bus de 42 plazas a buses articulados de 163 plazas.

En la literatura de asignación de vehículos se encuentra Carpaneto et al. (1989), quienes resuelven el MDVSP a través de una formulación de flujo en redes de *multicommodity* como se detalla a continuación. Dado un conjunto de n viajes T_1, \dots, T_n , donde el viaje T_j inicia en s_j y termina en e_j ($j = 1, \dots, n$), así como m terminales con $K = \{1, \dots, m\}$, donde en el k -ésimo terminal se encuentran r_k vehículos estacionados ($k = 1, \dots, m$). Sea π_{ij} el tiempo de viaje requerido por un vehículo para ir desde el punto de fin del viaje T_i al punto de inicio del viaje T_j . Un par (T_i, T_j) se define compatible, si y solo si pueden ser ejecutados por un mismo vehículo secuencialmente; es decir, se cumple que $e_i + \pi_{ij} \leq s_j$. Sea c_{ij} el costo incurrido por un vehículo al ejecutar el viaje T_j inmediatamente después del viaje T_i . El problema consiste entonces en encontrar una asignación de los viajes a los vehículos de manera que (i) cada viaje es realizado exactamente por un vehículo, (ii) cada vehículo realiza una secuencia de viajes compatibles y retornan al terminal luego de finalizarlos, (iii) la cantidad de vehículos saliendo del terminal K no exceda r_k y (iv) se minimice el costo de realizar los viajes.

La red propuesta, considera un grafo $G^k = (V^k, A^k)$ para cada terminal $k \in K$, donde

V^k y A^k son los conjuntos de nodos y arcos respectivamente. El conjunto V^k contiene un nodo para cada tarea $i \in T$ y un par de nodos, $o(k)$ y $d(k)$, representado el horario de inicio y fin de un vehículo del depósito k . Así $V^k = \{o(k), d(k)\} \cup T$. El conjunto A^k contiene tres tipos de arcos: de salida o *pull – out* representado por $(o(k), i)$ para cada $i \in T$, de llegada o *pull – in* representado por $(i, d(k))$ para cada $i \in T$, y de conexión de viajes representado por (i, j) los cuales son viajes compatibles. En esta red, se observa que hay una relación uno a uno entre los caminos desde $o(k)$ hasta $d(k)$ en G^k y la programación factible de vehículos del terminal k . Este tipo de red es llamada por los autores como *connection network*.

La formulación propuesta utiliza la variable binaria X_{ij}^k , con $(i, j) \in A^k$ y $k \in K$, la cual es igual a 1 si existe flujo de *commodity* tipo k en el arco (i, j) , es decir, un vehículo saliendo desde el terminal k , en otro caso toma el valor 0. Con la notación anterior, el MDVSP es formulado de la siguiente manera:

$$\text{mín} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A^k} c_{ij} X_{ij}^k, \quad (2.9)$$

s.a.

$$\sum_{k \in K} \sum_{j: (i,j) \in A^k} X_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in T, \quad (2.10)$$

$$\sum_{j: (o(k),j) \in A^k} X_{o(k),j}^k \leq r_k \quad \forall k \in K, \quad (2.11)$$

$$\sum_{j: (j,i) \in A^k} X_{ji}^k - \sum_{j: (i,j) \in A^k} X_{ij}^k = 0 \quad \forall i \in V^k \setminus \{o(k), d(k)\}, k \in K, \quad (2.12)$$

$$X_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A^k, k \in K. \quad (2.13)$$

La restricción (2.10), asegura que cada tarea sea ejecutada exactamente por un sólo vehículo. La restricción (2.11), limita el número de vehículos que pueden ser usados desde cada terminal k . La restricción (2.12), establece la conservación de flujo definida sobre la estructura de múltiples caminos para cada terminal k . Finalmente, la función objetivo (2.9), considera la minimización del costo operacional de realizar los viajes.

Se utiliza un procedimiento designado como *additive lower bounding*, el cual se basa en

el cálculo de cotas inferiores a través de un esquema aditivo. Este esquema aditivo, es un caso particular de Relajación Lagrangeana sobre el problema (2.9-2.13), con el cual resuelven a gaps relativamente pequeños, problemas de 70 viajes y 3 terminales.

Dell'Amico et al. (1993), propone una heurística para resolver el MDVSP, utilizando un modelo que se basa en teoría de grafos. El problema se resuelve dado un conjunto de viajes definido, los que son representados a través de nodos, cada uno con un arco asociado. El algoritmo funciona en etapas, en cada una de las cuales las tareas de un nuevo vehículo es determinada. Adicionalmente, en cada etapa se define un conjunto conveniente de arcos prohibidos (F), y luego se encuentra en G^k a través del algoritmo de camino más corto, un circuito en el cual ninguno de los arcos de F sea utilizado. El conjunto F , es definido para asegurar que el algoritmo encuentra una solución con el mínimo número de vehículos. Con este enfoque, encuentran buenas soluciones para problemas de 1000 viajes y 10 terminales.

Forbes et al. (1994), resuelven el MDVSP considerando un tipo de flota homogénea. Propone dos formulaciones para la asignación de vehículos. La primera de asignación y la segunda de flujo en redes de *multicommodity*.

Las variables utilizadas en su formulación son las siguientes:

Variable	Tipo	Definición
A_{di}	Binario	Igual a 1 si el viaje i es el primer viaje ejecutado por un vehículo del depósito d ; igual 0, en otro caso.
X_{ijd}	Binario	Igual a 1 si los viajes compatibles i y j son ejecutados consecutivamente por un vehículo del depósito d ; igual 0, en otro caso.
B_{id}	Binario	Igual a 1 si el viaje i es el último viaje ejecutado por un vehículo del depósito d ; igual a 0, en otro caso.
w_{id}	Binario	Igual a 1 si el viaje i es ejecutado por un vehículo del depósito d ; igual a 0, en otro caso.

Tabla 2.1: Variables del modelo propuesto por Forbes et al. (1994).

Los parámetros utilizados en su formulación son los siguientes:

Parámetro	Definición
a_{di}	costo del viaje entre el depósito d y el punto de inicio del viaje i más el (Costo Fijo)/2.
c_{ijd}	costo del viaje i más el tiempo entre el inicio del viaje j y el tiempo de fin del viaje i (si viajar al depósito d no es factible en el tiempo entre 2 viajes); Min. de lo anterior y el costo total de viaje i más el costo del viajar desde el viaje i al <i>depot</i> d y desde el <i>depot</i> d al viaje j (si viajar al <i>depot</i> d es factible en el tiempo entre 2 viajes).
b_{id}	costo de viajar desde el punto de término del viaje i a el depósito d más el tiempo del viaje i más el (Costo Fijo)/2.
r_d	Número de vehículos en el depósito d .

Tabla 2.2: Parámetros del modelo propuesto por Forbes et al. (1994).

La formulación matemática del modelo de Forbes es la siguiente:

$$\text{mín} \sum_{di} a_{di}A_{di} + \sum_{ijd} c_{ijd}X_{ijd} + \sum_{di} b_{id}B_{id}, \quad (2.14)$$

s.a.

$$\sum_i A_{di} \leq r_d \quad \forall d, \quad (2.15)$$

$$A_{di} + \sum_j X_{jid} - w_{id} = 0 \quad \forall i, d, \quad (2.16)$$

$$B_{id} + \sum_j X_{ijd} - w_{id} = 0 \quad \forall i, d, \quad (2.17)$$

$$\sum_i B_{id} \leq r_d \quad \forall d, \quad (2.18)$$

$$\sum_d w_{id} = 1 \quad \forall i, \quad (2.19)$$

$$A_{di}, X_{ijd} \text{ y } B_{id} \in \mathbb{Z}^+ \quad (2.20)$$

La restricción (2.15), no permite realizar una cantidad mayor de primeros viajes por terminal, que el número de buses disponibles en el terminal d . La restricción (2.16), establece que un viaje i es realizado por el primer viaje de un bus desde el terminal d , o inmediatamente después de un viaje j , el cual es compatible con el viaje i . La restricción (2.17), establece que un viaje i es realizado por el último viaje de un bus del terminal d , o al ejecutar los viajes

i y j de forma consecutiva, los cuales son compatibles. La restricción (2.18), no permite realizar una cantidad mayor de últimos viajes, que la cantidad de buses disponibles en el depot d . La restricción (2.19), establece que un viaje i debe ejecutarse desde un solo terminal d . Finalmente, la función objetivo (2.14), considera la minimización del costo operacional de realizar los viajes.

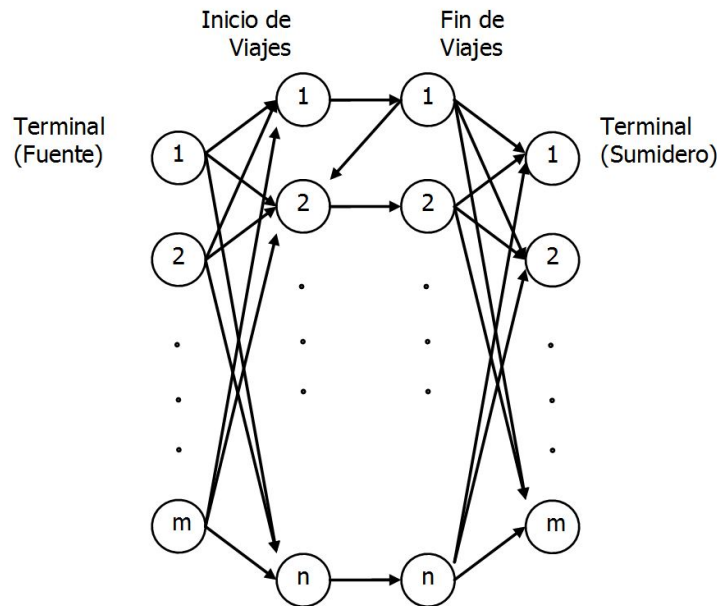


Figura 2.3: Red correspondiente a la formulación de Forbes et al. (1994).

El problema se resuelve a optimalidad para 600 viajes y 3 terminales (91.000 variables en promedio), pero no incluye la posibilidad de que el bus haga trasbordo en el terminal, ya que sólo tiene nodos fuentes y sumideros como se observa en la Figura 2.3, que representa la red asociada al modelo.

Ribeiro y Soumis (1994), formulan el MDVSP como un modelo *set partitioning* con restricciones de borde, el cual puede ser derivado del modelo (2.9)-(2.13) usando la descomposición de Dantzig-Wolfe (Dantzig y Wolfe, 1960). Para cada $k \in K$, sea Ω_k el conjunto de caminos que salen del terminal D_k , visitando algunos nodos de T , y regresando al mismo terminal. Para cada camino $p \in \Omega = \bigcup_{k=1}^m \Omega_k$, sea c_p la suma de los costos de estos arcos y $a_{jp} = 1$ si la programación p incluye al nodo $j \in T$, $a_{jp} = 0$ en otro caso. Definen la

variable binaria y_p la cual toma el valor 1 si se elige la programación $p \in \Omega$, 0 en otro caso. La formulación equivalente (\overline{MDVSP}) es:

$$\text{mín} \sum_{k \in K} \sum_{p \in \Omega_k} c_p y_p, \quad (2.21)$$

s.a.

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in \Omega_k} a_{jp} y_p = 1 \quad \forall j \in T, \quad (2.22)$$

$$\sum_{p \in \Omega_k} y_p \leq r_k \quad \forall k \in K, \quad (2.23)$$

$$y_p \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A^k, k \in K. \quad (2.24)$$

La restricción de *set partitioning* (2.22) asegura que cada nodo $j \in T$ sea visitado exactamente una vez por el circuito. La restricción (2.23) asegura que no más de r_k vehículos del terminal D_k sean utilizados. La relajación continua de \overline{MDVSP} la resuelve a través de generación de columnas (GC), y el subproblema corresponde a la generación de una nueva columna de menor costo reducido, encontrando el camino más corto saliendo desde el depot D_k , visitando al menos un nodo de T y regresando al mismo terminal:

$$\text{mín} \quad -\sigma_k + \sum_{(i,j) \in A^k} (c_{ij} - \pi_j) x_{ij}^k, \quad (2.25)$$

s.a.

$$\sum_{j:(j,i) \in A^k} x_{ji}^k - \sum_{j:(i,j) \in A^k} x_{ij}^k = 0 \quad \forall j \in T, \quad (2.26)$$

$$\sum_{j:(o(k),j) \in A^k} x_{o(k),j}^k = 1, \quad (2.27)$$

$$\sum_{i:(i,o(k)) \in A^k} x_{i,o(k)}^k = 1, \quad (2.28)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A^k. \quad (2.29)$$

Con este enfoque, los autores resuelven problemas de hasta 300 viajes y 6 terminales.

Löbel (1998), resuelve de manera eficiente un problema de flujo *multicommodity* similar al definido en (2.9)-(2.13). Los componentes y conceptos básicos utilizados son:

- Relajación Lagrangeana, para obtener rápidamente cotas inferiores apretadas para el tamaño de flota y costo operacional mínimos, lo más cerca posible del óptimo del problema entero.
- Heurísticas *opening* para obtener una primera solución entera factible y buen punto de partida para la relajación lineal del problema.
- Enfoque de relajación lineal del problema con generación de columnas.
- Heurística llamada *LP-plunging* para encontrar mejores soluciones enteras factibles.
- *Branch and Cut* para resolver un problema comprobando optimalidad.
- Algoritmo de Flujo a Costo Mínimo combinado con generación de columnas y Cplex.

El método de resolución, consiste en resolver el problema de programación entero a través de heurísticas primal y dual, generación de columnas, y *branch and cut*. Con este enfoque, logran resolver problemas con más de 70 millones de variables, 25 mil viajes y 50 terminales.

Freling et al. (2001), formulan el problema con una estructura de red como la propuesta en (2.9)-(2.13), pero para el caso particular de un solo terminal (SDVSP). Utilizan la variable binaria y_{ij} , con $y_{ij} = 1$ si el vehículo cubre el viaje j directamente después del viaje i , $y_{ij} = 0$ en otro caso, con la cual se puede formular de manera sencilla el SDVSP como:

$$\text{mín } \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} y_{ij}, \quad (2.30)$$

s.a.

$$\sum_{j:(i,j) \in A} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in T, \quad (2.31)$$

$$\sum_{i:(i,j) \in A} y_{ij} = 1 \quad \forall j \in T, \quad (2.32)$$

$$y_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A. \quad (2.33)$$

Si a la estructura de red propuesta, se le borran los nodos y arcos correspondientes al terminal (inicio y fin de cada viaje), el modelo resultante corresponde a un modelo de asignación, el cual es definido como *quasiassignment* por Paixão y Branco (1987) con el problema asociado definido como *QuasiAssignment Problem* (QAP). Para resolver el QAP, Freling et al. (2001) proponen un algoritmo *auction*, basado en una combinación de algoritmo *auction forward* y *reverse* el cual definen como QAFR. Comparan el QAFR con varios enfoques propuestos para resolver el SDVSP, como el algoritmo Húngaro propuesto por Paixão y Branco (1987), el algoritmo sucesivo de camino más corto propuesto por Dell’Amico et al. (1993) y el algoritmo de flujo a costo mínimo propuesto por Bokinge y Hasselström (1980). En la mayoría de las instancias, el QAFR es mas rápido y estable en promedio.

Haghani y Banihashemi (2002) proponen una formulación basada en la formulación de Forbes et al. (1994). Establecen el concepto de (i) Viajes *depot* compatible, (ii) Viajes *calle* compatible y (iii) Viajes de mañana, viajes de mediodía y viajes de tarde. El concepto (i) define que dos viajes compatibles son *depot* compatible si es factible y menos costoso para el vehículo volver al terminal durante el tiempo entre los viajes. (ii) define que dos viajes compatibles son *calle* compatible si es infactible o más costoso para el vehículo volver al terminal durante el tiempo entre los viajes. (iii) define una agrupación de los viajes en tres conjuntos y el criterio básico de agrupación es que todos lo viajes de la mañana son *depot* compatible con todos los viajes de la tarde. El resto de los viajes son viajes de mediodía.

En su formulación utilizan las mismas variables A_{di} y B_{id} de Forbes et al. (1994), adicionando las siguientes:

Variable	Tipo	Definición
E_{di}	Binario	Igual a 1 si el viaje i está en el set de los viajes de la tarde y es el primer viaje ejecutado por un vehículo del <i>depot</i> d regresando a la calle; 0 en otro caso.
X_{ijd}	Binario	Igual a 1 si los viajes compatibles i y j son ejecutados consecutivamente por un vehículo del <i>depot</i> d ; 0 en otro caso.
F_{id}	Binario	Igual a 1 si el viaje i está en el set de los viajes de la mañana y es el último viaje ejecutado por un vehículo del <i>depot</i> d regresando a la calle; 0 en otro caso.

Tabla 2.3: Variables del modelo propuesto por Haghani y Banihashemi (2002).

Utilizan los mismos parámetros a_{di} , b_{id} y r_d de Forbes et al. (1994), más los siguientes:

Parámetro	Definición
e_{di}	costo del viaje entre el depósito d y el punto de inicio del viaje i .
c_{ijd}	costo del viaje i más el tiempo entre el inicio del viaje j y el tiempo de fin del viaje i (si viajar al depósito d no es factible en el tiempo entre 2 viajes); Min. de lo anterior y el costo total de viaje i más el costo del viajar desde el viaje i al <i>depot</i> d y desde el <i>depot</i> d al viaje j (si viajar al <i>depot</i> d es factible en el tiempo entre 2 viajes).
f_{id}	costo de viajar desde el punto de fin del viaje i al <i>depot</i> d más el tiempo del viaje i .

Tabla 2.4: Parámetros del modelo propuesto por Haghani y Banihashemi (2002).

La estructura de red propuesta por Haghani y Banihashemi es similar a la de Forbes et al. (1994), pero como se observa en la Figura 2.4 agregan nodos de transbordo, en los cuales un vehículo puede volver al terminal para luego realizar un siguiente viaje.

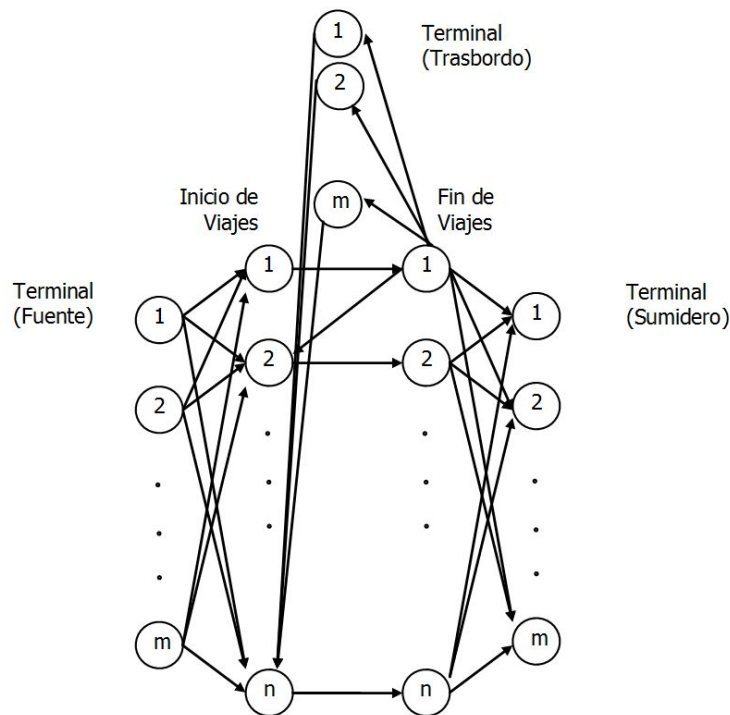


Figura 2.4: Red correspondiente a la formulación de Haghani y Banihashemi (2002).

La formulación matemática del modelo de Haghani y Banihashemi es la siguiente:

$$\text{mín} \sum_{di} a_{di}A_{di} + \sum_{di} e_{id}E_{id} + \sum_{ijd} c_{ijd}X_{ijd} + \sum_{di} b_{id}B_{id} + \sum_{di} f_{id}F_{id}, \quad (2.34)$$

s.a.

$$\sum_i A_{di} \leq r_d \quad \forall d, \quad (2.35)$$

$$A_{di} + E_{di} + \sum_j X_{jid} - w_{id} = 0 \quad \forall i, d, \quad (2.36)$$

$$\sum_i E_{di} - \sum_i F_{id} = 0 \quad \forall i, d, \quad (2.37)$$

$$B_{id} + F_{id} + \sum_j X_{ijd} - w_{id} = 0 \quad \forall d, \quad (2.38)$$

$$\sum_i B_{id} \leq r_d \quad \forall d, \quad (2.39)$$

$$\sum_d w_{id} = 1 \quad \forall i, \quad (2.40)$$

$$A_{di}, X_{ijd}, B_{id}, E_{di} \text{ y } F_{id} \in Z_0^+ \quad (2.41)$$

Con el enfoque propuesto, resuelven problemas de hasta 900 viajes.

Kliwer et al. (2006) proponen un modelo de redes *multicommodity* similar al definido en (2.9-2.13), pero con una estructura de red diferente, la cual denotan como *time-space network*. Esta estructura de red, puede ser muy ventajosa comparada a la red tipo *connection network* cuando la cantidad de posiciones de inicio y término de las tareas es pequeño comparado a la cantidad de tareas. Para cada *depot* $k \in K$, la red espacio-tiempo $\bar{G}^k = (\bar{V}^k, \bar{A}^k)$ se puede definir de la siguiente manera. El conjunto de nodos \bar{V}^k contiene los nodos $o(k)$ y $d(k)$, los nodos $i \in T$ que en este caso solo representan el inicio de las tareas, y nodos fin que representan el término de las tareas. El conjunto de nodos de término de tareas es representado por E . Así el conjunto $\bar{V}^k = \{o(k), d(k)\} \cup T \cup E$, donde cada nodo de $T \cup E$ tiene asociado un tiempo y posición. Sea W el conjunto de posiciones de inicio y fin, el cual se encuentra ordenado cronológicamente para cada elemento $w \in W$. El primer y último nodo de posición

$w \in W$ es definido como f_w y l_w respectivamente. El conjunto de arcos \bar{A}^k contiene cinco tipos de arcos: *pull – out* $(o(k), f_w)$, *pull – in* $(d(k), l_w)$, arco tarea representado por (i, j) enlazando el nodo de inicio $i \in T$ con el nodo de fin $j \in E$, arco espera representado por una cadena de arcos de espera enlazando los nodos consecutivos asociados a una ubicación y arcos de *deadhead* que permiten reposicionar un vehículo desde una posición donde ha finalizado justo una tarea a una ubicación diferente donde comenzará otra tarea. En lugar de considerar todos los posibles arcos de *deadhead*, proponen agregarlos de manera de reducir su número. Con el procedimiento de agregación, un arco de *deadhead* enlaza un nodo de fin $j \in E$ (asociado a un tiempo e_j y ubicación w_j) a un nodo de inicio $i \in T$ (asociado a un tiempo s_i y ubicación w_i), si y solo si, no hay una tarea i' terminando en $\hat{e}_{i'}$ después del tiempo e_i tal que $\hat{e}_{i'} + \pi_{i'j} \leq s_j$ y no hay tarea j' comenzando en $w_{j'}$ antes del tiempo s_j tal que $e_i + \pi_{ij'} \leq s_j$.

Con la notación anterior formulan el MDVSP de la siguiente manera:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in \bar{A}^k} c_{ij} X_{ij}^k, \quad (2.42)$$

s.a.

$$\sum_{k \in K} \sum_{j: (i,j) \in \bar{A}_T^k} X_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in T, \quad (2.43)$$

$$\sum_{j: (o(k),j) \in \bar{A}^k} X_{o(k),j}^k \leq r_k \quad \forall k \in K, \quad (2.44)$$

$$\sum_{j: (j,i) \in \bar{A}^k} X_{ji}^k - \sum_{j: (i,j) \in \bar{A}^k} X_{ij}^k = 0 \quad \forall i \in \bar{V}^k \setminus \{o(k), d(k)\}, k \in K, \quad (2.45)$$

$$X_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in \bar{A}_T^k, k \in K, \quad (2.46)$$

$$X_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in \bar{A}^k \setminus \bar{A}_T^k, k \in K. \quad (2.47)$$

donde \bar{A}_T^k es el subconjunto de arcos de tareas de \bar{A}^k , $k \in K$. En la estructura de red espacio-tiempo, el flujo sobre todos los arcos a excepción de los arcos de tareas puede ser mayor que 1, lo que queda modelado con las restricciones (2.46) y (2.47).

Con este enfoque, resuelven un problema de 7068 viajes, 124 estaciones y 5 terminales.

Todos los enfoques mostrados anteriormente, resuelven sólo la etapa de asignación de vehículos. Cabe destacar que varios autores han propuesto formulaciones que resuelven la asignación de vehículos y la asignación de conductores de forma integrada, dentro de los cuales se encuentra Huisman et al. (2005), el cual presenta un enfoque integrado para la asignación de vehículos y conductores, donde la asignación de vehículos se formula como un problema de flujo en redes combinado con una formulación *set partitioning* para la programación de conductores. Con este enfoque, logran resolver instancias con sólo 200 viajes y 4 terminales.

Kliewer et al. (2010), al igual que Huisman et al. (2005), proponen una formulación de flujo *multicommodity* para la asignación de vehículos combinado con una formulación *set partitioning* para la programación de conductores. La diferencia es que su estructura de red esta basada en una red espacio-tiempo, con la cual logran reducir el número de restricciones y variables del problema (reduce entre 99.66% a 99.94% la cantidad de nodos y arcos de la red, comparada al enfoque de red *connection-based*). El problema integrado lo resuelven con generación de columnas combinado con relajación Lagrangeana. Con este enfoque, logran resolver de manera eficiente instancias con 640 viajes y 4 terminales.

En el siguiente capítulo se plantea la modelación propuesta, explicando en detalle la red utilizada en el enfoque de esta Tesis, las variables de decisión, los parámetros y cada una de las restricciones involucradas.

Capítulo 3

FORMULACIÓN PROPUESTA PARA EL TIMETABLING Y ASIGNACIÓN DE BUSES

En este capítulo se describen los modelos realizados para la resolución de las etapas de determinación de horarios de viaje o timetabling y asignación de buses, las cuales fueron descritas en el Capítulo 2, en donde la principal característica es decidir los instantes de salida de cada bus desde un terminal para todo el día de operación. Todo lo anterior debe ir respaldado por un conjunto de restricciones, para cumplir las condiciones operacionales impuestas por la autoridad, las cuales corresponden a rangos de frecuencia, capacidad de transporte y *headways* por periodo (punta y no punta).

A continuación se presenta el enfoque del problema y posteriormente se presentan las formulaciones de los modelos planteados.

3.1. Formulación del modelo y enfoque de solución

En esta Tesis se busca resolver de manera integrada las etapas de determinación de horarios de viaje y asignación de buses, ya que las restricciones asociadas a la capacidad de

transporte y a las frecuencias impuestas en los contratos, permiten elegir diferentes combinaciones de buses de diferentes tamaños para cumplir con tales condiciones. Bajo este esquema, el diseño de horarios de viaje tratado de manera independiente de la asignación de buses podría producir decisiones sub-óptimas. Esta observación motiva la necesidad de definir un modelo que sea capaz de decidir el terminal inicial, la hora de salida, la hora de llegada, y el vehículo que debe realizar un viaje específico a mínimo costo operacional y que cumpla con todas las restricciones impuestas por la autoridad. Para formular el problema, se construyen redes expandidas en el tiempo (una para cada bus), basadas en el esquema propuesto por Forbes et al. (1994) y posteriormente modificado por Haghani y Banihashemi (2002), quienes agregaron nodos de transbordo que permiten a los buses retornar a terminal para realizar otro viaje. En este trabajo, se añaden atributos específicos que representan los costos de operación en el esquema de optimización y de forma adicional se agrega la posibilidad de que un bus pueda esperar en terminal para realizar una próxima salida, opción que no fue considerada en el trabajo de Haghani y Banihashemi (2002).

3.1.1. Red expandida en el tiempo para la planificación de viajes

El problema es modelado por medio de una de una red expandida en el tiempo. El tiempo continuo a lo largo de la jornada de trabajo es discretizado en periodos de duración fija indexado por t , con $t \in 1, \dots, T$. Cada combinación de terminal ($d \in 1, \dots, D$) con un bus ($b \in 1, \dots, B$) es representada por una red diferente. Para cada red en un periodo t , se construye una capa que contiene lo siguiente:

Cuatro tipos de nodos que representan:

- Un bus que parte el día de trabajo en un periodo t (nodo *Depot* inicio);
- Un viaje que parte dentro de un periodo t (nodo de viaje);
- Un bus que espera en el terminal para iniciar un viaje asignado (nodo de transbordo);
- Un bus que finaliza el día de trabajo en el periodo t (nodo *Depot* fin).

- Nodos artificiales fuente y sumidero que permiten representar el problema como un camino en la red, desde el origen o fuente al destino o sumidero.

Con respecto a los arcos, se tienen los siguientes casos:

- Arcos que conectan nodos de comienzo de día a nodos viajes;
- Arcos que conectan nodos viajes a nodos viajes y nodos viajes a nodos transbordos;
- Arcos que conectan nodos transbordos a nodos transbordos;
- Arcos que conectan nodos viajes a nodos de fin de día.

La Figura 3.1 ilustra los nodos y arcos descritos.

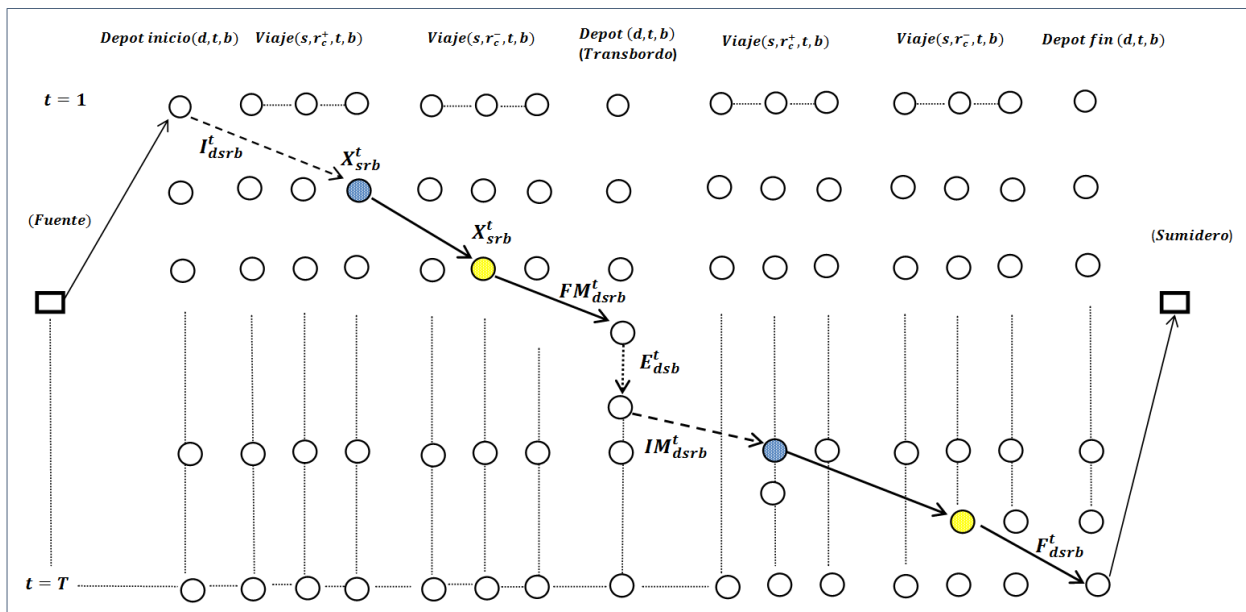


Figura 3.1: Red expandida en el tiempo para un terminal d y un bus b .

En la red expandida en el tiempo propuesta, un camino desde el nodo fuente al sumidero representa una secuencia de viajes y periodos de espera para un bus en el día de operación. La formulación debe incluir una serie de condiciones necesarias para definir las rutas adecuadas en términos de conservación de flujo y considerar restricciones globales asociadas a las exigencias impuestas por la autoridad y por la empresa.

Antes de formular el problema es necesario aclarar la definición de un servicio o recorrido. Un servicio contempla dos cabezales, los cuales como se observa en la Figura 3.2 se encuentran fuera del terminal. Dado esto existen 2 rutas de circulación establecidas, la primera en dirección 1-2 y la segunda en dirección 2-1, únicas para cada servicio.

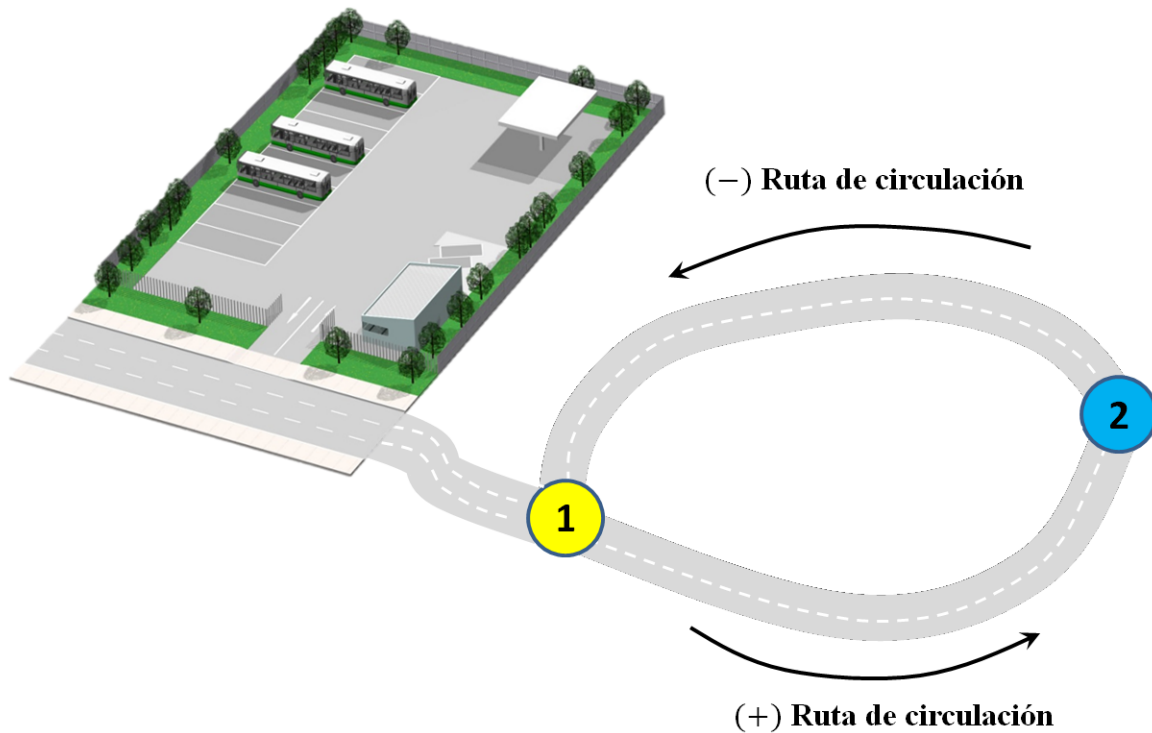


Figura 3.2: Visualización de un servicio.

Una característica que se desprende de la Figura anterior, corresponde a que un bus solo puede llegar al cabezal 2 a través de la ruta de circulación (+), y desde el cabezal 2 solo puede regresar al 1 a través de la ruta de circulación (-); es decir, los viajes son de tipo *roundtrip*¹. Lo anterior determina la única posible trayectoria de un bus por un servicio, la cual corresponde a Terminal \rightarrow Ruta(+) \rightarrow Ruta(-) \rightarrow Terminal.

¹Un viaje de este tipo recorre ambas rutas de circulación del servicio.

En las siguientes secciones se presenta cada uno de los modelos desarrollados en detalle, los cuales resuelven las etapas de determinación de horarios de viaje y asignación de buses.

3.2. Formulación I

A continuación se presentan todos los elementos de la formulación propuesta.

3.2.1. Conjuntos

Para desarrollar el modelo, es necesario definir el siguiente conjunto de índices:

Índice	Definición	Uso índice
D	Conjunto de terminales de la Unidad de Negocio.	$d \in D$
$S(d)$	Conjunto de servicios del terminal $d \in D$.	$s \in S(d)$.
$R^+(s)$	Conjunto de rutas Terminal \rightarrow Cabezal 1 \rightarrow Cabezal 2 del servicio $s \in S$.	$r \in R^+(s)$
$R^-(s)$	Conjunto de rutas Cabezal 2 \rightarrow Cabezal 1 \rightarrow Terminal del servicio $s \in S$.	$r \in R^-(s)$
$R(s)$	Conjunto de rutas del servicio $s \in S$, es decir, $R^+(s) \cup R^-(s)$.	$r \in R(s)$.
B	Conjunto de buses.	$b \in B$
T	Conjunto de períodos de tiempo.	$t \in T$
I	Conjunto de intervalos horarios (bloques horarios).	$i \in I$
$H(i)$	Conjunto de horas de operación del intervalo $i \in I$.	$h \in H(i)$
Ω_{srbt}^t	Conjunto de viajes que no puede realizar el bus $b \in B$ por la ruta $r \in R$ del servicio $s \in S$ en el periodo $t \in T$	$(srbt) \in \Omega_{srbt}^t$

Tabla 3.1: Conjuntos de índices del modelo.

Para simplificar la notación, los conjuntos $S(d)$, $R^+(s)$, $R^-(s)$ y $R(s)$ se utilizarán como S , R^+ , R^- y R respectivamente, pero se entenderá que las combinaciones $D \times S$ por ejemplo corresponderán a las combinaciones factibles de los servicios $s \in S$ con un terminal $d \in D$.

En la figura 3.3 se observan las trayectorias de los conjuntos $R^+(s)$ y $R^-(s)$ para un servicio s particular. Las líneas sólidas corresponden a viajes en circulación entre cabezales y las líneas punteadas corresponden a viajes en vacío a puertas cerradas y sin pasajeros.

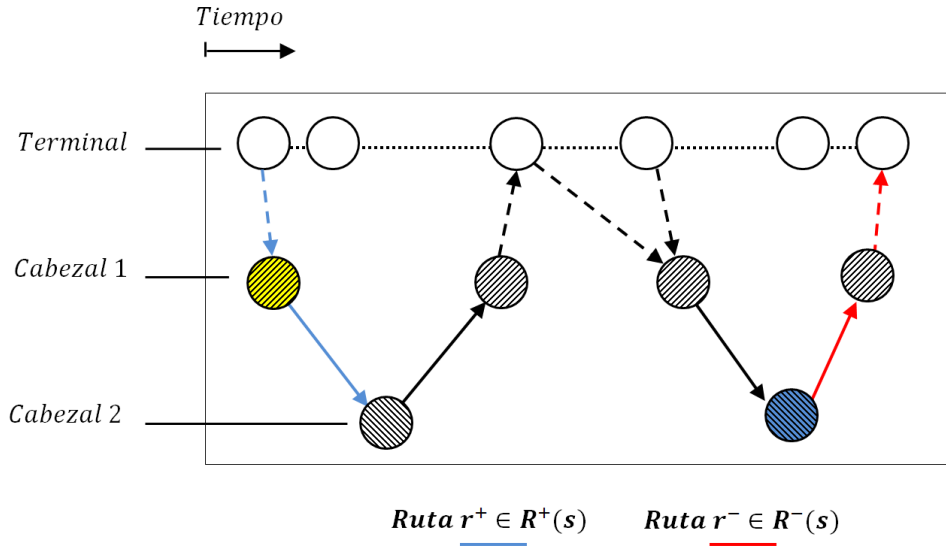


Figura 3.3: Trayectorias asociadas a conjuntos $R^+(s)$ y $R^-(s)$.

El conjunto I que contempla los intervalos de operación, se encuentra definido por Transantiago. Se consideran 3 tipos de días, los que corresponden a laboral, sábado y domingo. El tipo de día laboral contiene 12 intervalos, tal como se detalla en la Tabla 3.2.

El conjunto $H(i)$ contiene todas las horas h que pertenecen al intervalo de operación i . Las horas consideradas son las que comienzan cada Δ periodos de tiempo, con la primera hora comenzando al inicio de la operación del intervalo. En la Figura 3.4 se muestra un ejemplo de tal definición, considerando $\Delta = 15$ periodos de tiempo (30 minutos en total), para este caso $H(i) = \{h_1, h_2, h_3\}$ el que representa al periodo Punta Mañana de 2.0 horas.

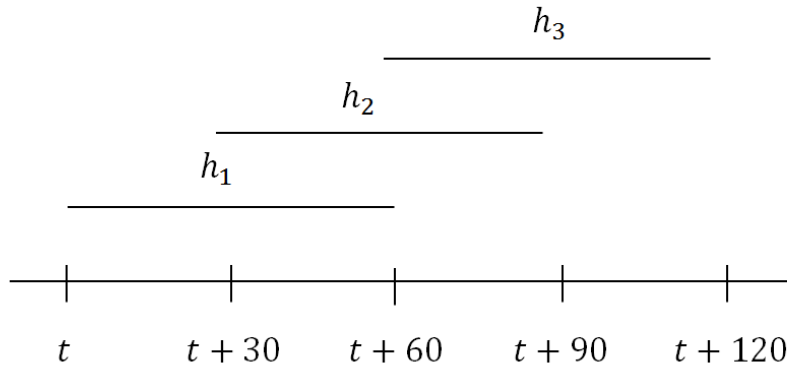


Figura 3.4: Horas continuas para el intervalo de operación Punta Mañana.

Definición periodo	Hora inicio	Hora fin	Horas por periodo
01. Pre Nocturno (Madrugada)	00:00	00:59	1
02. Nocturno	01:00	05:29	4.5
03. Transición Nocturno	05:30	06:29	1
04. Punta Mañana	06:30	08:29	2
05. Transición Punta Mañana	08:30	09:29	1
06. Fuera de Punta Mañana	09:30	12:29	3
07. Punta Mediodía	12:30	13:59	1.5
08. Fuera de Punta Tarde	14:00	17:29	3.5
09. Punta Tarde	17:30	20:29	3
10. Transición Punta Tarde	20:30	21:29	1
11. Fuera de Punta Nocturno	21:30	22:59	1.5
12. Pre Nocturno (Noche)	23:00	23:59	1

Tabla 3.2: Intervalos horarios para el tipo de día laboral.

Los intervalos horarios para el día sábado y domingo se encuentran en el anexo A.2.

3.2.2. Parámetros del modelo

Se definen los siguientes parámetros:

Parámetros	Definición
ds_{sr}	Distancia total de un servicio s por la ruta r (en km).
dr_{dsr}	Distancia entre un terminal d y el comienzo de una ruta r del servicio s (en km).
ts_{srt}	Tiempo de viaje del servicio s por la ruta r si comenzó en t (en periodos de tiempo).
tr_{dsrt}	Tiempo de viaje desde el terminal d al comienzo de la ruta r del servicio s , si salió en t .
cf_b	Costo fijo de utilizar el bus b (en \$).
cv_b	Costo variable por operar el bus b (en \$/km).
$CapMin_{isr}$	Capacidad mínima por hora de oferta del servicio s por la ruta r durante el intervalo i .
$CapMax_{isr}$	Capacidad máxima por hora de oferta del servicio s por la ruta r durante el intervalo de tiempo i .
$MinH_{srt}$	Headway mínimo asociado al servicio s por la ruta r entre viajes sucesivos, con el primer viaje iniciado en el periodo t (en periodos de tiempo).
$MaxH_{srt}$	Headway máximo asociado al servicio s por la ruta r entre viajes sucesivos, con el primer viaje iniciado en el periodo t (en periodos de tiempo).
$CapBus_b$	Capacidad de transporte de pasajeros del bus b (en número de pasajeros).
$\tau_{1(s,r,t)}$	Tiempo en el cual un bus debe iniciar un viaje por el servicio s y ruta $r \in \mathbb{R}^-$ para finalizar en periodo t .
$\tau_{2(s,r,t)}$	Tiempo en el cual un bus debe salir desde terminal para iniciar un viaje en el servicio s por la ruta $r \in \mathbb{R}$ en el periodo t .
$\tau_{3(s,r,t)}$	Tiempo en el cual un bus debe iniciar un viaje por el servicio s y ruta $r \in \mathbb{R}^+$ para finalizar en el periodo t .

Tabla 3.3: Parámetros del modelo de programación y asignación de vehículos.

El costo fijo cf_b incluye los costos de adquisición, alquiler de los buses y salarios de los conductores, mientras que el costo variable cv_b considera elementos como repuestos, neumáticos, petróleo y lubricantes.

Los parámetros τ relacionan el tiempo de inicio de un viaje o salida desde terminal con el inicio o fin de una tarea en t , permitiendo representar ciertas restricciones del modelo.

3.2.3. Variables del modelo

Las variables utilizadas en la modelación son las siguientes:

Variable	Tipo	Definición
I_{dsrb}^t	Binario	Igual a 1 si el bus b sale desde el terminal d en el periodo t a realizar su primer viaje del día el que corresponde al servicio s por la ruta r ; igual 0, en otro caso.
IM_{dsrb}^t	Binario	Igual a 1 si el bus b sale desde el terminal d en el periodo t a realizar un viaje (pero no es el primero) del servicio s por la ruta r ; igual 0, en otro caso.
F_{dsrb}^t	Binario	Igual a 1 si el bus b se dirige a terminal d luego de finalizar su último viaje del día, el que corresponde al servicio s por la ruta r que comenzó en el periodo t ; igual a 0, en otro caso.
FM_{dsrb}^t	Binario	Igual a 1 si el bus b se dirige a terminal d luego de finalizar un viaje, del servicio s por la ruta r que comenzó en el periodo t ; igual a 0, en otro caso.
X_{srb}^t	Binario	Igual a 1 si el bus b comienza un viaje en el servicio s por la ruta r en el instante t ; igual a 0, en otro caso.
E_{dsb}^t	Binario	Igual a 1 si el bus b asignado al servicio s está esperando en el terminal d entre el periodo t to $t + 1$.

Tabla 3.4: Variables del modelo de diseño de programación y asignación de vehículos.

Con estas variables, se puede concebir la estructura de red expandida en el tiempo para la planificación de viajes definida en 3.1.1. Entonces es posible tratar el problema como uno de flujo en redes (Haghani y Banihashemi, 2002) al cual se le deben agregar una serie de restricciones operacionales y otras que reflejan la calidad de servicio del sistema.

3.2.4. Restricciones

El problema a resolver tiene varias consideraciones que se deben respetar, condiciones que son impuestas tanto por Transantiago como por la empresa; estas deben asegurar un servicio de calidad a los usuarios por lo que indirectamente el modelo es sensible a las condiciones de demanda en el espacio y en el tiempo. A continuación se describe cada una de ellas.

1. *Conservación de la cantidad de buses en cada Terminal.*

La siguiente restricción asegura que la cantidad total de salidas iniciales realizadas desde un terminal a algún servicio, regresen al terminal correspondiente luego de culminar su operación.

$$\sum_{(t,r) \in TR^+} I_{dsrb}^t - \sum_{(t,r) \in TR^-} F_{dsrb}^t = 0, \quad \forall (d, s, b) \in D \times S \times B, \quad (3.1)$$

Esta restricción es impuesta con el objetivo de obtener una programación cíclica que mantenga el mismo número de buses en cada terminal.

2. *Conservación de flujo de buses en terminal.*

Una de las particularidades del modelo es que contabiliza si un bus esta esperando en terminal, donde se encuentra en estado de espera hasta realizar su próxima salida. La restricción 3.2 asegura esta condición, conservando el flujo en los nodos de transbordo.

$$\sum_{r \in R^-} FM_{dsrb}^{\tau_1(s,r,t)} + E_{dsb}^{t-1} = \sum_{r \in R^+} IM_{dsrb}^t + E_{dsb}^t, \quad \forall (d, s, b, t) \in D \times S \times B \times T, \quad t > 1, \quad (3.2)$$

donde $\tau_1(s,r,t)$ satisface $t = \tau_1(s,r,t) + ts_{sr\tau_1(s,r,t)} + tr_{dsr\tau_1(s,r,t)}$,

Para un terminal de transbordo específico d y un periodo de tiempo t , el lado izquierdo de la restricción considera si el bus b está esperando a partir del periodo anterior o si el bus procede de un viaje que terminará en el tiempo t . El lado derecho contempla si el bus b permanece en el terminal durante otro periodo (hasta $t + 1$ por lo menos), o sale del terminal en t para iniciar otro viaje; la Figura 3.5 muestra la conservación en un terminal como parte de la red.

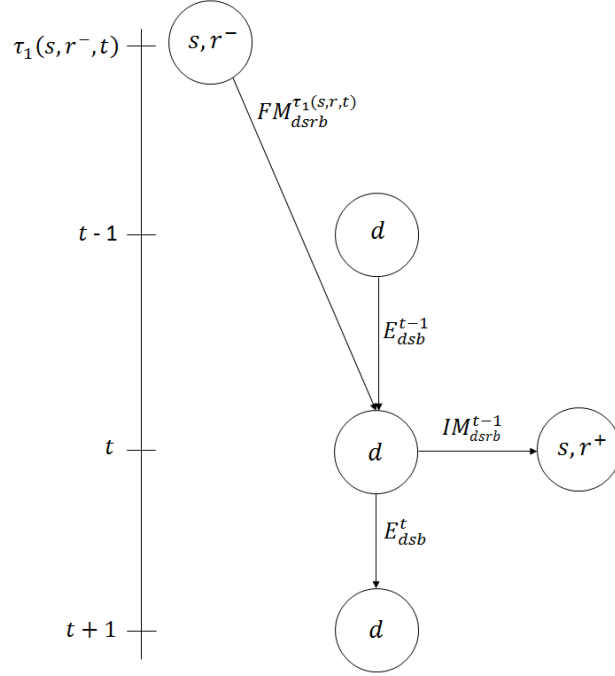


Figura 3.5: Conservación en nodo terminal.

3. *Al inicio y al final de la operación no existen buses esperando en terminal.*

Esta restricción representa las condiciones de borde de la restricción 3.2, ya que los buses son asignados a un servicio luego de realizar su primera salida del día, además de imponer que al finalizar la operación no deben existir buses en estado espera.

$$E_{dsb}^0 = E_{dsb}^T = 0, \quad \forall (d, s, b) \in D \times S \times B \quad (3.3)$$

4. *Cada viaje que se inicia debe realizarse por un solo bus.*

Si existe un viaje, este efectivamente debe realizarse por un bus específico. Para esto se relaciona la variable de decisión del horario de inicio de viaje desde el Cabezal 1 con la variable de asignación de buses que salen desde terminal a realizar un viaje.

$$\sum_{d \in D} I_{dsrb}^{\tau_2(s,r,t)} + \sum_{d \in D} IM_{dsrb}^{\tau_2(s,r,t)} = X_{srb}^t, \quad \forall (s, r, t, b) \in S \times R^+ \times T \times B, \quad (3.4)$$

donde $\tau_2(s,r,t)$ satisface $t = \tau_2(s,r,t) + tr_{dsr\tau_2(s,r,t)}$,

Se debe notar que el parámetro $\tau_2(s,r,t)$ relaciona el tiempo en que debe salir el bus desde el terminal para iniciar un viaje en t ; la Figura 3.6 muestra gráficamente tal relación.

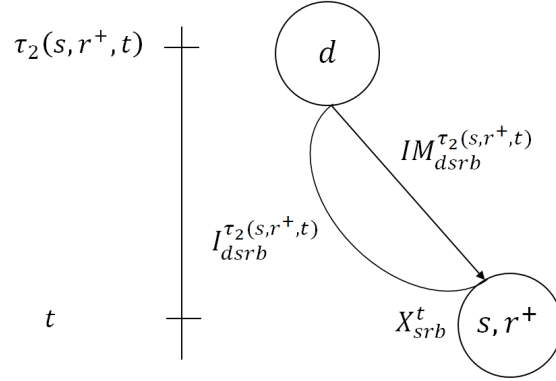


Figura 3.6: Relación entre variable X_{srb}^t con I_{dsrb}^t e IM_{dsrb}^t .

5. Cada viaje que se realiza recorre ambas rutas del servicio.

Como se mencionó al inicio de esta formulación, los viajes son de tipo *roundtrip*.

$$X_{sr_1b}^{\tau_3(s, r_1, t)} = X_{sr_2b}^t, \quad \forall (s, b, t) \in S \times B \times T, \quad r_1 \in R^+, \quad r_2 \in R^- \quad (3.5)$$

donde $\tau_3(s, r, t)$ satisface $t = \tau_3(s, r, t) + t_{Ssr\tau_3(s, r, t)}$

Esta restricción utiliza el índice auxiliar $\tau_3(s, r, t)$, el que corresponde al tiempo en el cual se debe iniciar el viaje desde Cabezal 1 para realizar un viaje desde Cabezal 2 en t .

6. Cada viaje iniciado debe regresar a terminal.

Cada viaje iniciado debe retornar a terminal a través de la ruta de circulación (-).

$$\sum_{d \in D} F_{dsrb}^t + \sum_{d \in D} FM_{dsrb}^t = X_{srb}^t, \quad \forall (s, r, b, t) \in S \times R^- \times B \times T, \quad (3.6)$$

Esta restricción determina si el viaje del bus que retorna a terminal corresponde a su última salida del día o esperará en terminal para un siguiente viaje.

La formulación propuesta integra las etapas del timetabling y la asignación de vehículos; esto se logra a través de las restricciones 3.4, 3.5 y 3.6 ya explicadas. Estas restricciones relacionan la variable de decisión de viaje X con las variables de asignación de buses I , IM , F y FM ; la Figura 3.7 muestra la conservación en los nodos de viaje de la red representada por estas restricciones.

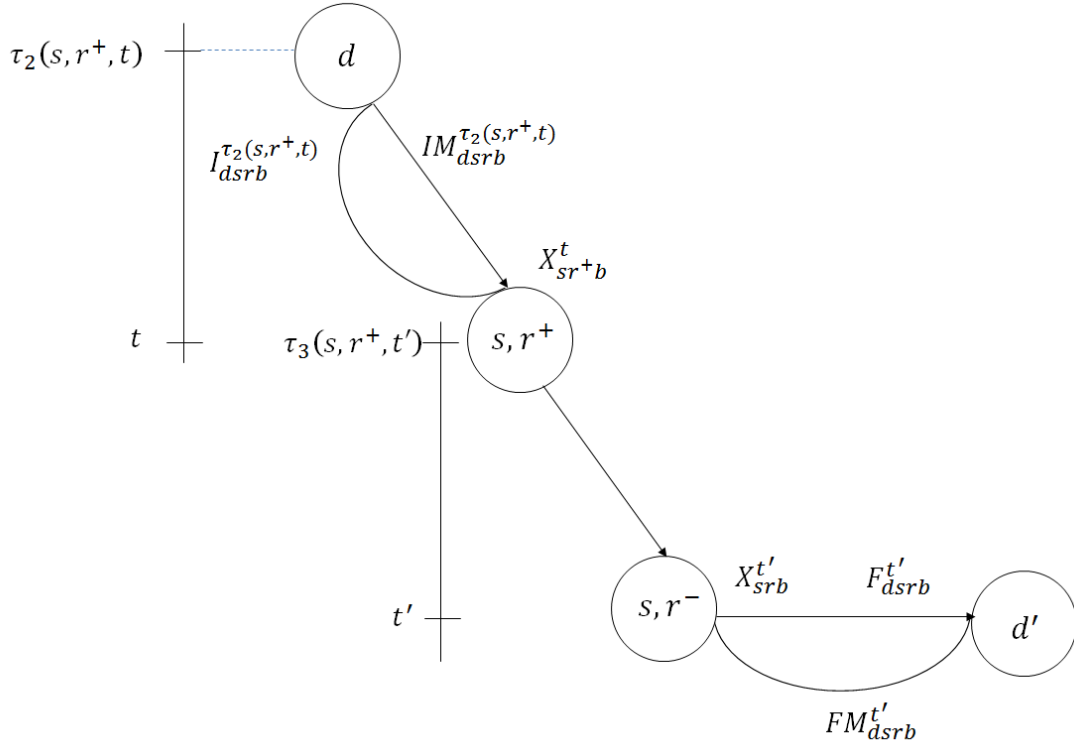


Figura 3.7: Red expandida en el tiempo: conservación en nodos de viaje.

7. Disponibilidad de buses en terminal.

Cada terminal posee una cantidad limitada de buses y cada bus solo puede tener una salida inicial en el día.

$$\sum_{(s,r,t) \in SR^+T} I_{dsrb}^t \leq 1, \quad \forall (d,b) \in D \times B, \quad (3.7)$$

8. *Satisfacer la demanda requerida.*

Esta restricción asegura que la capacidad de transporte ofrecida por hora para cada servicio-ruta, sea a lo menos la capacidad mínima estimada.

$$CapMin_{isr} \leq \sum_{b \in B} \left(\sum_{t \in h} CapBus_b \cdot X_{srb}^t \right) \leq CapMax_{isr}, \quad \forall (i, s, r) \in I \times S \times R, h \in H(i), \quad (3.8)$$

Notar que la sumatoria en el paréntesis cuenta la capacidad del bus sobre cierto intervalo de horas de funcionamiento h que pertenecen al intervalo de operación $i \in I$, donde $H(i)$ contiene todas las horas h que pertenecen al intervalo de operación i .

9. *El tiempo de salida entre buses debe ser a lo más el tiempo de Headway Máximo.*

El tiempo de espera de los usuarios es una de las variables más importantes en la calidad de servicio. Para enfrentar este problema se utiliza el *Headway Máximo*, para asegurar que el tiempo entre despachos consecutivos de buses esté acotado.

$$\sum_{b \in B} \left(\sum_{t'=t}^{t+MaxH_{srt}-1} X_{srb}^{t'} \right) \geq 1, \quad \forall (s, r, t) \in S \times R \times T \text{ tal que } t < T, \quad (3.9)$$

La restricción anterior asegura que en un intervalo $MaxH_{srt}$ exista a lo menos un viaje.

10. *El tiempo de salida entre buses debe ser a lo menos el tiempo de Headway Mínimo.*

La siguiente restricción limita la salida de buses, para así reducir la aglomeración de buses en ruta.

$$\sum_{b \in B} \left(\sum_{t'=t}^{t+MinH_{srt}-1} X_{srb}^{t'} \right) \leq 1, \quad \forall (s, r, t) \in S \times R \times T \text{ tal que } t < T, \quad (3.10)$$

11. *Viajes que no puede realizar un bus.*

Esta restricción restringe los viajes del bus b por el servicio s y ruta r .

$$X_{srb}^t = 0, \quad \forall (s, r, b, t) \in \Omega_{(s,r,b)}^t, \quad (3.11)$$

Esta restricción es impuesta, ya sea por condiciones viales (virajes muy estrechos) o exigencias de la empresa (servicios con mayor demanda solo deben operar con buses de alta capacidad de transporte).

12. *Naturaleza de las variables.*

Todas las variables del modelo son binarias.

$$I_{dsrb}^t, F_{dsrb}^t, IM_{dsrb}^t, FM_{dsrb}^t, X_{srb}^t, E_{dsrb}^t \in \{0, 1\} \quad (3.12)$$

3.2.5. Función Objetivo

En una empresa de transporte público los costos fijos más los costos operacionales corresponden a un 70 % del costo total aproximadamente. Considerando lo anterior, la función objetivo comprende la minimización de los costos fijos y operacionales asociados con la programación elegida.

La función objetivo asociada a este modelo se representa de la siguiente forma:

$$\text{mín} \quad \sum_{(d,s,r,b,t) \in DSRBT} [cf_b \cdot I_{dsrb}^t + cv_b \cdot (ds_{sr} + dr_{dsr}) \cdot (I_{dsrb}^t + IM_{dsrb}^t + F_{dsrb}^t + FM_{dsrb}^t)] \quad (3.13)$$

El costo fijo se calcula a través de las variables I , teniendo en cuenta el primer viaje de cada bus utilizado. El otro término cuantifica el costo variable de operación de flota, incluyendo el costo de realizar el viaje más la porción del viaje a puertas cerradas y sin pasajeros (en tránsitos desde y hacia terminal).

3.2.6. Resumen formulación I

$$\text{mín} \sum_{(d,s,r,b,t) \in DSRBT} [cf_b \cdot I_{dsrb}^t + cv_b \cdot (ds_{sr} + dr_{dsr}) \cdot (I_{dsrb}^t + IM_{dsrb}^t + F_{dsrb}^t + FM_{dsrb}^t)]$$

s.a.

$$\sum_{(t,r) \in TR^+} I_{dsrb}^t - \sum_{(t,r) \in TR^-} F_{dsrb}^t = 0 \quad \forall (d, s, b) \in D \times S \times B$$

$$\sum_{r \in R^-} FM_{dsrb}^{\tau_1(s,r,t)} + E_{dsb}^{t-1} = \sum_{r \in R^+} IM_{dsrb}^t + E_{dsb}^t, \quad \forall (d, s, b, t) \in D \times S \times B \times T \text{ y } t > 1$$

donde $\tau_1(s,r,t)$ satisfice $t = \tau_1(s,r,t) + ts_{sr\tau_1(s,r,t)} + tr_{dsr\tau_1(s,r,t)}$

$$E_{dsb}^0 = E_{dsb}^T = 0 \quad \forall (d, s, b) \in D \times S \times B$$

$$\sum_{d \in D} I_{dsrb}^{\tau_2(s,r,t)} + \sum_{d \in D} IM_{dsrb}^{\tau_2(s,r,t)} = X_{srb}^t \quad \forall (s, r, t, b) \in S \times R^+ \times T \times B$$

donde $\tau_2(s,r,t)$ satisfice $t = \tau_2(s,r,t) + tr_{dsr\tau_2(s,r,t)}$

$$X_{sr_1b}^{\tau_3(s,r_1,t)} = X_{sr_2b}^t \quad \forall (s, b, t) \in S \times B \times T, r_1 \in R^+, r_2 \in R^-$$

donde $\tau_3(s,r,t)$ satisfice $t = \tau_3(s,r,t) + ts_{sr\tau_3(s,r,t)}$

$$\sum_{d \in D} F_{dsrb}^t + \sum_{d \in D} FM_{dsrb}^t = X_{srb}^t \quad \forall (s, r, b, t) \in S \times R^- \times B \times T$$

$$\sum_{(s,r,t) \in SR^+T} I_{dsrb}^t \leq 1 \quad \forall (d, b) \in D \times B$$

$$CapMin_{isr} \leq \sum_{b \in B} \left(\sum_{t \in h} CapBus_b \cdot X_{srb}^t \right) \leq CapMax_{isr} \quad \forall (i, s, r) \in I \times S \times R, h \in H(i)$$

$$\sum_{b \in B} \left(\sum_{t'=t}^{t+MaxH_{srt}-1} X_{srb}^{t'} \right) \geq 1 \quad \forall (s, r, t) \in S \times R \times T \text{ tal que } t < T$$

$$\sum_{b \in B} \left(\sum_{t'=t}^{t+MinH_{srt}-1} X_{srb}^{t'} \right) \leq 1, \quad \forall (s, r, t) \in S \times R \times T \text{ tal que } t < T$$

$$X_{srb}^t = 0, \quad \forall (s, r, b, t) \in \Omega_{(s,r,b)}^t$$

$$I_{dsrb}^t, F_{dsrb}^t, IM_{dsrb}^t, FM_{dsrb}^t, X_{srb}^t \text{ y } E_{dsrb}^t \in \{0, 1\}$$

3.2.7. Consideraciones

La formulación I permite integrar las decisiones de determinación de los horarios de viaje y asignación de buses, pero tiene dos grandes dificultades. Si se considera por ejemplo la siguiente instancia:

- $|B| = 150$ buses.
- $|R| = 9$ servicios.
- $|R| = 4$ rutas.

El enfoque propuesto genera del orden de 12 millones de variables y 4,4 millones de restricciones. Adicionalmente, dado que diferentes buses pueden ser de idénticas características (capacidad de transporte y costo variable por kilómetro) el modelo tiene una inherente simetría, lo que sumado al gran tamaño del problema hace muy complejo obtener una solución de manera exacta. Para hacer frente a esta dificultad, se propone modificar la modelación anterior, redefiniendo el conjunto de los buses B , el cual representará al conjunto de los tipos de buses agrupados por características similares. De esta manera se mejora la formulación reduciendo el número de variables y restricciones y eliminando la simetría presente por buses con idénticas características. La modificación propuesta se presenta en la siguiente sección.

3.3. Formulación II

Esta formulación tiene como objetivo mejorar la formulación anterior, particularmente reduciendo el tamaño del problema y eliminando la simetría.

En la Formulación I el conjunto B esta definido sobre todos los buses. La modificación propuesta agrupa los buses de características similares (capacidad de transporte y costo variable por kilómetro). Entonces el conjunto B ahora se establece por tipo de bus y no diferencia cada bus específico. Por lo tanto es necesario modificar los parámetros y variables, de la manera que se presenta a continuación.

3.3.1. Parámetros del modelo

Se definen los siguientes parámetros:

Parámetros	Definición
ds_{sr}	Distancia total de un servicio s por la ruta r (en km).
dr_{dsr}	Distancia entre un terminal d y el comienzo de una ruta r del servicio s (en km).
ts_{srt}	Tiempo de viaje del servicio s por la ruta r si comenzó en t (en periodos de tiempo).
tr_{dsrt}	Tiempo de viaje desde el terminal d al comienzo de la ruta r del servicio s , si salió en t .
cf_b	Costo fijo de utilizar un bus del tipo b (en \$).
cv_b	Costo variable por operar un bus del tipo b (en \$/km).
$CapMin_{isr}$	Capacidad mínima por hora de oferta del servicio s por la ruta r durante el intervalo i .
$CapMax_{isr}$	Capacidad máxima por hora de oferta del servicio s por la ruta r durante el intervalo de tiempo i .
$MinH_{srt}$	Headway mínimo asociado al servicio s por la ruta r entre viajes sucesivos, con el primer viaje iniciado en el periodo t (en periodos de tiempo).
$MaxH_{srt}$	Headway máximo asociado al servicio s por la ruta r entre viajes sucesivos, con el primer viaje iniciado en el periodo t (en periodos de tiempo).
$Buses_{db}$	Número de buses del tipo b en el terminal d .
$CapBus_b$	Capacidad de transporte de pasajeros del bus tipo b (en número de pasajeros).
$\tau_{1(s,r,t)}$	Tiempo en el cual un bus debe iniciar un viaje por el servicio s y ruta $r \in \mathbb{R}_c^-$ para finalizar en periodo t .
$\tau_{2(s,r,t)}$	Tiempo en el cual un bus debe salir desde terminal para iniciar un viaje en el servicio s por la ruta $r \in \mathbb{R}_c^+$ en el periodo t .
$\tau_{3(s,r,t)}$	Tiempo en el cual un bus debe iniciar un viaje por el servicio s y ruta $r \in \mathbb{R}^+$ para finalizar en el periodo t .

Tabla 3.5: Parámetros del modelo de programación y asignación de vehículos.

Como se observa en la Tabla 3.5, se mantienen los parámetros de la Formulación I, modificando solamente la definición de los parámetros relacionados con los buses. Adicionalmente, es necesario conocer la cantidad de buses de un mismo tipo que existen en cada terminal, lo que se logra al incorporar el parámetro $Buses_{db}$.

3.3.2. Variables del modelo

Las variables utilizadas en la modelación son las siguientes:

Variable	Tipo	Definición
I_{dsrb}^t	Binario	Igual a 1 si un bus del tipo b sale desde el terminal d en el periodo t a realizar su primer viaje del día el que corresponde al servicio s por la ruta r ; igual 0, en otro caso.
IM_{dsrb}^t	Binario	Igual a 1 si un bus del tipo b sale desde el terminal d en el periodo t a realizar un viaje (pero no es el primero) del servicio s por la ruta r ; igual 0, en otro caso.
F_{dsrb}^t	Binario	Igual a 1 si un bus del tipo b se dirige a terminal d luego de finalizar su último viaje del día, el que corresponde al servicio s por la ruta r que comenzó en el periodo t ; igual a 0, en otro caso.
FM_{dsrb}^t	Binario	Igual a 1 si un bus del tipo b se dirige a terminal d luego de finalizar un viaje, del servicio s por la ruta r que comenzó en el periodo t ; igual a 0, en otro caso.
X_{srb}^t	Binario	Igual a 1 si un bus del tipo b comienza un viaje en el servicio s por la ruta r en el instante t ; igual a 0, en otro caso.
E_{dsb}^t	Entero	Número de buses del tipo b asignados al servicio s , que están esperando en el terminal d entre el periodo t to $t + 1$.

Tabla 3.6: Variables del modelo de diseño de programación y asignación de vehículos.

Las variables utilizadas son las mismas de la Formulación I, por lo que se conserva la estructura de red expandida en el tiempo para la planificación de viajes, siendo solo necesario redefinir las variables. La mayor modificación se produce en la variable E_{dsb}^t , que en este caso ya no es binaria, sino que se transforma en entera, al considerar en este nuevo modelo la cantidad de buses de un mismo tipo b asignados al servicio s , que están esperando en el terminal d entre el periodo t a $t + 1$, y no identificar a un bus en particular.

3.3.3. Restricciones

Las restricciones de la Formulación I se conservan, pero es necesario realizar modificaciones que se explicarán a continuación.

1. *Conservación de la estructura de buses en cada Terminal.*

La siguiente restricción asegura que la cantidad total de salidas iniciales realizadas por un determinado tipo de bus desde un terminal a algún servicio, regresen al terminal correspondiente luego de culminar su operación.

$$\sum_{(t,r) \in TR^+} I_{dsrb}^t - \sum_{(t,r) \in TR^-} F_{dsrb}^t = 0, \quad \forall (d, s, b) \in D \times S \times B \quad (3.14)$$

2. *Conservación de flujo de buses en terminal.*

Una de las particularidades del modelo es que contabiliza los buses esperando en terminal, donde se encuentran en estado de espera hasta realizar su siguiente salida. La restricción 3.15 asegura esta condición, conservando el flujo en los nodos de transbordo.

$$\sum_{r \in R^-} FM_{dsrb}^{\tau_1(s,r,t)} + E_{dsb}^{t-1} = \sum_{r \in R^+} IM_{dsrb}^t + E_{dsb}^t, \quad \forall (d, s, b, t) \in D \times S \times B \times T \text{ y } t > 1 \quad (3.15)$$

donde $\tau_1(s,r,t)$ satisface $t = \tau_1(s,r,t) + t s_{sr\tau_1(s,r,t)} + t r_{dsr\tau_1(s,r,t)}$

Para un terminal de transbordo específico d y un periodo de tiempo t , el lado izquierdo de la restricción cuantifica los buses que esperan a partir del periodo anterior más los buses procedentes de un viaje que culminará en el tiempo t . El lado derecho incluye los buses que permanecen en el terminal durante otro periodo (hasta $t + 1$ por lo menos), más los buses que salen del terminal para iniciar otro viaje en t .

3. *Al inicio y al final de la operación no existen buses esperando en terminal.*

$$E_{dsb}^0 = E_{dsb}^T = 0, \quad \forall (d, s, b) \in D \times S \times B \quad (3.16)$$

4. *Cada viaje que se inicia debe realizarse por un solo bus.*

Si existe un viaje este efectivamente debe realizarse por un bus específico. Para lograr esta condición se relaciona la variable de decisión del horario de inicio de viaje desde el Cabezal 1 con la variable de asignación de buses que salen desde terminal a realizar un viaje, logrando que una salida de un bus de cierto tipo deba efectivamente realizarse por un bus específico de ese tipo.

$$\sum_{d \in D} I_{dsrb}^{\tau_2(s,r,t)} + \sum_{d \in D} IM_{dsrb}^{\tau_2(s,r,t)} = X_{srb}^t, \quad \forall (s, r, t, b) \in S \times R^+ \times T \times B \quad (3.17)$$

donde $\tau_2(s,r,t)$ satisface $t = \tau_2(s,r,t) + tr_{dsr\tau_2(s,r,t)}$

5. *Cada viaje que se realiza recorre ambas rutas del servicio.*

$$X_{sr_1b}^{\tau_3(s,r_1,t)} = X_{sr_2b}^t, \quad \forall (s, b, t) \in S \times B \times T, \quad r_1 \in R^+, \quad r_2 \in R^- \quad (3.18)$$

donde $\tau_3(s,r,t)$ satisface $t = \tau_3(s,r,t) + ts_{sr\tau_3(s,r,t)}$

6. *Cada viaje iniciado debe regresar a terminal.*

$$\sum_{d \in D} F_{dsrb}^t + \sum_{d \in D} FM_{dsrb}^t = X_{srb}^t, \quad \forall (s, r, b, t) \in S \times R^- \times B \times T \quad (3.19)$$

7. *Cantidad disponible de buses por tipo en Terminal.*

Cada terminal posee una cantidad limitada de buses por tipo, por lo que no pueden existir más salidas iniciales que los buses disponibles por tipo que posee cada terminal.

$$\sum_{(s,r,t) \in SR^+T} I_{dsrb}^t \leq Buses_{db}, \quad \forall (d, b) \in D \times B \quad (3.20)$$

8. *Satisfacer la demanda requerida.*

$$CapMin_{isr} \leq \sum_{b \in B} \left(\sum_{t \in h} CapBus_b \cdot X_{srb}^t \right) \leq CapMax_{isr}, \quad \forall (i, s, r) \in I \times S \times R, \quad h \in H(i), \quad (3.21)$$

9. El tiempo de salida entre buses debe ser a lo más el tiempo de Headway Máximo.

$$\sum_{b \in B} \left(\sum_{t'=t}^{t+MaxH_{srt}-1} X_{srb}^{t'} \right) \geq 1, \quad \forall (s, r, t) \in S \times R \times T \text{ tal que } t < T, \quad (3.22)$$

10. El tiempo de salida entre buses debe ser a lo menos el tiempo de Headway Mínimo.

$$\sum_{b \in B} \left(\sum_{t'=t}^{t+MinH_{srt}-1} X_{srb}^{t'} \right) \leq 1, \quad \forall (s, r, t) \in S \times R \times T \text{ tal que } t < T, \quad (3.23)$$

11. Viajes que no puede realizar un determinado tipo de bus.

$$X_{srb}^t = 0, \quad \forall (s, r, b, t) \in \Omega_{(s,r,b)}^t, \quad (3.24)$$

12. Naturaleza de las variables.

$$I_{dsrb}^t, F_{dsrb}^t, IM_{dsrb}^t, FM_{dsrb}^t, X_{srb}^t, Y_{srb}^t \in \{0, 1\} \text{ y } E_{dsrb}^t \in Z_0^+ \quad (3.25)$$

3.3.4. Función Objetivo

La función objetivo comprende la minimización de los costos fijos y operacionales asociados con la programación elegida y se representa de la siguiente manera:

$$\text{mín} \sum_{(d,s,r,b,t) \in DSRBT} [cf_b \cdot I_{dsrb}^t + cv_b \cdot (ds_{sr} + dr_{dsr}) \cdot (I_{dsrb}^t + IM_{dsrb}^t + F_{dsrb}^t + FM_{dsrb}^t)] \quad (3.26)$$

3.3.5. Resumen formulación II

$$\text{mín} \quad \sum_{(d,s,r,b,t) \in DSRBT} [cf_b \cdot I_{dsrb}^t + cv_b \cdot (ds_{sr} + dr_{dsr}) \cdot (I_{dsrb}^t + IM_{dsrb}^t + F_{dsrb}^t + FM_{dsrb}^t)]$$

s.a.

$$\sum_{(t,r) \in TR^+} I_{dsrb}^t - \sum_{(t,r) \in TR^-} F_{dsrb}^t = 0 \quad \forall (d, s, b) \in D \times S \times B$$

$$\sum_{r \in R^-} FM_{dsrb}^{\tau_1(s,r,t)} + E_{dsb}^{t-1} = \sum_{r \in R^+} IM_{dsrb}^t + E_{dsb}^t, \quad \forall (d, s, b, t) \in D \times S \times B \times T \text{ y } t > 1$$

Donde $\tau_1(s,r,t)$ satisface $t = \tau_1(s,r,t) + ts_{sr\tau_1(s,r,t)} + tr_{dsr\tau_1(s,r,t)}$

$$E_{dsb}^0 = E_{dsb}^T = 0 \quad \forall (d, s, b) \in D \times S \times B$$

$$\sum_{d \in D} I_{dsrb}^{\tau_2(s,r,t)} + \sum_{d \in D} IM_{dsrb}^{\tau_2(s,r,t)} = X_{srb}^t \quad \forall (s, r, t, b) \in S \times R^+ \times T \times B$$

Donde $\tau_2(s,r,t)$ satisface $t = \tau_2(s,r,t) + tr_{dsr\tau_2(s,r,t)}$

$$X_{sr_1b}^{\tau_3(s,r_1,t)} = X_{sr_2b}^t \quad \forall (s, b, t) \in S \times B \times T, r_1 \in R^+, r_2 \in R^-$$

Donde $\tau_3(s,r,t)$ satisface $t = \tau_3(s,r,t) + ts_{sr\tau_3(s,r,t)}$

$$\sum_{d \in D} F_{dsrb}^t + \sum_{d \in D} FM_{dsrb}^t = X_{srb}^t \quad \forall (s, r, b, t) \in S \times R^- \times B \times T$$

$$\sum_{(s,r,t) \in SR^+T} I_{dsrb}^t \leq Buses_{db} \quad \forall (d, b) \in D \times B$$

$$CapMin_{isr} \leq \sum_{b \in B} \left(\sum_{t \in h} CapBus_b \cdot X_{srb}^t \right) \leq CapMax_{isr} \quad \forall (i, s, r) \in I \times S \times R, h \in H(i)$$

m

$$\sum_{b \in B} \left(\sum_{t'=t}^{t+MaxH_{srt}-1} X_{srb}^{t'} \right) \geq 1 \quad \forall (s, r, t) \in S \times R \times T \text{ tal que } t < T$$

$$\sum_{b \in B} \left(\sum_{t'=t}^{t+MinH_{srt}-1} X_{srb}^{t'} \right) \leq 1, \quad \forall (s, r, t) \in S \times R \times T \text{ tal que } t < T$$

$$X_{srb}^t = 0, \quad \forall (s, r, b, t) \in \Omega_{(s,r,b)}^t$$

$$I_{dsrb}^t, F_{dsrb}^t, IM_{dsrb}^t, FM_{dsrb}^t, X_{srb}^t \in \{0, 1\} \text{ y } E_{dsrb}^t \in Z_0^+$$

3.3.6. Consideraciones

La nueva formulación a diferencia de la anterior, no entrega un itinerario para cada uno de los buses en el día, debido a que los buses son agrupados por similitud (misma capacidad de transporte y costo variable por kilómetro). Dada esta modificación la salida de esta propuesta consiste en la cantidad de buses por tipo asignados a cada servicio y los viajes que deben realizar estos buses, sin embargo, los viajes no quedan asignados a un bus particular. Luego en un instante de tiempo $t \in T$ y en un nodo de transbordo del servicio $s \in S$ podrían existir varios buses de un mismo tipo esperando para realizar el siguiente viaje y el despachador podría eventualmente elegir cualquiera de ellos en este punto. Para solucionar esta ambigüedad, es necesario definir un criterio de asignación que permita establecer que viajes realiza un determinado bus, para lo cual se realiza un procedimiento que se denota BTA, el cual será explicado en la sección 3.6.

Una de las falencias de ambas formulaciones (I y II) , corresponde a que un bus siempre debe recorrer ambas rutas del servicio, lo que en la práctica no es eficiente, ya que al inicio de la jornada de operación varios buses se dirigen a posicionarse al cabezal 2 directamente, para volver a terminal por la ruta de circulación. Otro caso ocurre cuando existen desbalances de demanda por las rutas de un servicio en un mismo periodo, donde la ruta con más demanda requiere una cantidad mayor de buses circulando. Para hacer frente a esto, se debe incorporar una estrategia de asignación de flota, modificación que se detalla en la siguiente sección.

3.4. Formulación III

Las formulaciones anteriores no permiten que el bus realice una sola ruta del servicio y vuelva a terminal, por lo que si el servicio presenta desbalances de demanda y elevados tiempos de ciclo, la solución obtenida puede no ser la óptima en términos de la flota necesaria para cumplir los viajes. Los desbalances se observan principalmente en horarios puntas, y en lugares geográficos donde en la mañana los usuarios se dirigen de la periferia al centro y en la tarde del centro a la periferia; este fenómeno se puede apreciar en la Figura 3.8.

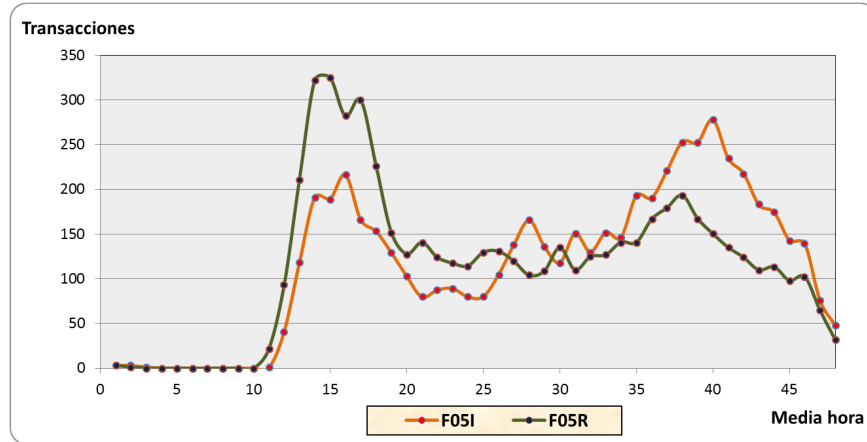


Figura 3.8: Demanda promedio por media hora del servicio F05 en Junio 2012.

Se propone modificar el modelo incorporando una estrategia de asignación de flota, particularmente la estrategia de *deadheading* como la utilizada en Cortes et al. (2011), la cual consiste en permitir a los buses realizar rutas a puertas cerradas y sin pasajeros (lo que se conoce como en “tránsito a servicio”), para así disminuir los tiempos de viaje entre puntos y lograr una mayor disponibilidad de los buses para servir la ruta con mayor demanda. Es importante señalar que este tipo de rutas son no comerciales, por lo que los kilómetros recorridos no generan ingresos por concepto de PK y el operador debe asumir estos costos de forma íntegra, en beneficio de un mejor servicio.

Considerando como ejemplo el servicio F05, en la Figura 3.9 se visualizan dos rutas: la de color rojo corresponde a la ruta de circulación en el sentido *Cabezal 2-Cabezal 1-Teminal* (desde el círculo rojo al verde). La ruta de color amarillo corresponde a la ruta de *deadheading* en el sentido *Terminal-Cabezal 2* (desde círculo verde al rojo).

La ruta de *deadheading* se dirige a través de ejes principales lo que se aprecia en la Figura 3.9, particularmente utilizando autopista Acceso Sur y posteriormente autopista Vespucio Sur, donde ambas vías son de alta velocidad².

²A velocidades mayores a 60 km/hr el bus pierde transmisión GPS

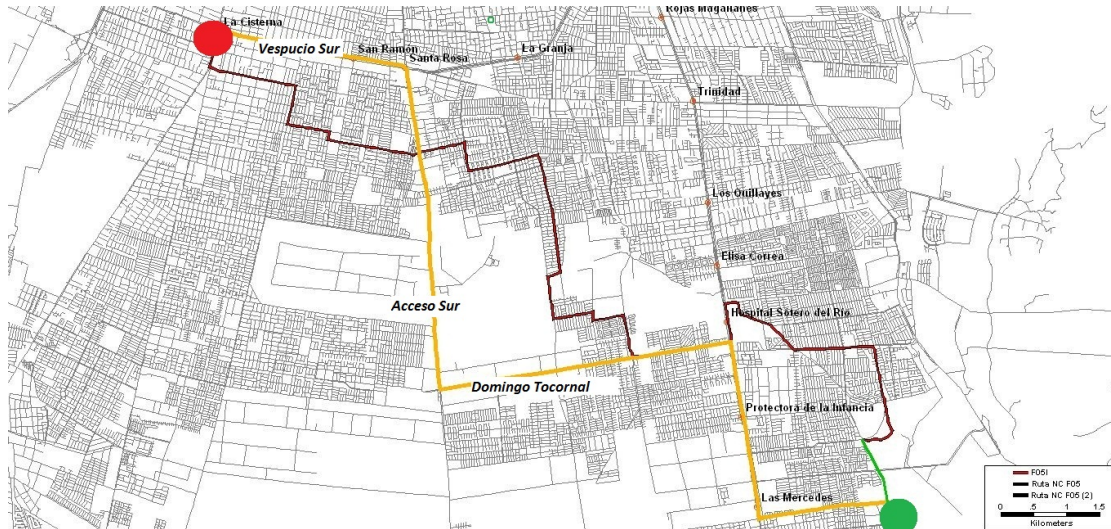


Figura 3.9: Ruta de tránsito y ruta de deadheading.

Es importante destacar que la ruta de *deadheading* podría ser la misma que la ruta de circulación, ya que como esta se realiza a puertas cerradas y sin la toma de pasajeros, la velocidad del viaje aumenta considerablemente. El aumento de la velocidad proviene del gran número de paradas que tiene una ruta de circulación, donde existe una parada cada 250 mts aproximadamente como se visualiza en la Figura 3.10.

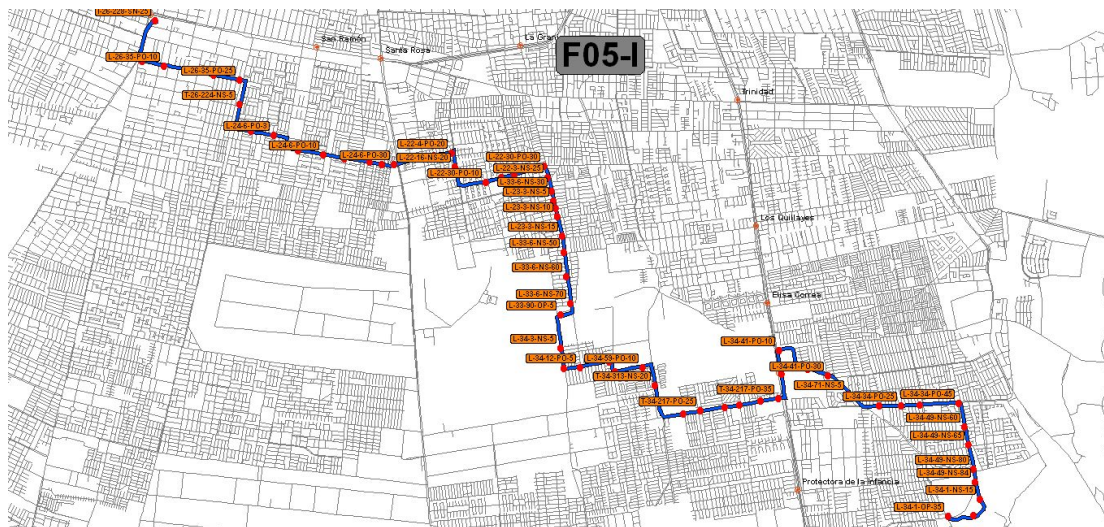


Figura 3.10: Paradas servicio sentido F05-I.

El generar una ruta alternativa proviene básicamente de dos motivos:

1. Rutas que utilicen vías rápidas con un nivel de congestión menor al de la ruta comercial, inclusive si la distancia es mayor, ya que el objetivo es disminuir los tiempos de viaje.
2. No generar molestia en los usuarios que están esperando en los paraderos, ya que el ver pasar buses que no paran les causa malestar y perciben el servicio de peor manera.

Para desarrollar el modelo propuesto se agregan 2 rutas a cada servicio, las cuales unen ambos cabezales de cada servicio como se observa en la siguiente Figura:

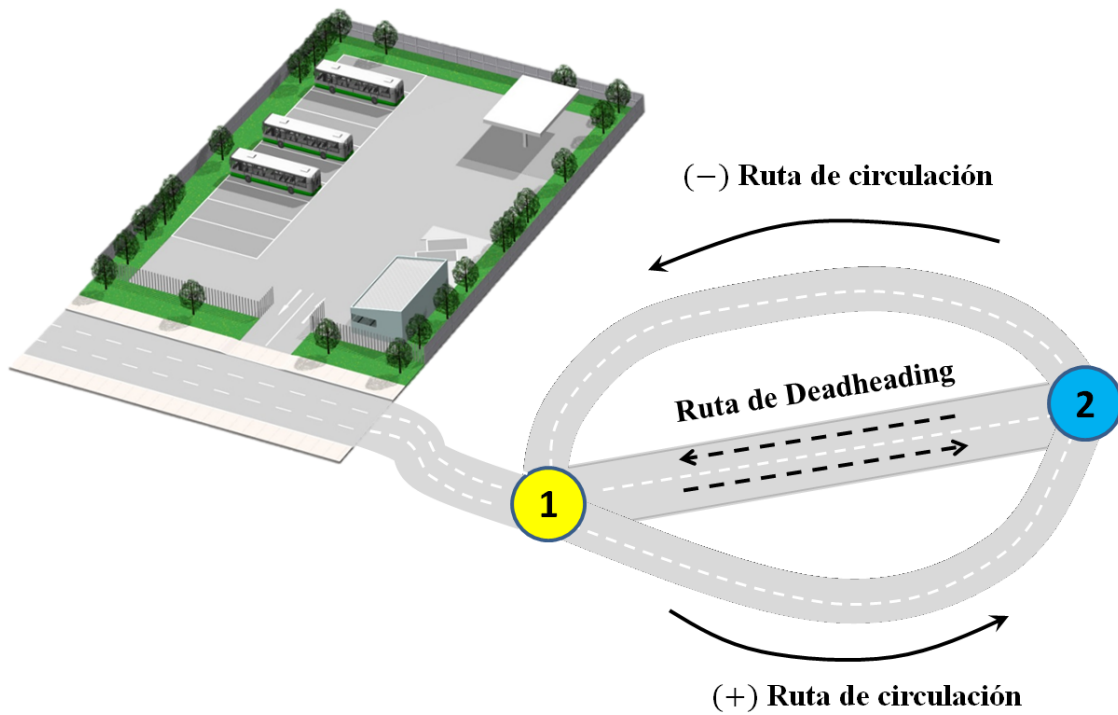


Figura 3.11: Visualización de un servicio.

A continuación se presentan los elementos de la formulación propuesta, que se trata de una modificación a la Formulación II, pero donde se incorpora la estrategia de *deadheading*.

3.4.1. Conjuntos

Para desarrollar este modelo, es necesario agregar los siguientes conjuntos de índices a los ya definidos en la Formulación II:

Índice	Definición
R_d^+	Conjunto de rutas de deadheading Terminal \rightarrow Cabezal 1 \rightarrow Cabezal 2.
R_d^-	Conjunto de rutas de deadheading Cabezal 2 \rightarrow Cabezal 1 \rightarrow Terminal.
R_c^+	Conjunto de rutas que salen desde terminal, es decir $R^+ \cup R_d^+$.
R_c^-	Conjunto de rutas que salen desde el cabezal 2, es decir $R^- \cup R_d^-$.
R_v	Conjunto de rutas de circulación, es decir $R^+ \cup R^-$.
R	Conjunto de rutas totales, es decir $R_c^+ \cup R_c^-$.

Tabla 3.7: Conjuntos de índices del modelo III.

En la figura 3.12 se observan las trayectorias de los conjuntos de rutas para un servicio particular. Las líneas sólidas corresponden a viajes entre cabezales y las líneas punteadas corresponden a viajes a puertas cerradas y sin pasajeros.

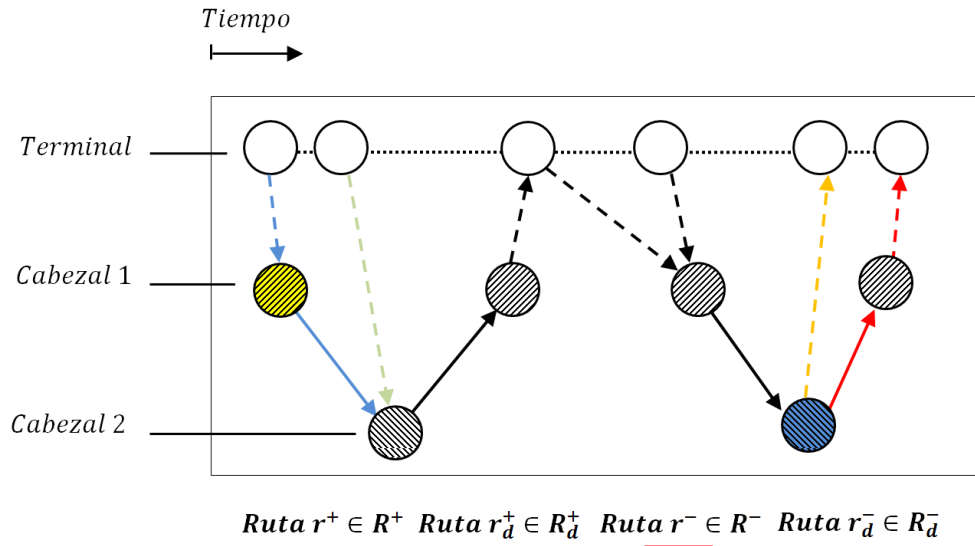


Figura 3.12: Trayectorias asociadas a conjuntos de rutas.

3.4.2. Parámetros, Variables y Función Objetivo

Los parámetros y variables son los mismos que en la formulación anterior, al igual que la estructura de red expandida en el tiempo para la planificación de viajes y la función objetivo.

3.4.3. Restricciones

Dado que esta formulación utiliza la estrategia de *deadheading*, es necesario modificar e incorporar restricciones a la Formulación II, las cuales se explican a continuación.

1. *Conservación de la estructura de buses en cada Terminal.*

La siguiente restricción asegura que la cantidad total de salidas iniciales realizadas por un determinado tipo de bus desde un terminal a algún servicio, regresen al terminal correspondiente luego de culminar su operación.

$$\sum_{(t,r) \in TR_c^+} I_{dsrb}^t - \sum_{(t,r) \in TR_c^-} F_{dsrb}^t = 0, \quad \forall (d, s, b) \in D \times S \times B \quad (3.27)$$

Como se observa en este caso se consideran tanto las salidas y llegadas por rutas de circulación como de *deadheading*.

2. *Conservación de flujo de buses en terminal.*

$$\sum_{r \in R_c^-} FM_{dsrb}^{\tau_{1(s,r,t)}} + E_{dsb}^{t-1} = \sum_{r \in R_c^+} IM_{dsrb}^t + E_{dsb}^t, \quad \forall (d, s, b, t) \in D \times S \times B \times T \text{ tal que } t > 1 \quad (3.28)$$

donde $\tau_{1(s,r,t)}$ satisface $t = \tau_{1(s,r,t)} + t_{sr\tau_{1(s,r,t)}} + t_{dsr\tau_{1(s,r,t)}}$

Para un terminal de transbordo específico d y un periodo de tiempo t , el lado izquierdo de la restricción cuantifica los buses que esperan a partir del periodo anterior más los buses procedentes de un viaje que terminará en el tiempo t , considerando ahora que los viajes pueden volver tanto por una ruta de circulación, como por una de *deadheading*. El lado derecho incluye los buses que permanecen en el terminal durante otro periodo

(hasta $t + 1$ por lo menos), más los buses que salen del terminal para iniciar otro viaje en t ; la Figura 3.13 muestra la conservación en un terminal como parte de la red.

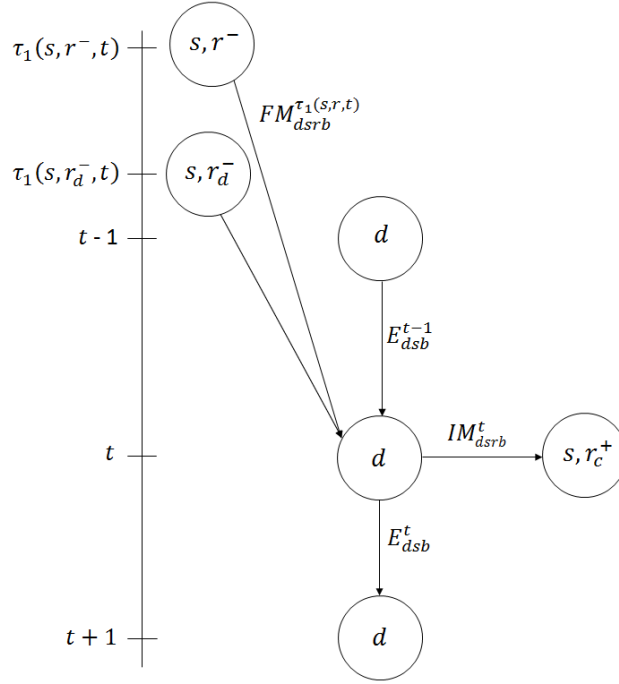


Figura 3.13: Conservación en nodo terminal.

3. Al inicio y al final de la operación no existen buses esperando en terminal.

$$E_{dsb}^0 = E_{dsb}^T = 0, \quad \forall (d, s, b) \in D \times S \times B \quad (3.29)$$

4. Cada viaje que se inicia debe realizarse por un solo bus.

$$\sum_{d \in D} I_{dsrb}^{T_2(s,r,t)} + \sum_{d \in D} IM_{dsrb}^{T_2(s,r,t)} = X_{srb}^t, \quad \forall (s, r, t, b) \in S \times R_c^+ \times T \times B \quad (3.30)$$

donde $\tau_2(s,r,t)$ satisface $t = \tau_2(s,r,t) + tr_{dsr\tau_2(s,r,t)}$

5. Cada viaje que recorre la ruta de circulación (+), puede volver a terminal por la ruta de circulación (-) o directamente haciendo deadheading.

Esta restricción permite decidir si el bus vuelve por la ruta de circulación realizando el servicio o a través de la ruta de *deadheading*.

$$X_{sr_1b}^{\tau_3(s,r_1,t)} = \sum_{r_2 \in R_c^-} X_{sr_2b}^t, \quad \forall (s, b, t) \in S \times B \times T, \quad r_1 \in R^+ \quad (3.31)$$

donde $\tau_3(s,r,t)$ satisface $t = \tau_3(s,r,t) + t_{sr\tau_3(s,r,t)}$

6. *Un bus puede llegar al Cabezal 2 por la ruta de deadheading.*

Esta restricción permite que un bus se dirija al Cabezal 2 de forma directa a través de la ruta de *deadheading* para posteriormente volver por la ruta de circulación (-).

$$X_{sr_3b}^{\tau_3(s,r_3,t)} = X_{sr_4b}^t, \quad \forall (s, b, t) \in S \times B \times T, \quad r_3 \in R_d^+, \quad r_4 \in R^- \quad (3.32)$$

donde $\tau_3(s,r,t)$ satisface $t = \tau_3(s,r,t) + t_{sr\tau_3(s,r,t)}$

7. *Cada viaje iniciado debe regresar a terminal .*

Cada viaje iniciado debe volver a terminal, y lo puede hacer a través de la ruta de circulación (-) o por la ruta de *deadheading* (-).

$$\sum_{d \in D} F_{dsrb}^t + \sum_{d \in D} FM_{dsrb}^t = X_{srb}^t, \quad \forall (s, r, b, t) \in S \times R_c^- \times B \times T \quad (3.33)$$

La Figura 3.14 muestra la conservación en los nodos de viaje de la red representada por las restricciones (3.30),(3.30),(3.32) y (3.33).

8. *Cantidad disponible de buses por tipo en Terminal.*

$$\sum_{(s,r,t) \in SR_c^+ T} I_{dsrb}^t \leq Buses_{db}, \quad \forall (d, b) \in D \times B \quad (3.34)$$

9. *Satisfacer la demanda requerida.*

$$CapMin_{isr} \leq \sum_{b \in B} \left(\sum_{t \in h} CapBus_b \cdot X_{srb}^t \right) \leq CapMax_{isr}, \quad \forall (i, s, r) \in I \times S \times R_v, \quad h \in H(i), \quad (3.35)$$

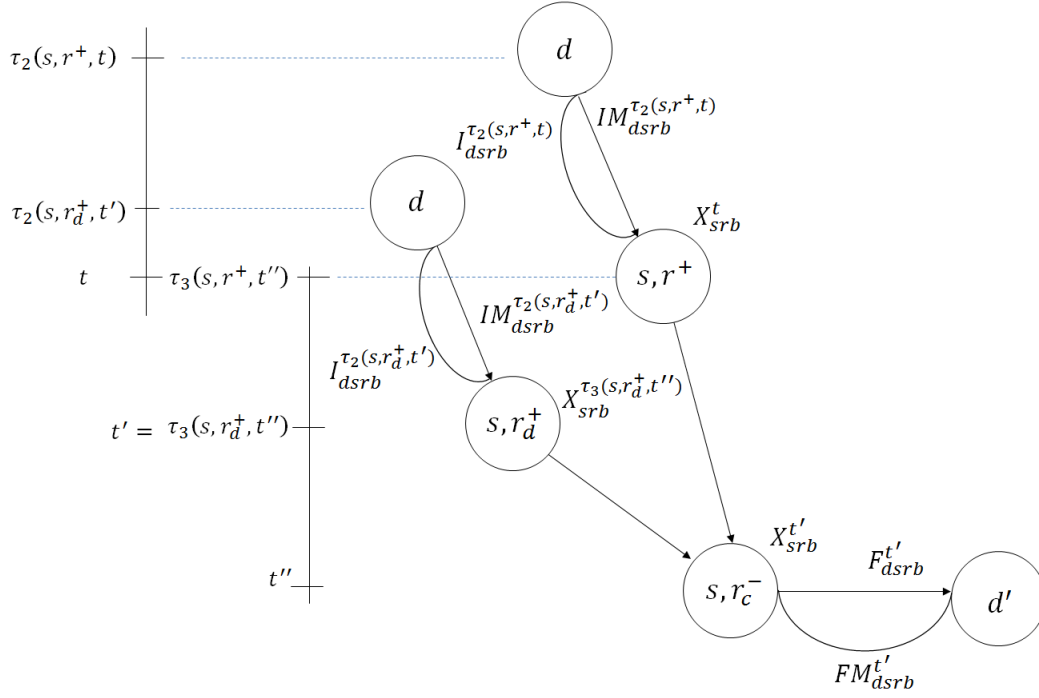


Figura 3.14: Conservación en nodos de viaje.

10. El tiempo de salida entre buses debe ser a lo más el tiempo de Headway Máximo.

$$\sum_{b \in B} \left(\sum_{t'=t}^{t+MaxH_{srt}-1} X_{srb}^{t'} \right) \geq 1, \quad \forall (s, r, t) \in S \times R_v \times T \text{ tal que } t < T, \quad (3.36)$$

11. El tiempo de salida entre buses debe ser a lo menos el tiempo de Headway Mínimo.

$$\sum_{b \in B} \left(\sum_{t'=t}^{t+MinH_{srt}-1} X_{srb}^{t'} \right) \leq 1, \quad \forall (s, r, t) \in S \times R_v \times T \text{ tal que } t < T, \quad (3.37)$$

12. Viajes que no puede realizar un determinado tipo de bus.

$$X_{srb}^t = 0, \quad \forall (s, r, b, t) \in \Omega_{(s,r,b)}^t, \quad (3.38)$$

13. Naturaleza de las variables.

$$I_{dsrb}^t, F_{dsrb}^t, IM_{dsrb}^t, FM_{dsrb}^t, X_{srb}^t, Y_{srb}^t \in \{0, 1\} \text{ y } E_{dsrb}^t \in Z_0^+ \quad (3.39)$$

3.4.4. Resumen formulación III

$$\text{mín} \sum_{(d,s,r,b,t) \in DSRBT} [cf_b \cdot I_{dsrb}^t + cv_b \cdot (ds_{sr} + dr_{dsr}) \cdot (I_{dsrb}^t + IM_{dsrb}^t + F_{dsrb}^t + FM_{dsrb}^t)]$$

s.a.

$$\sum_{(t,r) \in TR_c^+} I_{dsrb}^t - \sum_{(t,r) \in TR_c^-} F_{dsrb}^t = 0 \quad \forall (d, s, b) \in D \times S \times B$$

$$\sum_{r \in R_c^-} FM_{dsrb}^{\tau_1(s,r,t)} + E_{dsb}^{t-1} = \sum_{r \in R_c^+} IM_{dsrb}^t + E_{dsb}^t, \quad \forall (d, s, b, t) \in D \times S \times B \times T \text{ y } t > 1$$

donde $\tau_1(s,r,t)$ satisfice $t = \tau_1(s,r,t) + ts_{sr\tau_1(s,r,t)} + tr_{dsr\tau_1(s,r,t)}$

$$E_{dsb}^0 = E_{dsb}^T = 0 \quad \forall (d, s, b) \in D \times S \times B$$

$$\sum_{d \in D} I_{dsrb}^{\tau_2(s,r,t)} + \sum_{d \in D} IM_{dsrb}^{\tau_2(s,r,t)} = X_{srb}^t \quad \forall (s, r, t, b) \in S \times R_c^+ \times T \times B$$

donde $\tau_2(s,r,t)$ satisfice $t = \tau_2(s,r,t) + tr_{dsr\tau_2(s,r,t)}$

$$X_{sr_1b}^{\tau_3(s,r_1,t)} = \sum_{r_2 \in R_c^-} X_{sr_2b}^t \quad \forall (s, b, t) \in S \times B \times T, r_1 \in R^+$$

donde $\tau_3(s,r,t)$ satisfice $t = \tau_3(s,r,t) + ts_{sr\tau_3(s,r,t)}$

$$X_{sr_3b}^{\tau_3(s,r_3,t)} = X_{sr_4b}^t, \quad \forall (s, b, t) \in S \times B \times T, r_3 \in R_d^+, r_4 \in R^-$$

donde $\tau_3(s,r,t)$ satisfice $t = \tau_3(s,r,t) + ts_{sr\tau_3(s,r,t)}$

$$\sum_{d \in D} F_{dsrb}^t + \sum_{d \in D} FM_{dsrb}^t = X_{srb}^t \quad \forall (s, r, b, t) \in S \times R_c^- \times B \times T$$

$$\sum_{(s,r,t) \in SR^+T} I_{dsrb}^t \leq Buses_{db} \quad \forall (d, b) \in D \times B$$

$$CapMin_{isr} \leq \sum_{b \in B} \left(\sum_{t \in h} CapBus_b \cdot X_{srb}^t \right) \leq CapMax_{isr} \quad \forall (i, s, r) \in I \times S \times R_v, h \in H(i)$$

$$\sum_{b \in B} \left(\sum_{t'=t}^{t+MaxH_{srt}-1} X_{srb}^{t'} \right) \geq 1 \quad \forall (s, r, t) \in S \times R_v \times T \text{ tal que } t < T$$

$$\sum_{b \in B} \left(\sum_{t'=t}^{t+MinH_{srt}-1} X_{srb}^{t'} \right) \leq 1, \quad \forall (s, r, t) \in S \times R_v \times T \text{ tal que } t < T$$

$$X_{srb}^t = 0, \quad \forall (s, r, b, t) \in \Omega_{(s,r,b)}^t$$

$$I_{dsrb}^t, F_{dsrb}^t, IM_{dsrb}^t, FM_{dsrb}^t, X_{srb}^t \in \{0, 1\} \text{ y } E_{dsrb}^t \in Z_0^+$$

Los modelos presentados en las secciones anteriores, permiten integrar la etapa del *timetabling* y la asignación de buses, incorporando simultáneamente varias restricciones de calidad como rangos de frecuencia, capacidad y *headways* por periodo. Adicionalmente se incorporó la estrategia de *deadheading* a la Formulación III para lograr ajustar de forma eficiente la oferta a la demanda.

La flota mínima necesaria para cumplir un itinerario de salidas, en gran medida está determinada por los tiempos de viaje considerando un cierto nivel de demanda a satisfacer. Adicionalmente, es importante destacar que un 70 % de los ingresos de la empresa depende de la demanda, por lo que definir estos parámetros son decisiones claves. Para tratar con lo anterior se desarrollaron dos metodologías las cuales se exponen a continuación.

3.5. Estimación de parámetros

3.5.1. Parámetros de capacidad de transporte a ofertar

La cantidad de expediciones a realizar en un bloque horario particular, depende en gran medida del número de personas que se deben transportar. Es por tal motivo que es necesario obtener la demanda de usuarios para cada servicio, ruta y media hora de operación, procedimiento que se explicará a continuación.

Todas las transacciones Bip! del sistema son registradas en una base de datos que contiene información sobre el operador, número de tarjeta, tipo de tarjeta Bip!, hora, fecha, monto y la placa patente donde se realizó la transacción. Además, a través de los dispositivos GPS que integran los buses, es posible obtener su localización geográfica y además la asignación del servicio y ruta que ejecuta para cada expedición. Con la información anterior se realiza un *matching* entre la información de las transacciones (fecha-hora y patente) con la asignación del bus en ese instante (fecha-hora, servicio y ruta), obteniendo una base de datos con la demanda agrupada por servicio-ruta y cada media hora dentro del día para cada día registrado.

Actualmente no existe una metodología para definir la capacidad de transporte a ofrecer para cada servicio-ruta y media hora de operación. En esta Tesis se propone un procedimiento basado en la aplicación de una regresión sobre la muestra de datos. La muestra de datos contiene información muy ruidosa, debido a que el tiempo de llegada de los usuarios a los paraderos y el rendimiento de indicadores de frecuencia y regularidad es distinto todos los días. Lo anterior se debe a que la operación real depende de la cantidad de buses y conductores disponibles, lo que genera variaciones en los tiempos de espera de los usuarios. Con el objetivo de eliminar estas irregularidades, se aplica una suavización mediante el uso de una regresión tipo Kernel (Nadaraya y Watson, 1964), la cual es una técnica no paramétrica para estimar la esperanza condicional de una variable aleatoria $E(Y|X = x)$, donde la estimación se logra a través de una función de ponderación o Kernel definido como $K_\lambda(x_o, x_i)$, la cual asigna un peso a cada x_i basado en la distancia a x_o como se ilustra en la Figura 3.15.

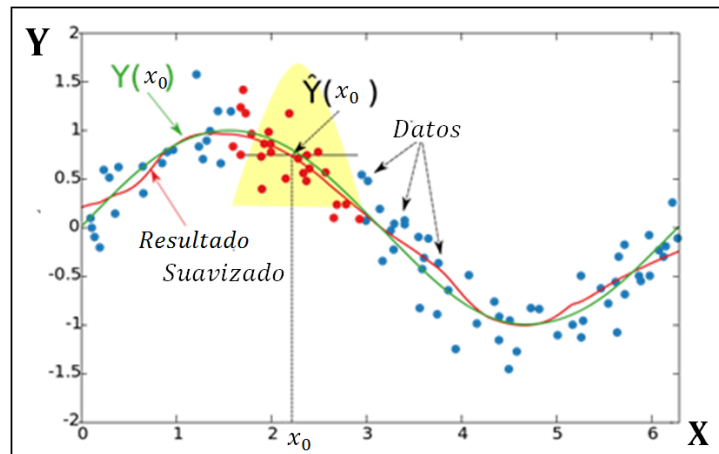


Figura 3.15: Regresión Kernel sobre una muestra de datos.

Se utiliza el estimador propuesto por Nadaraya y Watson (1964), el cual estima la esperanza condicional como un promedio ponderado localmente, utilizando un Kernel como función de ponderación. El estimador de Nadaraya-Watson se define de la siguiente manera:

$$\hat{Y}(x_0) = \frac{\sum_i K_\lambda(x_o, x_i) y_i}{\sum_i K_\lambda(x_o, x_i)}$$

donde $K_\lambda(x_o, x_i) = D \left(\frac{|x - x_0|}{h_\lambda(x_0)} \right)$

La función D corresponde en este caso a un kernel Gaussiano $D(t) = \frac{\exp(-\frac{t^2}{2})}{\sqrt{2 \cdot \pi}}$ y el parámetro $h_\lambda(x_0)$ el cual corresponde al ancho de banda o distancias a los vecinos y particularmente para un Kernel Gaussiano $h_\lambda(x_0)$ corresponde a la desviación estándar. Es importante mencionar que un valor muy bajo de $h_\lambda(x)$ (por ejemplo 0.1) genera una curva poco suave (*overfitting*) y un valor grande (por ejemplo 2) una curva muy suavizada (*underfitting*).

Los contratos de concesión señalan que la oferta en plazas, para cada servicio-ruta-período, debe lograr que el hacinamiento en los buses no sobrepase cierto umbral para así entregar una mejor calidad de servicio al usuario. El umbral es definido como la demanda estimada multiplicado por 118%. Lo anterior es correcto, pero no contempla uno de los grandes problemas del Transantiago desde sus inicios, el que corresponde a la evasión. Para incluir la evasión, se utilizan los datos obtenidos por el DICTUC en el año 2012 para cada servicio-ruta, diferenciando la evasión en 3 períodos los que corresponden a horarios punta y valle. Con los casos expuestos anteriormente se generan 3 curvas las que corresponden a demanda, demanda por contrato y demanda por contrato más evasión, donde esta última es la que se ingresa como input a los modelos. Los resultados muestran una curva suavizada como se ilustra en la Figura 3.16 con el servicio F06 para el tipo de día laboral.

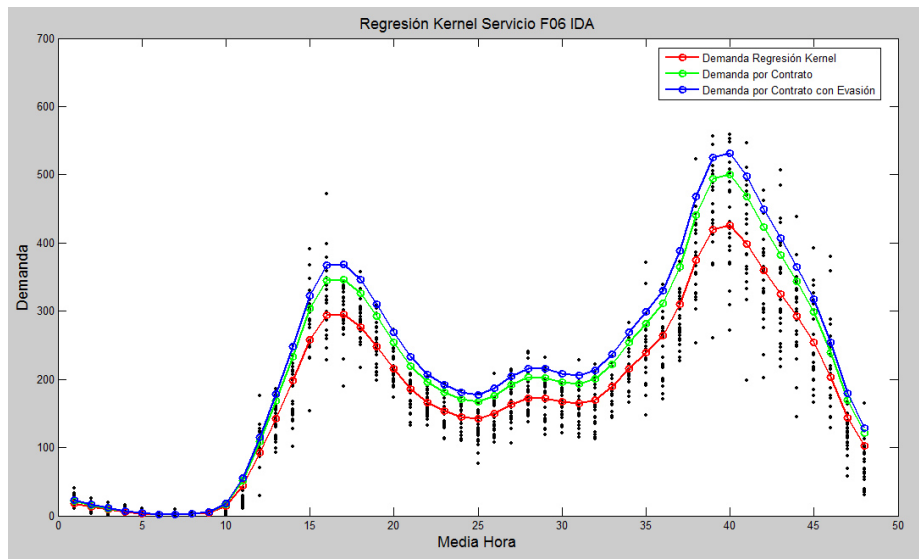


Figura 3.16: Estimación de la demanda, periodo julio-diciembre 2012

3.5.2. Parámetro de tiempo de viaje

En esta Tesis se supone que las velocidades de operación son deterministas durante cada media hora y servicio-sentido, pero en la realidad este panorama no es cierto debido a diversos eventos imprevisibles que ocurren en el día a día de la operación; los eventos más importantes son la congestión vehicular, desvíos, accidentes, trabajos viales, manifestaciones y problemas con semáforos. Lo anterior puede resultar como una falencia de la solución que se propone, pero estas situaciones son inherentes a la operación y están fuera del control de los operadores; además perjudican los indicadores de desempeño. Dado esto, Transantiago generó un conjunto de medidas correctivas para compensar estas situaciones, las cuales se encuentran establecidas en el Manual de Eventos Exógenos a la Operación³.

Considerando que actualmente los buses del Transantiago integran dispositivos GPS, que permiten conseguir su localización geográfica a través de sistemas AVL (Localización Automática de Vehículos) en intervalos de cada 30 segundos, es posible obtener el tiempo de cada viaje realizado. Lo anterior se realiza a través de los reportes que proporciona SONDA, con los cuales además se puede determinar la asignación del servicio y ruta del bus en cada expedición realizada dentro del día. La información anterior contiene todas las salidas realizadas, por lo que para obtener los tiempos de viaje cada media hora y por tipo de día, es necesario realizar un proceso con la data antes descrita, el que consta de cinco etapas.

Primera etapa

En esta etapa se deben utilizar dos reportes, el reporte 1.96 llamado “Detalle condiciones matriz PPU servicio-sentido” y el reporte 2.2 llamado “Registros de paso por punto de control”. El primero contiene información temporal (inicio y fin) para todas las expediciones que fueron ejecutadas como se aprecia en la Figura 3.19 (donde se diferencian las salidas válidas y no válidas, con C y NC respectivamente). El reporte 2.2 contiene información de la posición del inicio/fin de cada viaje y la fecha-hora registrada como se aprecia en la Figura 3.18 (sin diferenciar las salidas válidas a priori). El uso de dos reportes proviene del hecho del

³<http://www.dtpm.cl/index.php/2013-04-29-20-33-57/manuales2> [Consulta: 20/11/2013].

desfase que tiene el sistema GPS para registrar los datos, donde ambos reportes consideran el inicio del viaje a contar de la primera transmisión recibida fuera de la geocerca y el fin de viaje con la última antes de ingresar a la geocerca⁴ del otro cabezal, como se observa en la Figura 3.17 estos puntos no corresponden al inicio y fin real del viaje.

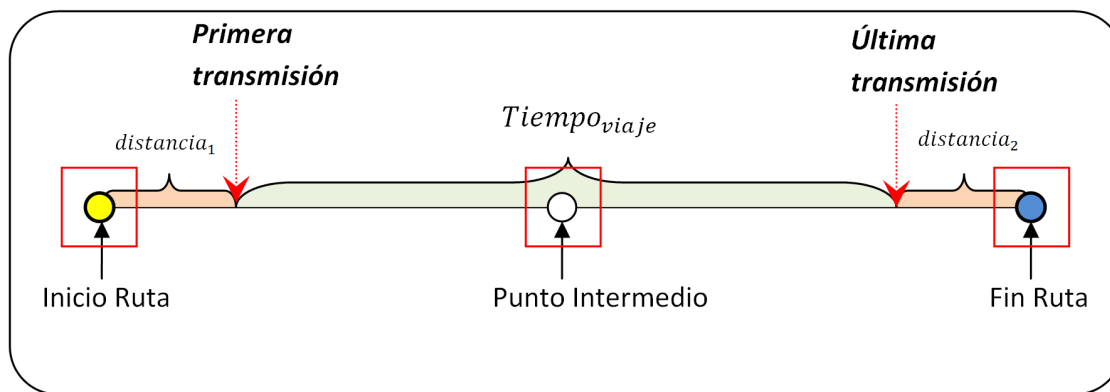


Figura 3.17: Diferencias en la transmisión.

Finalmente el tiempo real de viaje para cada expedición corresponde al tiempo de viaje registrado por el reporte 1.96, más las distancias obtenidas del reporte 2.2 divididas por la velocidad promedio del viaje, es decir, $Tiempo_{Real} = Tiempo_{viaje} + \frac{d_1+d_2}{V}$.

Patente	Unidad	Hora registro 2	Posición 2	Hora registro 1	Posición 1	Código ruta	Servicio	Ruta de apertura
BKXV-89	U7 - STP	20-03-2014 7:17	0,42	20-03-2014 7:17	0,21	F03 00I	F03	F03 00I
BKXV-89	U7 - STP	20-03-2014 7:23	2,01	20-03-2014 7:22	1,91	F03 00I	F03	F03 00I
BKXV-89	U7 - STP	20-03-2014 7:30	4,23	20-03-2014 7:28	3,46	F03 00I	F03	F03 00I
BKXV-89	U7 - STP	20-03-2014 7:35	6	20-03-2014 7:30	4,23	F03 00I	F03	F03 00I
BKXV-89	U7 - STP	20-03-2014 7:42	8,21	20-03-2014 7:42	7,94	F03 00I	F03	F03 00I
BKXV-89	U7 - STP	20-03-2014 7:47	10,12	20-03-2014 7:47	9,92	F03 00I	F03	F03 00I
BKXV-89	U7 - STP	20-03-2014 7:52	12,04	20-03-2014 7:51	11,88	F03 00I	F03	F03 00I
BKXV-89	U7 - STP	20-03-2014 7:54	14,09	20-03-2014 7:54	13,6	F03 00I	F03	F03 00I
BKXV-89	U7 - STP	20-03-2014 7:56	16,1	20-03-2014 7:56	15,82	F03 00I	F03	F03 00I
BKXV-89	U7 - STP	20-03-2014 8:06	18,21	20-03-2014 8:06	17,94	F03 00I	F03	F03 00I
BKXV-89	U7 - STP	20-03-2014 8:11	20,13	20-03-2014 8:11	19,89	F03 00I	F03	F03 00I
BKXV-89	U7 - STP	20-03-2014 8:18	21,38	20-03-2014 8:17	21,18	F03 00I	F03	F03 00I

Figura 3.18: Ejemplo del reporte Registros de paso por punto de control.

⁴La definición de geocerca se explica en el Anexo A.5

Unidad	Fecha	Patente	Tipo GPS	Servicio	Sentido	Intervalo	Operativo	Fecha inicio viaje	Fecha fin viaje
U7 - STP	20-3-14	BKXV-89	MTC	F03	I	7:00	C	20-03-2014 7:17	20-03-2014 8:18
U7 - STP	20-3-14	BKXV-89	MTC	F03	I	7:30	C	20-03-2014 7:17	20-03-2014 8:18
U7 - STP	20-3-14	BKXV-89	MTC	F03	I	8:00	C	20-03-2014 7:17	20-03-2014 8:18
U7 - STP	20-3-14	BKXV-91	MTC			0:00	NC		
U7 - STP	20-3-14	BKXV-91	MTC			0:30	NC		
U7 - STP	20-3-14	BKXV-91	MTC			1:00	NC		
U7 - STP	20-3-14	BKXV-91	MTC			1:30	NC		
U7 - STP	20-3-14	BKXV-91	MTC			2:00	NC		
U7 - STP	20-3-14	BKXV-91	MTC			2:30	NC		

Figura 3.19: Ejemplo del reporte Detalle condiciones matriz PPU servicio-sentido.

Segunda etapa

La información obtenida en la etapa anterior contiene todas las salidas realizadas, incluyendo días y periodos en los cuales existieron eventos exógenos, tales como desvíos de ruta, accidentes, manifestaciones, entre otros, los cuales pueden alterar los tiempos de viaje de forma drástica en los servicios afectados. Para tratar este problema, se hace uso de la bitácora de eventos que STP registra a diario, eliminando así los registros afectados por los eventos.

Fecha	Tipo día	Servicio Afecto	Ruta	Media hora inicio	Media hora término	Incidente
23-07-2012	LABORAL	F05/F06/F09/F20/F22	IDA/REG	9:00	11:30	FISCALIZACION
23-07-2012	LABORAL	F02/F19/F21	IDA/REG	15:00	17:00	SEMAFORO APAGADO
23-07-2012	LABORAL	F15	IDA/REG	17:00	19:00	CONGESTION
23-07-2012	LABORAL	F15	IDA/REG	18:00	23:59	DESVIO
23-07-2012	LABORAL	F13/F25	IDA/REG	23:00	23:59	ACCIDENTE
25-07-2012	LABORAL	F07	REG	0:00	23:59	DESVIO
25-07-2012	LABORAL	F08	IDA	0:00	23:59	DESVIO
25-07-2012	LABORAL	F09	REG	6:30	23:59	DESVIO
25-07-2012	LABORAL	F06	IDA/REG	12:00	23:59	DESVIO
25-07-2012	LABORAL	F06	REG	14:30	15:30	VANDALISMO
25-07-2012	LABORAL	F10/F25	REG	17:30	18:30	VANDALISMO
25-07-2012	LABORAL	F25	IDA	18:30	20:30	CONGESTION
25-07-2012	LABORAL	F24	REG	21:30	22:30	VANDALISMO

Figura 3.20: Bitácora de eventos exógenos de STP.

Tercera etapa

Cuando al interior de la geocerca de un punto de inicio o fin de viaje el bus se mantiene detenido mucho tiempo, ya sea por subida y bajada de pasajeros en paraderos, congestión o por pérdidas de transmisión (subterráneos de estaciones intermodales), este tiempo no es

detectado en la medición del tiempo de viaje, ya que sólo se mide el tiempo de viaje entre las fronteras de las geocercas, y no en su interior. Esto provoca que el tiempo de viaje estimado en la etapa 1 sea menor que el real. Para mejorar tal falencia se incorporan estos intervalos de tiempo, que definiremos como tiempos *muertos*. El cálculo de estos tiempos se obtiene considerando un viaje *roundtrip* de una misma patente por un mismo servicio, donde el tiempo muerto se obtiene como la resta entre el inicio del segundo viaje y el fin del primero como lo ilustra la Figura 3.21.

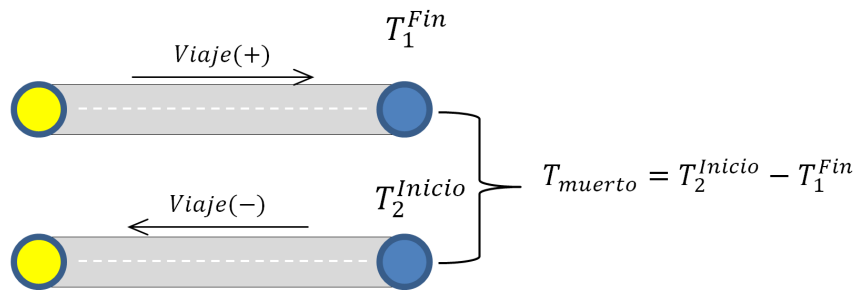


Figura 3.21: Tiempo muerto.

Un ejemplo de la curva obtenida en esta etapa se aprecia en la Figura 3.22.

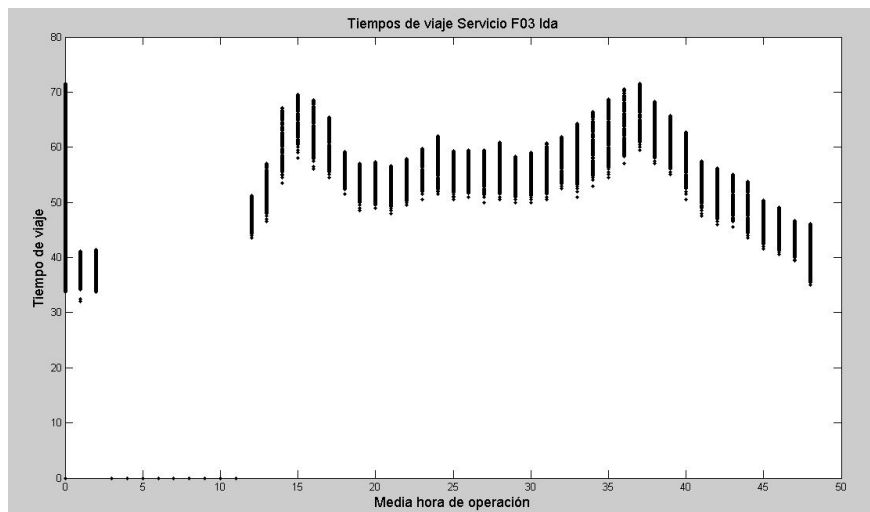


Figura 3.22: Tiempo de viaje servicio F03 (+), periodo julio-diciembre 2012.

Cuarta etapa

Las curvas obtenidas en la etapa 3 tienen irregularidades provocadas por variaciones normales del tránsito, por ejemplo, aceleraciones y desaceleraciones, detenciones en semáforos y paraderos y adelantamientos, por lo que las observaciones tienen mucho ruido al igual que los datos de demanda. Por este motivo, se utiliza la Regresión tipo Kernel para suavizar la curva como observa en las Figuras 3.23 y 3.23.

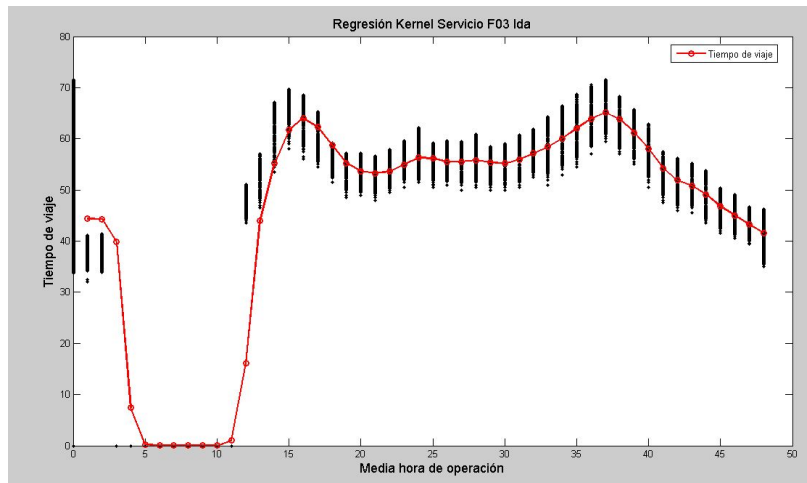


Figura 3.23: Suavización del tiempo de viaje F03 (+), periodo julio-diciembre 2012.

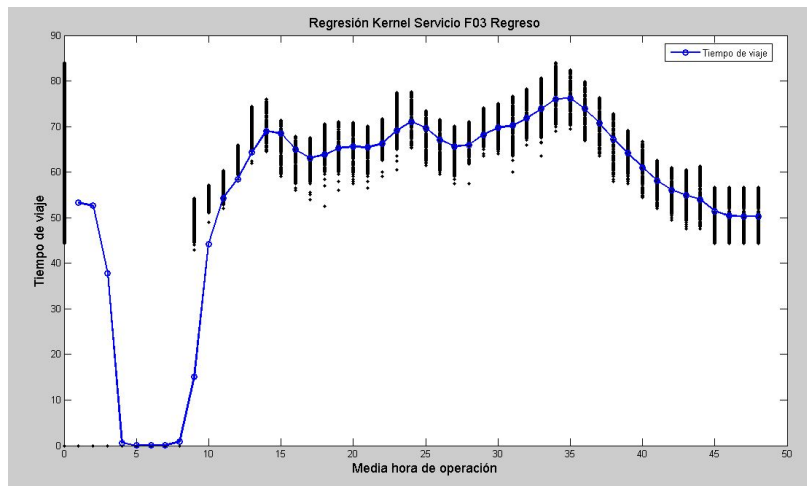


Figura 3.24: Suavización del tiempo de viaje F03 (-), periodo julio-diciembre 2012.

Quinta etapa

En cada media hora de operación el tiempo de viaje puede variar, como se observa en la Figura 3.25 con un ejemplo en el cual a las 18:30 el tiempo varía de 66 minutos a 54 minutos (línea sólida azul). Lo anterior genera el problema que los buses se adelanten o que se generen intervalos extensos en la ruta; es decir, si un bus sale antes y otro después del punto de cambio, y el tiempo de viaje después del corte es menor, entonces el segundo bus adelantará al primero, en caso contrario de ser mayor el tiempo de viaje después del corte, se generará un intervalo extenso en la ruta. Para solucionar tal problema se propone una linealización de los tiempos de viaje, considerando para tales fines que el tiempo un Δ antes y después del punto de corte se comporta de forma lineal, obteniendo de esta forma velocidades como las que se observan en la Figura 3.25 con los puntos de color rojo.

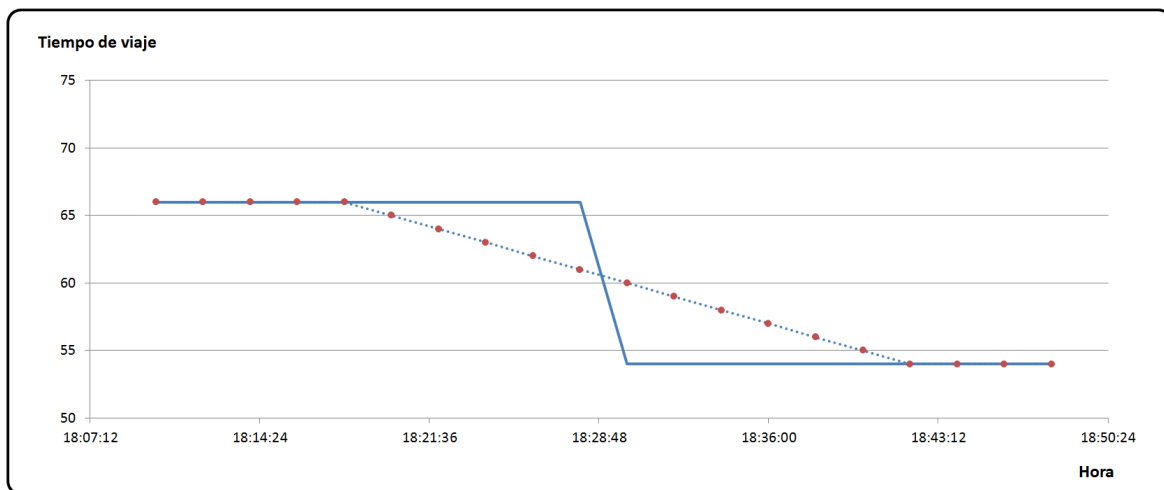


Figura 3.25: Tiempo de viaje lineal entre medias horas.

3.6. Procedimiento de asignación de viajes a buses

Como se mencionó en la sección 3.3.6, la salida de la Formulación II y III propuesta, entrega la cantidad de buses por tipo asignados a cada servicio y los viajes que deben realizar estos buses, sin embargo, los viajes no quedan asignados a un bus particular. Luego en un instante de tiempo $t \in T$ y en un nodo de transbordo del servicio $s \in S$ podrían existir varios buses de un mismo tipo esperando para realizar el siguiente viaje y el despachador podría eventualmente elegir cualquiera de ellos. Por lo tanto, es necesario definir un criterio de asignación que permita establecer que viajes realiza un bus específico, para lo cual se utiliza el procedimiento que se define como BTA presentado en la Figura 3.26.

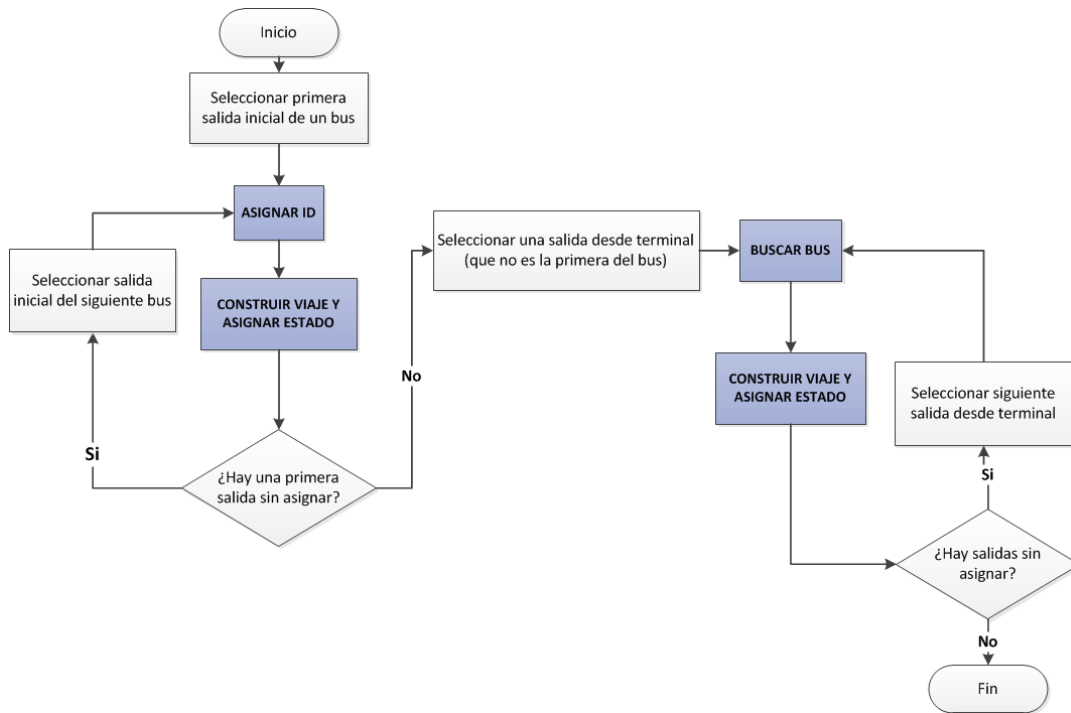


Figura 3.26: Flujo del procedimiento de asignación de viajes a buses.

El procedimiento BTA se detalla a continuación:

- *Paso 1:* Seleccionar primera salida inicial desde terminal.
- *Paso 2:* Ejecutar componente ASIGNAR ID.

- *Paso 3:* Ejecutar componente CONSTRUIR VIAJE Y ASIGNAR ESTADO.
- *Paso 4:* Si se observa una salida inicial sin asignar se selecciona y se debe ir al paso 2, de lo contrario se debe seleccionar una salida desde terminal que no es inicial e ir al paso 5.
- *Paso 5:* Ejecutar componente BUSCAR BUS.
- *Paso 6:* Ejecutar componente CONSTRUIR VIAJE Y ASIGNAR ESTADO.
- *Paso 7:* Si se observa una salida desde terminal sin asignar se selecciona y se debe ir al paso 5, de lo contrario se termina.

El Paso 1 consiste en seleccionar la primera variable I_{dsrb}^t activa. El paso 2 asigna un bus a esta salida desde terminal, lo que se realiza con la componente ASIGNAR ID, el cual asigna un Id de bus único comenzando con el valor 1. Posteriormente en el Paso 3, el componente CONSTRUIR VIAJE Y ASIGNAR ESTADO asigna los viajes que realiza el bus asignado anteriormente, marcando las salidas X_{srb}^t con el Id. Adicionalmente, se registra el tiempo en el cual regresa al terminal y se asigna el estado en que queda el bus, el cual puede ser “espera” o “finalizado” dependiendo si la vuelta a terminal se realiza con una variable FM_{dsrb}^t o F_{dsrb}^t . El Paso 4 verifica si hay una salida inicial aún sin asignar; si ésta existe, se debe ir al paso 2, si no se debe ir al Paso 5, donde se selecciona una salida intermedia desde terminal a través de la variable IM_{dsrb}^t activa. Luego la componente BUSCAR BUS selecciona entre los buses que se encuentran esperando y pueden realizar esta salida al que más tiempo lleva en estado de espera y se le asigna la salida, para posteriormente en el Paso 6 ejecutar la componente CONSTRUIR VIAJE Y ASIGNAR ESTADO. Finalmente el Paso 7 verifica si hay una salida desde terminal aún sin asignar, si ésta existe, se debe ir al paso 5, si no se termina el procedimiento.

A continuación se describirá el caso práctico a resolver en esta Tesis y los resultados obtenidos.

Capítulo 4

CASO DE ESTUDIO

En el presente capítulo, se presenta y analizan los resultados obtenidos de los modelos planteados. Se comienza describiendo en detalle las características de los terminales de la empresa, luego se muestra el tamaño de las instancias a resolver y posteriormente los resultados obtenidos para cada formulación.

Se realiza un análisis de sensibilidad sobre el tiempo de viaje por las rutas de *deadheading* y su repercusión sobre el tamaño de flota requerido. Se finaliza el capítulo con un nuevo experimento, el que consiste en resolver el terminal Pie Andino con la Formulación III.

4.1. Descripción de la Unidad de Negocio 7

La Unidad de Negocio 7 (UN7) está a cargo de la operación de los servicios de la comuna de Puente Alto, la cual posee una superficie de 88 km^2 y 586,509 habitantes según el Censo del año 2012, siendo la comuna más poblada de Chile¹. Actualmente posee 4 terminales, 30 servicios, 60 rutas comerciales, 331 buses de flota base y una participación de 5.9% sobre un promedio de 85 millones de transacciones mensuales que genera el sistema de buses².

¹<http://www.lanacion.cl/censo-2012-puente-alto-sigue-siendo-la-comuna-mas-poblada-de-chile/noticias/2012-08-31/192610.html> [Consulta: 15/10/2013]

²Dato reportado por AFT para el periodo Enero 2012 hasta Diciembre 2013

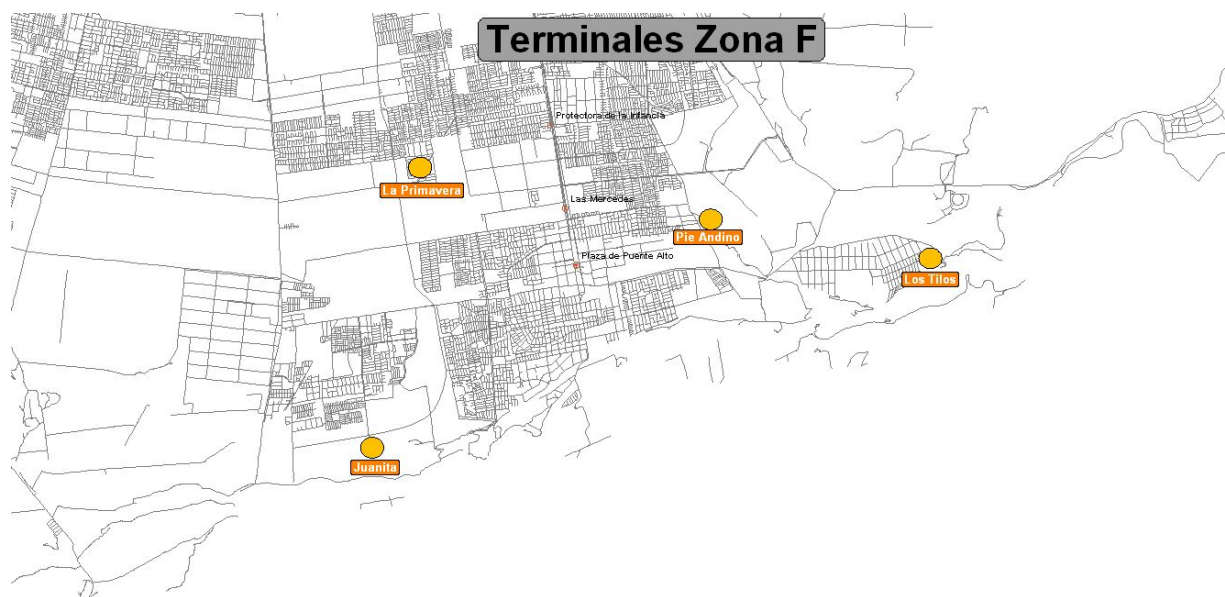


Figura 4.1: Terminales pertenecientes a STP SANTIAGO en la comuna de Puente Alto.

STP SANTIAGO ha designado cada servicio a un terminal, siendo el criterio de asignación la cercanía de un cabezal del servicio al terminal y en la mayoría de los casos esta distancia no supera los 50 metros. Dado el criterio de asignación anterior, la cantidad de servicios por cada terminal es el presentado en la Tabla 4.1.

Terminal	N° Servicios
Juanita	9
La Primavera	6
Los Tilos	4
Pie Andino	11

Tabla 4.1: Número de servicios asignados a cada terminal.

Además de lo anterior, se debe considerar que cada terminal opera con una cantidad fija de buses y la distribución³ existente hasta el 16-06-2013 fue la siguiente:

Terminal	Tipo de Bus (Plaza)				Total
	42	56	60	97	
Juanita	0	0	10	108	118
La Primavera	0	21	28	9	58
Los Tilos	0	11	10	4	25
Pie Andino	2	29	13	86	130

Tabla 4.2: Número de buses por tipo en cada terminal.

Nuestro estudio se focaliza en la resolución del terminal Juanita, el cual contiene 9 servicios, 18 rutas de circulación, 18 rutas de *deadheading* y 118 buses (108 son de plaza 97 y 10 de plaza 60). El itinerario para el primer semestre 2013 (marzo a julio) de la empresa, contempla un número de viajes igual a 2.076 para este terminal, de los cuales 282 corresponden al periodo punta mañana (6:30-8:30) y 407 al periodo punta tarde (17:30-20:30), los cuales representan la mayor exigencia del día.

4.1.1. Particularidades del terminal Juanita

Los 9 servicios que operan desde el terminal Juanita son los siguientes:

Servicio	F10	F12	F12c	F13	F13c	F15	F18	F25	F25e
Transacciones	22 %	9 %	2 %	28 %	3 %	8 %	8 %	17 %	3 %

Tabla 4.3: Servicios y su porcentaje de participación sobre el total de transacciones.

Respecto a la demanda, este terminal tiene una participación de un 30 %⁴ sobre el total de transacciones de la unidad, lo que corresponde a 1.54 millones de transacciones mensuales. La participación de cada servicio sobre el total de transacciones se presenta en la Tabla 4.3, donde se aprecia que los servicios F10, F13 y F25 abarcan un 67 % del total del terminal, lo que corresponde a un 20 % del total de la empresa.

³La distribución se basa en los requerimientos para lograr cumplir el programa operacional.

⁴Dato obtenido de los reportes Matriz MH TRX facilitados por Transantiago, periodo Marzo-Octubre 2013.

Un punto importante que se debe considerar, corresponde a que el terminal Juanita presenta los mayores desbalances de demanda de los 4 terminales operados por la empresa, esto debido a que en la mañana los usuarios de estos servicios se dirigen de la periferia al centro y en la tarde del centro a la periferia. El plan operacional representa bien los requerimientos de demanda y desbalances por periodos, lo que se observa en la Figura 4.2, en la cual se muestran las salidas a realizar por cada ruta y periodo del día para el programa operacional válido para el primer semestre 2013. El terminal Juanita presenta una asimetría importante en los periodos punta mañana y punta tarde respecto a la cantidad de salidas requeridas por ambas rutas de circulación del servicio, como se observa a continuación:

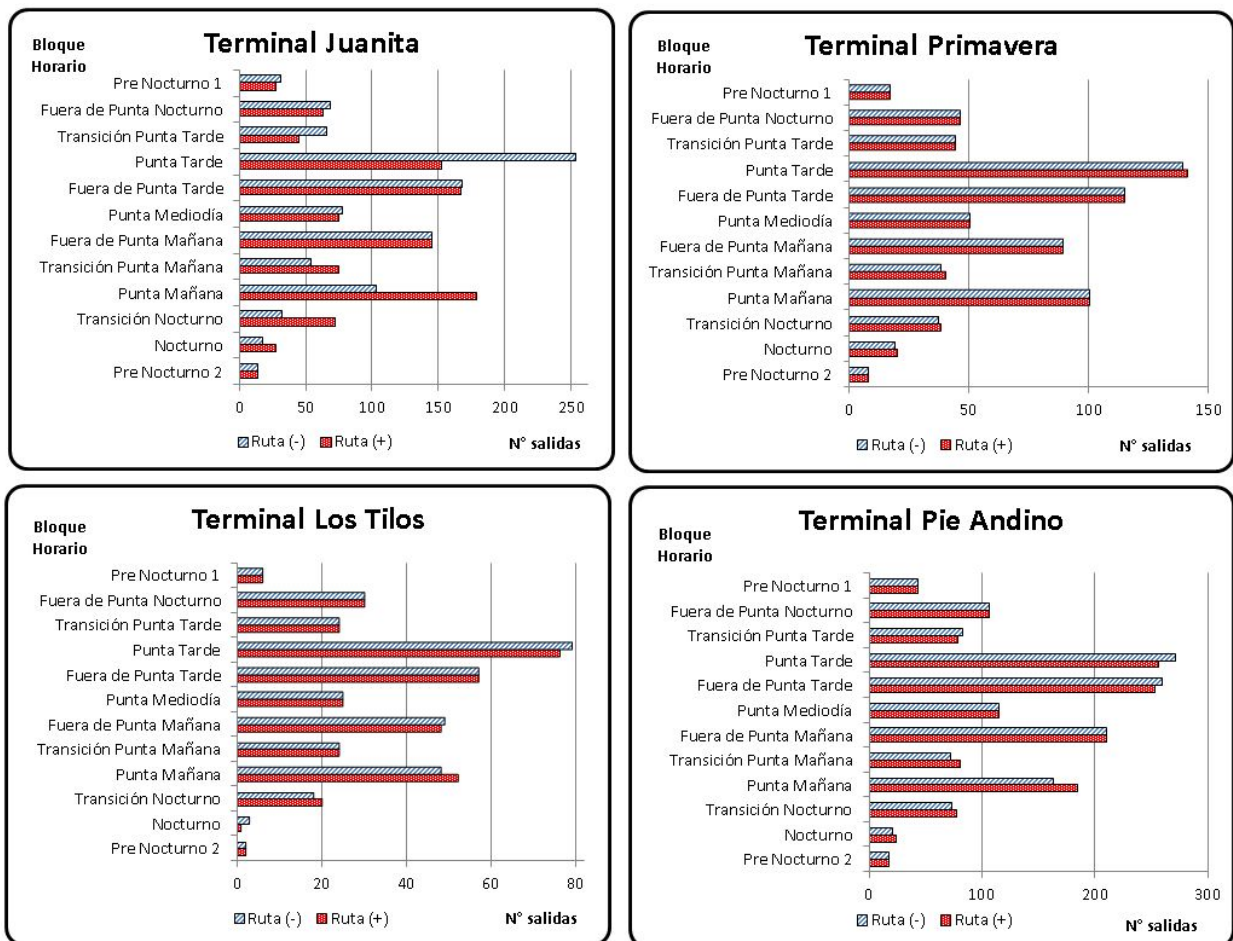


Figura 4.2: Salidas por bloque horario para un día Laboral, P.O. válido hasta el 16/06/2013.

La distribución geográfica de estos servicios se observa en la Figura 4.3, donde se aprecia que estos poseen una fuerte característica de alimentador, ya que en su mayoría son recorridos que acercan al metro o a un servicio troncal.

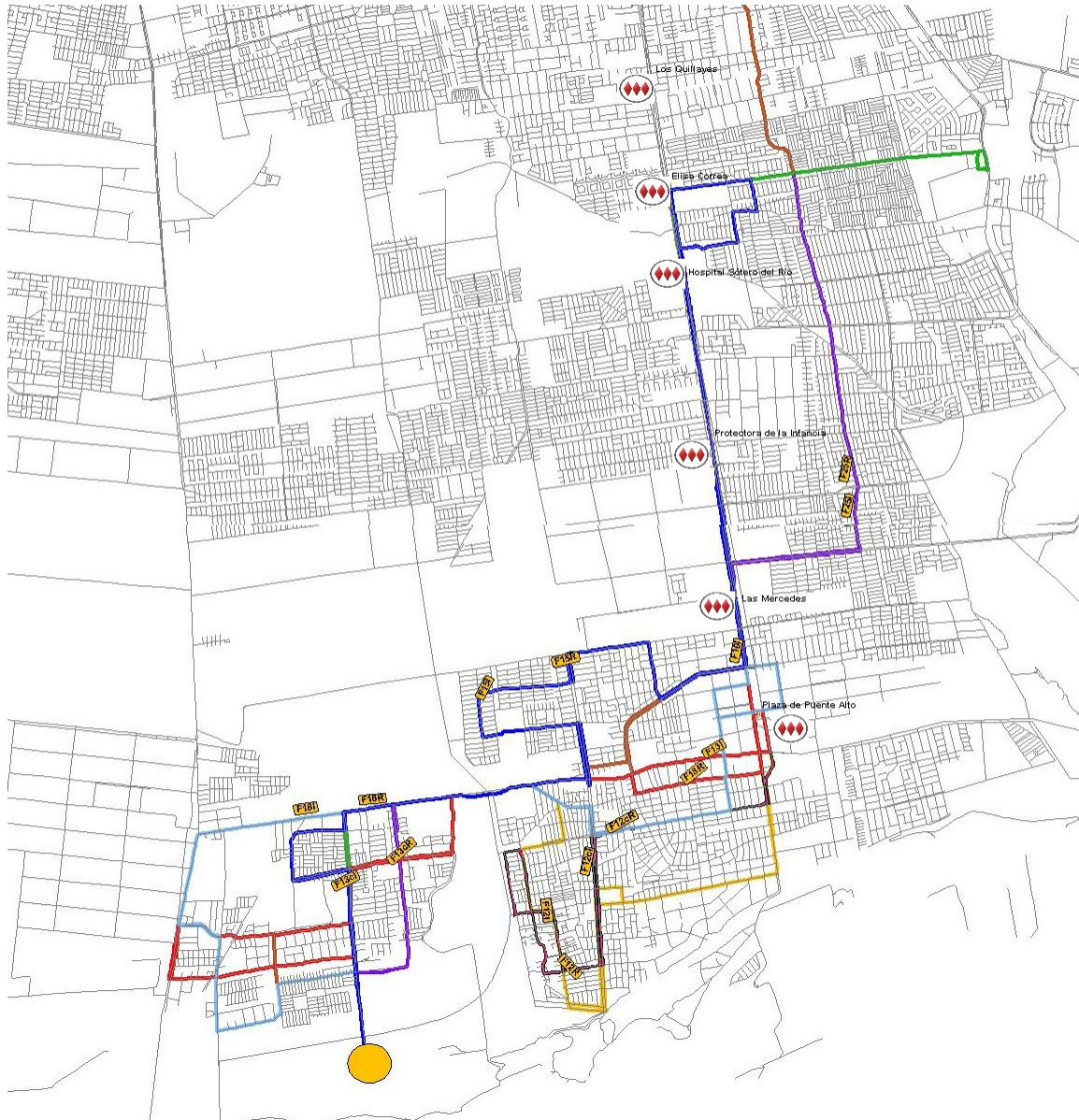


Figura 4.3: Mapa servicios de Juanita.

En cuanto a las variables de operación de mayor relevancia de estos servicios para un tipo de día laboral se tiene lo siguiente:

		Punta Mañana		Punta Tarde	
Servicio	Ruta	Distancia (km)	Tiempo de viaje (min)	Distancia (km)	Tiempo de viaje (min)
F10	Ida (+)	13.97	52.7	13.97	57.0
F10	Regreso (-)	13.81	49.8	13.81	54.7
F12	Ida (+)	10.38	35.4	10.38	35.5
F12	Regreso (-)	11.74	34.1	11.74	42.1
F12c	Ida (+)	6.03	22.3	6.03	23.4
F12c	Regreso (-)	6.81	16.3	6.81	19.6
F13	Ida (+)	17.08	69.4	17.08	73.4
F13	Regreso (-)	17.11	65.1	17.11	74.4
F13c	Ida (+)	9.28	32.5	9.28	30.6
F13c	Regreso (-)	10.73	31.1	10.73	38.0
F15	Ida (+)	14.11	48.3	14.11	48.2
F15	Regreso (-)	16.39	46.7	16.39	55.7
F18	Ida (+)	10.14	35.0	10.14	36.0
F18	Regreso (-)	11.24	33.2	11.24	41.6
F25	Ida (+)	19.47	66.3	19.47	64.0
F25	Regreso (-)	20.80	63.1	20.09	70.5
F25e	Ida (+)	18.53	47.0	18.53	47.7
F25e	Regreso (-)	18.99	44.7	18.99	42.1
Mínimo	Ida (+)	6.03	22.30	6.03	23.40
Mínimo	Regreso (-)	6.81	16.30	6.81	19.60
Promedio	Ida (+)	12.50	43.12	12.50	43.92
Promedio	Regreso (-)	13.44	40.04	13.37	45.83
Máximo	Ida (+)	19.47	69.40	19.47	73.40
Máximo	Regreso (-)	20.80	65.10	20.09	74.40

Tabla 4.4: Variables operacionales de los servicios del terminal Juanita.

La información completa de los tiempo de viaje se encuentra en el Anexo A.3.

De la tabla 4.4 se desprende que el tiempo de viaje para el periodo punta mañana y punta tarde es de 42 y 44 minutos respectivamente. Ambos valores son de una magnitud

importante, ya que si se toma en consideración que el largo promedio de los servicios es de 14 km , entonces la velocidad promedio de los viajes es de $30 \frac{km}{h}$. Adicionalmente, se observa que los mayores tiempos de viaje tienen una duración superior a 1 hora en un trayecto inferior a 18 kilómetros, lo que evidencia la alta congestión presente en los horarios punta.

En los experimentos de la siguiente sección, se trata de resolver el caso práctico asociado al terminal Juanita, pero para comparar algunos modelos se definirá un caso restringido.

4.2. Tamaño de las instancias

El tamaño de las instancias a resolver se puede determinar a través de la cantidad de variables y restricciones asociadas a los problemas. A continuación se presenta el tamaño de cada uno de los problemas a resolver.

4.2.1. Formulación I

Para el terminal Juanita los tamaños de los conjuntos son:

- $|S| = 9$ servicios.
- $|R| = 2$ rutas, con $|R^+| = |R^-| = 1$.
- $|B| = 140$ buses.
- $|\Omega| = 100,920$

Variable	Cantidad
$I_{dsrb}^t, IM_{dsrb}^t, F_{dsrb}^t, FM_{dsrb}^t$	$ D \cdot S \cdot R \cdot B \cdot T $
X_{srb}^t	$ S \cdot R \cdot B \cdot T $
E_{dsb}^t	$ D \cdot S \cdot B \cdot T $

Tabla 4.5: Cantidad de variables Formulación I.

Restricción	Cantidad
(3.1)	$ D \cdot S \cdot B $
(3.2)	$ D \cdot S \cdot B \cdot (T - 1)$
(3.3)	$ D \cdot S \cdot B $
(3.4)	$ S \cdot R^+ \cdot B \cdot T $
(3.5)	$ S \cdot B \cdot T \cdot R^+ \cdot R^- $
(3.6)	$ S \cdot R^- \cdot B \cdot T $
(3.7)	$ D \cdot B $
(3.8)	$ S \cdot R \cdot H $
(3.9)	$ S \cdot R \cdot (T - 1)$
(3.10)	$ S \cdot R \cdot (T - 1)$
(3.11)	$ \Omega $

Tabla 4.6: Cantidad de restricciones Formulación I.

Por lo tanto, la cantidad de variables binarias del modelo es de 11,656,260 y en cuanto a la cantidad de restricciones se tienen 4,371,956.

4.2.2. Formulación II

Para el terminal Juanita los tamaños de los conjuntos son:

- $|S| = 9$ servicios.
- $|R| = 2$ rutas, con $|R^+| = |R^-| = 1$.
- $|B| = 2$ tipos de buses.
- $|\Omega| = 10,092$

Variable	Cantidad
$I_{dsrb}^t, IM_{dsrb}^t, F_{dsrb}^t, FM_{dsrb}^t$	$ D \cdot S \cdot R \cdot B \cdot T $
X_{srb}^t	$ S \cdot R \cdot B \cdot T $
E_{dsb}^t	$ D \cdot S \cdot B \cdot T $

Tabla 4.7: Cantidad de variables Formulación II.

Restricción	Cantidad
(3.14)	$ D \cdot S \cdot B $
(3.15)	$ D \cdot S \cdot B \cdot (T - 1)$
(3.16)	$ D \cdot S \cdot B $
(3.17)	$ S \cdot R^+ \cdot B \cdot T $
(3.18)	$ S \cdot B \cdot T \cdot R^+ \cdot R^- $
(3.19)	$ S \cdot R^- \cdot B \cdot T $
(3.20)	$ D \cdot B $
(3.21)	$ S \cdot R \cdot H $
(3.22)	$ S \cdot R \cdot (T - 1)$
(3.23)	$ S \cdot R \cdot (T - 1)$
(3.24)	$ \Omega $

Tabla 4.8: Cantidad de restricciones Formulación II.

Por lo tanto, la cantidad de variables del modelo es de 151,380 binarias y de 15,138 enteras generales. En cuanto a las restricciones se tienen 101,660.

4.2.3. Formulación III

Para el terminal Juanita los tamaños de los conjuntos son:

- $|S| = 9$ servicios.
- $|R| = 4$ rutas, con $|R_c^+| = |R_c^-| = |R_v| = 2$ y $|R_d^+| = |R_d^-| = |R^+| = |R^-| = 1$
- $|B| = 2$ tipos de buses.
- $|\Omega| = 20,184$

Variable	Cantidad
$I_{dsrb}^t, IM_{dsrb}^t, F_{dsrb}^t, FM_{dsrb}^t$	$ D \cdot S \cdot R \cdot B \cdot T $
X_{srb}^t	$ S \cdot R \cdot B \cdot T $
E_{dsb}^t	$ D \cdot S \cdot B \cdot T $

Tabla 4.9: Cantidad de variables Formulación III.

Restricción	Cantidad
(3.27)	$ D \cdot S \cdot B $
(3.28)	$ D \cdot S \cdot B \cdot (T - 1)$
(3.29)	$ D \cdot S \cdot B $
(3.30)	$ S \cdot R_c^+ \cdot T \cdot B $
(3.31)	$ S \cdot R^+ \cdot B \cdot T $
(3.32)	$ S \cdot B \cdot T \cdot R_d^+ \cdot R^- $
(3.33)	$ S \cdot R_c^- \cdot B \cdot T $
(3.34)	$ D \cdot B $
(3.35)	$ S \cdot R_v \cdot H $
(3.36)	$ S \cdot R_v \cdot (T - 1)$
(3.37)	$ S \cdot R_v \cdot (T - 1)$
(3.38)	$ \Omega $

Tabla 4.10: Cantidad de restricciones Formulación III.

Por lo tanto, la cantidad de variables del modelo es de 302,760 binarias y de 15,138 enteras generales. En cuanto a las restricciones se tienen 172,304.

4.3. Resolución de los modelos

Los problemas modelados fueron programados en el compilador algebraico IBM ILOG CPLEX Optimization Studio versión 12.2, y fueron resueltos utilizando el solver MIP. Este paquete de optimización matemática, contiene un conjunto variado de algoritmos para resolver diversos tipos de problemas de programación matemática. Para encontrar soluciones enteras utiliza el algoritmo de Branch and Bound, hasta llegar a optimalidad o a una solución factible entera dentro del rango de aceptación dado por el *gap* relativo entre la solución entera encontrada y la mejor de las cotas encontradas en el Branch and Bound.

Todos los experimentos fueron ejecutados en un computador personal Dell, CPU Intel® Core i7 2640-M 2.8 GHz con 16 GB RAM (dedicada), la que será considerada como Máquina Test en adelante.

4.3.1. Resultados Formulación I

Como se mencionó en la sección anterior, esta formulación tiene un tamaño de 12 millones de variables binarias y 4.5 millones de restricciones, lo que sumado a la simetría del problema lo vuelve imposible de resolver de manera exacta en la Máquina Test. Sin embargo, es posible resolver problemas pequeños con esta formulación, por ejemplo considerando solo 2 servicios (F12 y F12C) y 19 buses, lo que resulta en un problema de 470 mil variables binarias y 350 mil restricciones.

En un periodo de ejecución de 2 horas se obtiene un *gap* de 1.24 % a los 22 minutos. Como se observa, el tiempo de resolución es bastante elevado y a pesar de ser una instancia pequeña es difícil resolverla de manera exacta. Lo anterior se debe principalmente a la simetría del problema y para hacer frente a esto se prueba la incorporación de las siguientes restricciones de manera individual:

$$\sum_{d,s,r} \sum_{t=1}^{\theta} I_{dsr(b+1)}^t \leq \sum_{d,s,r} \sum_{t=1}^{\theta} I_{dsrb}^t \quad \forall k \in K, \quad \forall b \in B_k, \quad \forall \theta \in T \quad (4.1)$$

$$\sum_{d,s,r} \sum_{t=1}^T I_{dsr(b+1)}^t \leq \sum_{d,s,r} \sum_{t=1}^T I_{dsrb}^t \quad \forall k \in K, \quad \forall b \in B_k \quad (4.2)$$

La restricción 4.1 elimina la simetría asociada a los buses de la formulación, ya que ordena el uso de los buses, permitiendo utilizar el bus $b + 1$ solo si el bus b ya fue utilizado. La restricción 4.2 también elimina la simetría asociada a los buses de la formulación, pero permite utilizar el bus $b + 1$ solo si el bus b se utiliza en algún periodo. Las restricciones anteriores se utilizan considerando el uso ordenado de los buses del mismo tipo k , es por esto que se utiliza el conjunto B_k el cual representa al conjunto de todos los buses del tipo k .

La incorporación de la restricción 1 complejiza aún más el problema y en un periodo de 2 horas no se logra obtener una solución entera. En cambio la incorporación de la restricción 2 tiene un resultado bastante positivo, permitiendo resolver el problema en 6,5 minutos a optimalidad. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

El número de buses requeridos para esta instancia de 2 servicios fue 18 buses y el diseño de flota asociado es el presentado en la Tabla 4.11.

Servicio	F12	F12C	Total
Buses Plaza 60	0	5	5
Buses Plaza 97	13	0	13
Total	13	5	18

Tabla 4.11: Diseño de flota para la Formulación I para una instancia de 2 servicios.

Esta formulación, a diferencia de la formulación II y la formulación III, entrega todos los movimientos que realiza el bus dentro del día. La Tabla 4.12 ejemplifica un extracto de la programación del bus número 6 del tipo 97 plazas.

Variable	Servicio	Ruta	Tiempo	Id Bus
I	F12	+	452	6
X	F12	+	454	6
X	F12	-	484	6
FM	F12	-	484	6
I	F12	+	512	6
X	F12	+	514	6
X	F12	-	548	6
FM	F12	-	548	6
I	F12	+	576	6
X	F12	+	578	6
X	F12	-	618	6
FM	F12	-	618	6
I	F12	+	666	6
X	F12	+	668	6
X	F12	-	706	6
FM	F12	-	706	6

Tabla 4.12: Extracto de la programación del bus 6 del servicio F12.

4.3.2. Resultados Formulación II

Como se mencionó en la sección 3.3, esta formulación logra reducir la cantidad de variables y restricciones del problema como se observa en la Tabla 4.13, particularmente reduciendo en 98.57 % la cantidad de variables y en 97.67 % la cantidad de restricciones, comparado al tamaño de la formulación I. Adicionalmente, esta formulación elimina la simetría presente en los buses de similares características, ya que son agrupados de acuerdo a este criterio.

Formulación	N° Variables	N° Restricciones
(1) I	11,656,260	4,371,956
(2) II	166,518	101,660
(2)/(1)	1.43 %	2.33 %

Tabla 4.13: Comparación del tamaño de la Formulación I y II.

El tiempo de resolución requerido fue de 33 segundos a optimalidad. En cuanto a los resultados se tiene que el número de buses requeridos es de 144 y el diseño de flota es el siguiente:

Servicio	F10	F12	F12c	F13	F13c	F15	F18	F25	F25e	Total
Buses Plaza 60	0	0	5	0	5	0	0	0	0	10
Buses Plaza 97	25	13	0	30	5	14	18	16	13	134
Total	25	13	5	30	10	14	18	16	13	144

Tabla 4.14: Diseño de flota para la Formulación II.

Como se observa en la Tabla 4.15, la solución tiene asociado un kilometraje diario de 34,129 *km* y 120.6 corresponden a kilómetros en vacío ⁵.

Ruta	Km Vacío	Km Circulación	Total
Ruta (+)	60.3	16,529.5	16,589.8
Ruta(-)	60.3	17,478.8	17,539.2
Total	120.6	34,008.3	34,129.0

Tabla 4.15: Kilometraje asociado a la solución de la Formulación II.

⁵Los kilómetros en vacío corresponden al trayecto Terminal-Cabecal 1 y viceversa

El ajuste del modelo a la capacidad de transporte mínima en los periodos puntas se aprecia en las Figuras 4.4 y 4.5.

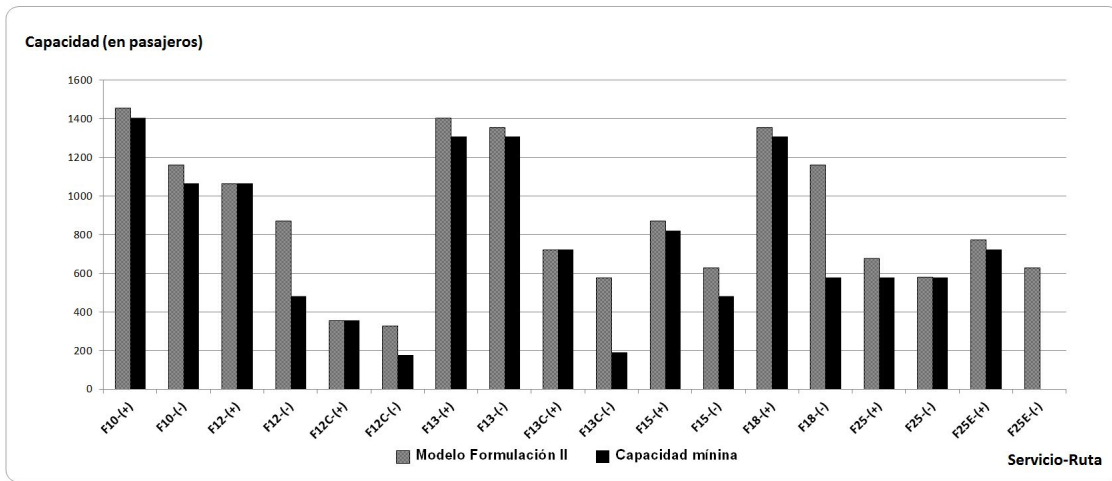


Figura 4.4: Capacidad de Transporte periodo Punta Mañana para Formulación II.

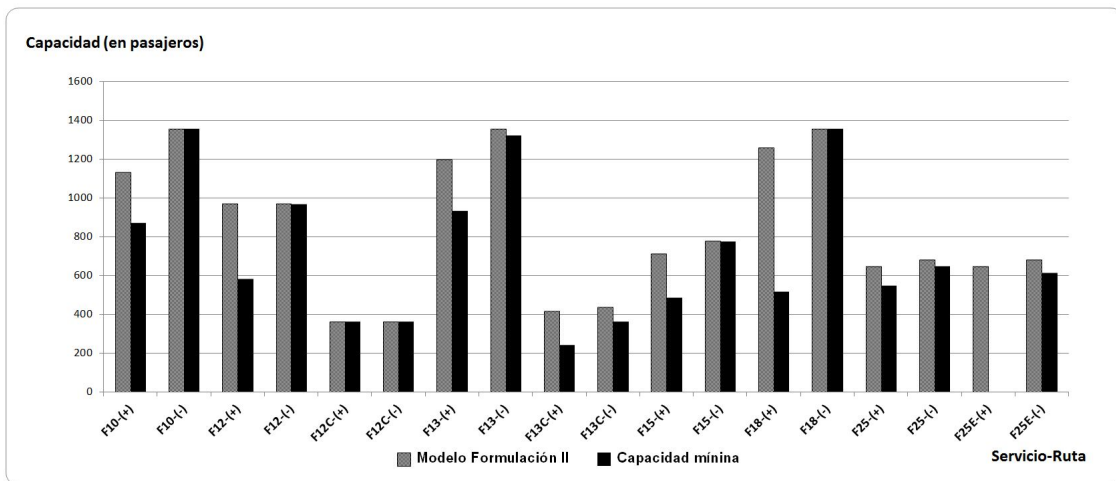


Figura 4.5: Capacidad de Transporte periodo Punta Tarde para Formulación II.

Se observa que esta formulación tiene un mal ajuste entre oferta y demanda en los servicios F13 y F18, los cuales presentan el mayor desbalance de demanda en periodos puntas.

El ajuste del modelo a la frecuencia mínima en los periodos punta se aprecia en las Figuras 4.6 y 4.7.

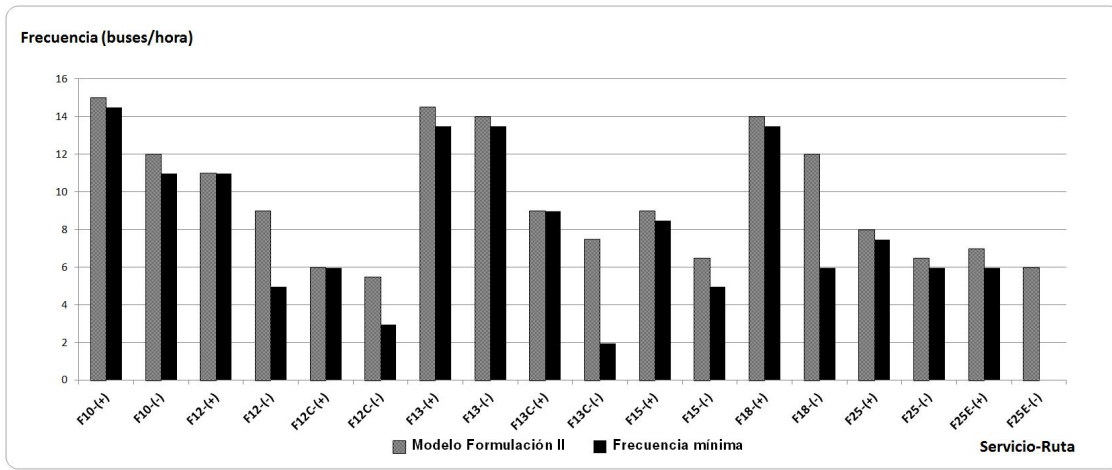


Figura 4.6: Frecuencia periodo Punta Mañana para Formulación II.

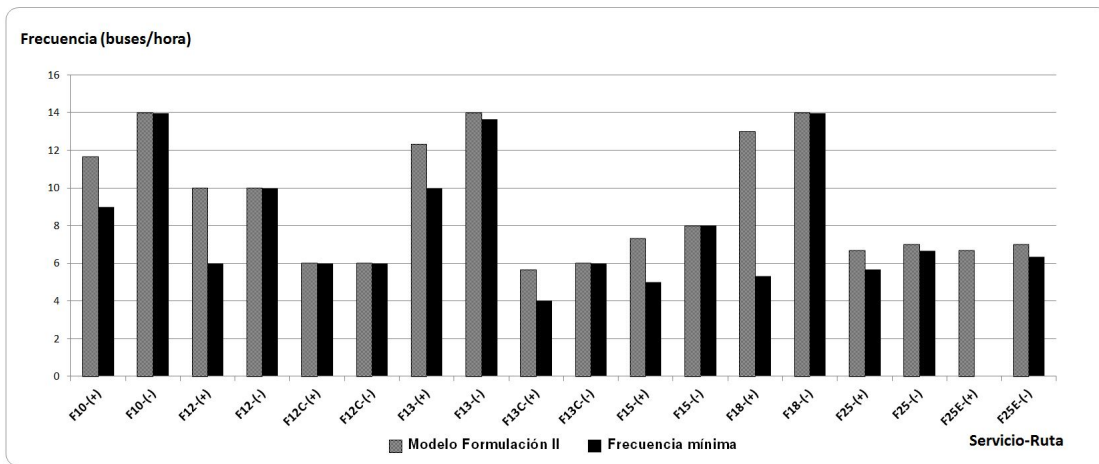


Figura 4.7: Frecuencia periodo Punta Tarde para Formulación II.

Se desprende de las Figuras anteriores que esta formulación realiza más salidas de las mínimas requeridas para lograr cumplir con las exigencias, por lo cual existe una clara oportunidad de reducir los requerimientos de flota al enviar buses en vacío, los que tendrán un tiempo de viaje menor al de la ruta de circulación. Es por este motivo que se incluyó la estrategia de *deadheading* y los resultados obtenidos se muestran en la siguiente sección.

4.3.3. Resultados Formulación III

La estrategia de *deadheading*, consiste en enviar buses en vacío a puertas cerradas al servicio-ruta que presenta mayor demanda y por la ruta que presente el menor tiempo de viaje, ruta que se definirá como ruta de *deadheading*. Antes de resolver esta instancia, es necesario definir el parámetro del tiempo de viaje por las rutas de *deadheading*.

4.3.4. Cálculo de tiempos de viaje rutas *deadheading*

Dado que la empresa a Julio del 2012 no poseía un registro que permita definir un valor de manera estadística, se trabaja bajo los siguientes supuestos:

1. La velocidad promedio de viaje es $30 \frac{km}{h}$.
2. Existe un paradero cada 250 metros aproximadamente.
3. En un viaje por un servicio-ruta, el bus se detiene 15 segundos cada 2 paraderos.

Bajo estos supuestos y considerando que la distancia promedio de las rutas de circulación es de 14 kilómetros, entonces el tiempo de viaje promedio es de 24 minutos, además existen 56 paraderos en la ruta y el tiempo total de detención en paraderos es de 7 minutos. Dado esto, si se supone que el bus utiliza la misma ruta de circulación para realizar la estrategia de *deadheading*, el tiempo para recorrer esta ruta se reduce en un 30 %, valor que será considerado constante para todos los servicios. Esta instancia se denomina como **D-30 %**, para así diferenciarla de las instancias que se resuelven en la sección 4.4.

El tiempo de resolución requerido para la instancia **D-30 %** fue de 15 minutos y 50 segundos, obteniendo un 0.62 % de *gap*. En cuanto a los resultados se tiene que el número de buses requeridos es de 136 y el diseño de flota es el presentado en la Tabla 4.16.

Servicio	F10	F12	F12c	F13	F13c	F15	F18	F25	F25e	Total
Buses Plaza 60	0	0	5	0	5	0	0	0	0	10
Buses Plaza 97	24	12	0	29	5	13	16	16	11	126
Total	24	12	5	29	10	13	16	16	11	136

Tabla 4.16: Diseño de flota para la Formulación III.

Esta solución requiere de 8 buses menos que la solución obtenida por la Formulación II, la cual no incluye la estrategia de *deadheading*. Dado esto, para el Terminal Juanita en una instancia donde las rutas de *deadheading* tienen una duración menor de 30 %, el tamaño de la flota se reduce en un 5.55 %. Debido a que los tiempos de viaje de las rutas de *deadheading* han sido estimados de manera bastante simple, para confirmar la validez de estos resultados se complementa con un análisis de sensibilidad respecto a los tiempos de viaje por estas rutas. Este análisis se describe en la sección 4.4.

En la Tabla 4.17 se muestra una comparación del diseño de flota entre la Formulación II y III, donde se detalla la diferencia del número de buses requeridos para cada servicio.

Servicio	F10	F12	F12c	F13	F13c	F15	F18	F25	F25e	Total
Formulación II	25	13	5	30	10	14	18	16	13	144
Formulación III	24	12	5	29	10	13	16	16	11	136
Diferencia	1	1	0	1	0	1	2	0	2	8

Tabla 4.17: Comparación del diseño de flota para la Formulación II y III.

Las diferencias se observan en los servicios F10, F12, F13, F15, F18 y F25e, lo cual era esperable ya que como se observa en las Figuras 4.9 y 4.10, estos servicios presentan asimetrías importantes en la demanda, tanto para el periodo punta mañana como punta tarde. Es importante destacar que el servicio F25e en la mañana opera solo por la ruta (+) y en la tarde solo por la (-).

La solución tiene asociado un kilometraje diario de 34,129 *km*, de los cuales un 0.35 % corresponde a kilómetros en vacío y un 13.32 % a kilómetros en *deadheading*. El detalle del kilometraje se presenta en la Tabla 4.18.

Ruta	Km Vacío	Km Circulación	Km <i>deadheading</i>	Total
Ruta (+)	60.3	14,383.3	2,146.1	16,589.8
Ruta(-)	60.3	15,077.5	2,401.3	17,539.2
Total	120.6	29,460.9	4,547.4	34,129.0

Tabla 4.18: Kilometraje asociado a la solución de la Formulación III.

Al comparar este kilometraje con el obtenido en la Formulación II se evidencia que existe una reducción de 4,547.4 *km* de circulación y se agregan 4,547.4 *km* de *deadheading*. De lo anterior se desprende que existe un efecto neto igual a 0 y la baja de kilómetros de circulación se suple con los kilómetros de *deadheading*. Esto se debe a que desde terminal se realiza la misma cantidad de salidas en ambos resultados y que adicionalmente las rutas de *deadheading* tienen las mismas distancias que las rutas de circulación. En la práctica, la ruta de *deadheading* además de tener una duración menor en tiempo coincide en la mayoría de los casos con ser la más corta en distancia, por lo tanto la estrategia de *deadheading* además de reducir el tamaño de la flota reduce los costos operacionales variables, los cuales están en gran medida determinados por lo kilómetros recorridos (combustible, mantenciones, neumáticos y lubricantes), como se observa en la Figura 4.8.

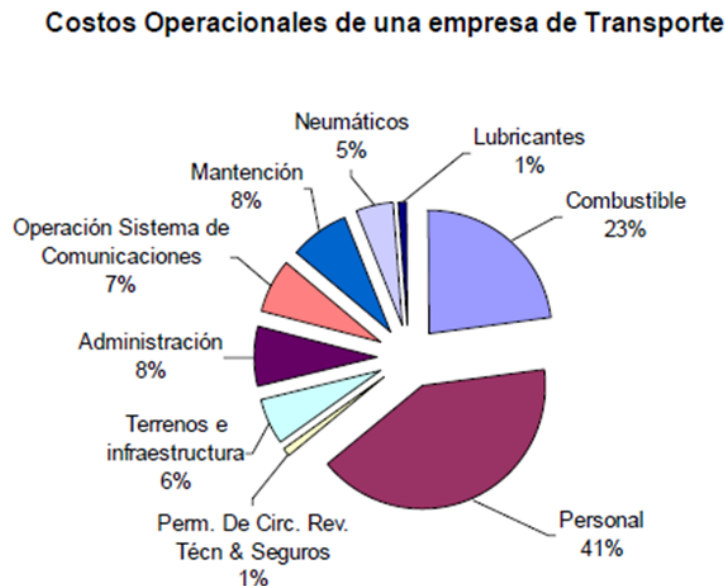


Figura 4.8: Costos operacionales de una empresa de Transporte Público.

El ajuste del modelo a la capacidad de transporte mínima en los periodos puntas se aprecia en las Figuras 4.9 y 4.10.

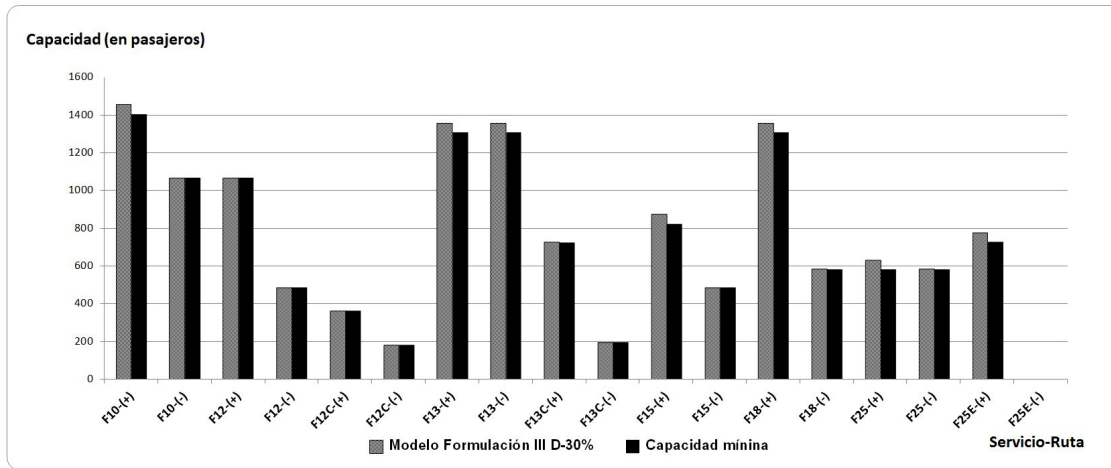


Figura 4.9: Capacidad de Transporte periodo Punta Mañana para Formulación III.

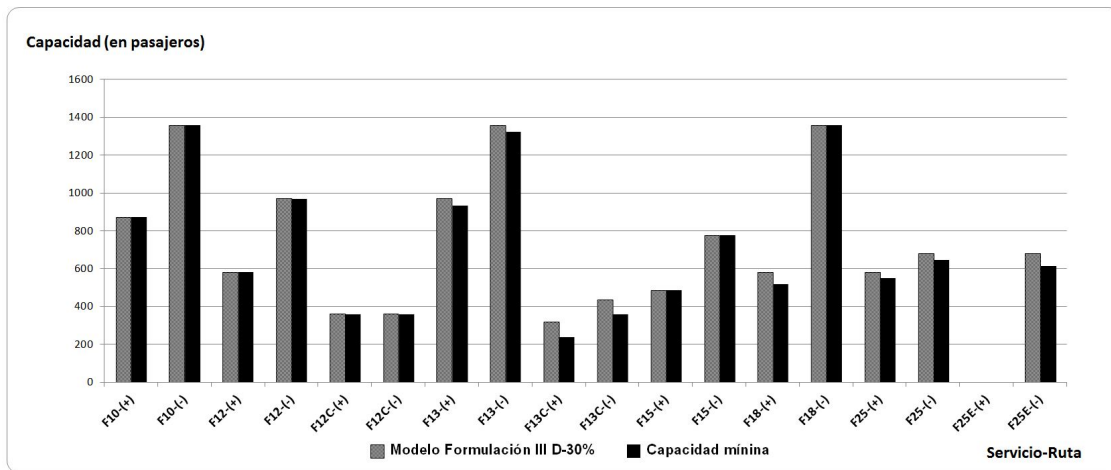


Figura 4.10: Capacidad de Transporte periodo Punta Tarde para Formulación III.

Se observa que esta formulación logra ajustarse a los desbalance de demanda presentes en todos los servicio del terminal Juanita.

El ajuste del modelo a la frecuencia mínima en los periodos puntas se aprecia en las Figuras 4.11 y 4.12.

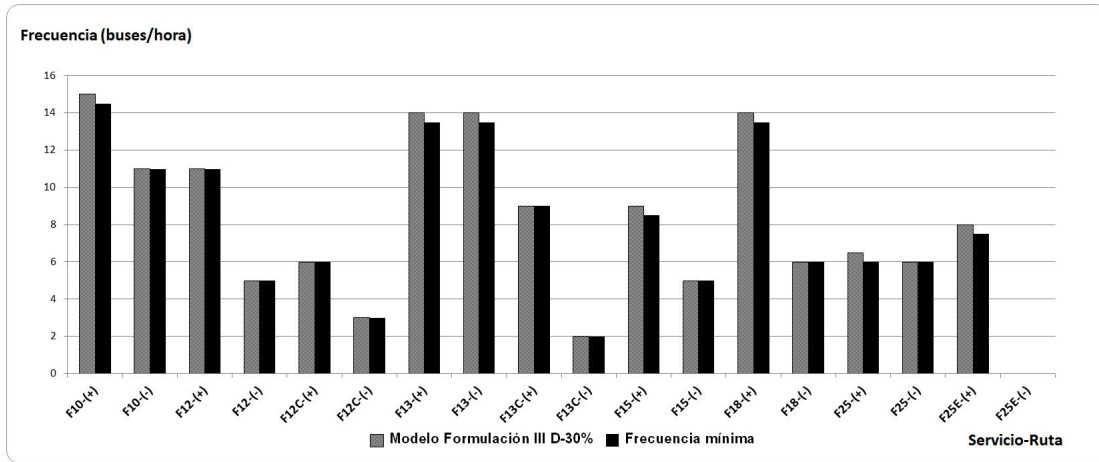


Figura 4.11: Frecuencia periodo Punta Mañana para Formulación III.

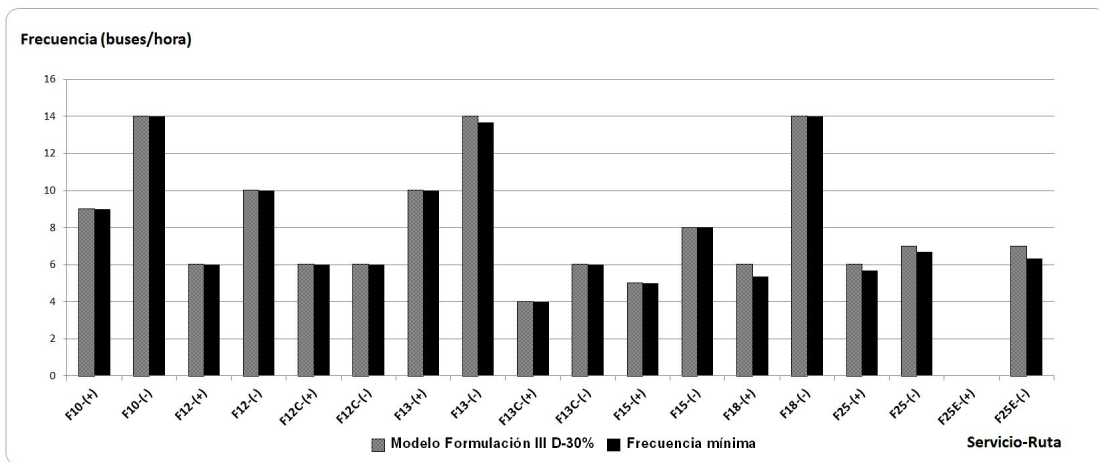


Figura 4.12: Frecuencia periodo Punta Tarde para Formulación III.

Como se mencionó en la sección 3.3, esta formulación no entrega el itinerario para cada bus dentro del día. Para obtener el itinerario de cada bus, se utiliza el procedimiento de asignación de buses a viajes propuesto en esta Tesis y un extracto del resultado del procedimiento se muestra en la Tabla 3.6.

Bus Lógico	Movimiento	Plaza	Servicio	Punto Inicio	Hora Inicio	Punto Fin	Hora Fin
2	1	97	F10	Terminal	0:20:00	Cabezal 1	0:22:00
2	2	97	F10	Cabezal 1	0:22:00	Cabezal 2	0:56:00
2	3	97	F10	Cabezal 2	0:56:00	Cabezal 1	1:32:00
2	4	97	F10	Cabezal 1	1:32:00	Terminal	1:34:00
2	5	97	F10	Terminal	5:16:00	Cabezal 2	5:48:00
2	6	97	F10	Cabezal 2	5:48:00	Cabezal 1	6:28:00
2	7	97	F10	Cabezal 1	6:28:00	Terminal	6:30:00
2	8	97	F10	Terminal	6:32:00	Cabezal 1	6:34:00
2	9	97	F10	Cabezal 1	6:34:00	Cabezal 2	7:18:00

Tabla 4.19: Extracto del detalle de programación de la flota.

Finalmente, resulta interesante comparar la cantidad de salidas requeridas por media hora de la situación de la empresa hasta el 16-06-2013, con los resultados de la instancia **D-30 %**. El modelo exige 7 salidas más para cada periodo punta (mañana y tarde), pero sólo 2 salidas más en el día completo. Esto ocurre debido a que el modelo ajusta los periodos valles disminuyendo el número de salidas como se observa en la Figura 4.13.

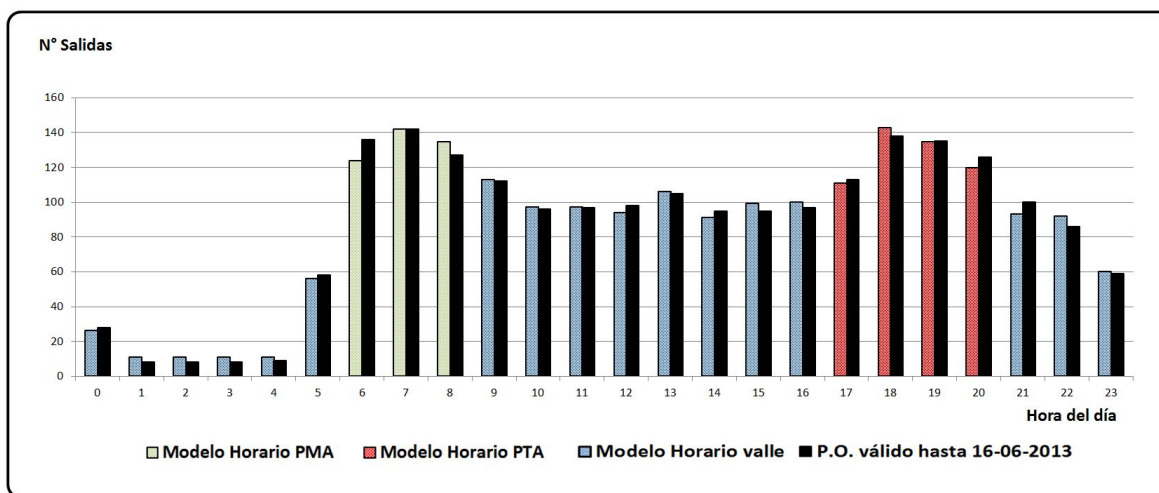


Figura 4.13: Comparación de viajes, solución empresa y modelo.

En la siguiente sección se muestran los principales resultados de los análisis.

4.4. Análisis de resultados

La primera interrogante que surge, consiste en verificar si la formulación I y II al resolver una misma instancia generan un resultado idéntico, en cuanto al valor de la función objetivo y las variables activas. Para resolver tal inquietud se procede a resolver la Formulación II considerando solo los servicios F12 y F12C, para los cuales ya se tiene solución con la Formulación I. Los resultados son los siguientes:

Item	Formulación I	Formulacion II
Valor función objetivo (F.O)	6,165,073.6	6,165,073.6
Número de buses	18	18
Km en vacío	22.4	22.4
Km ruta (+)	2,129.37	2,129.37
Km ruta (-)	2,407.91	2,407.91

Tabla 4.20: Comparación al resolver instancia F12 y F12C.

De la Tabla 4.20 se desprende que el resultado para ambas formulaciones es idéntico respecto a F.O., número de buses y kilometrajes. A pesar de esto CPLEX entrega óptimos distintos, debido a que las soluciones no son idénticas al considerar las variables activas, ya que si se observa la Tabla 4.21 los primeros 3 viajes del servicio F12C en el periodo punta mañana tienen distinto tiempo de inicio.

	Tiempo inicio viaje	
Ruta	Formulación I	Formulación II
(+)	516	514
(+)	522	526
(+)	534	536
(+)	544	544

Tabla 4.21: Comparación resultado de variables X activas para servicio F12C.

El resultado anterior proviene de la segunda fuente de simetría que tiene el problema, la cual se debe básicamente a la factibilidad de un conjunto de viajes respecto a los *headways* correspondientes a un bloque particular. Para explicar lo anterior se utiliza el esquema de la

Figura 4.14 donde se observa un conjunto de viajes que realizan 3 buses representados por el color de la línea sólida (rojo, verde y negro).

El bus rojo realiza dos viajes por la ruta (+) y uno por la ruta (-), en cambio el bus verde y negro realizan un viaje por la ruta (+) y uno por la ruta (-), lo que da un total de 4 viajes por la ruta (+) y 3 por la ruta (-).

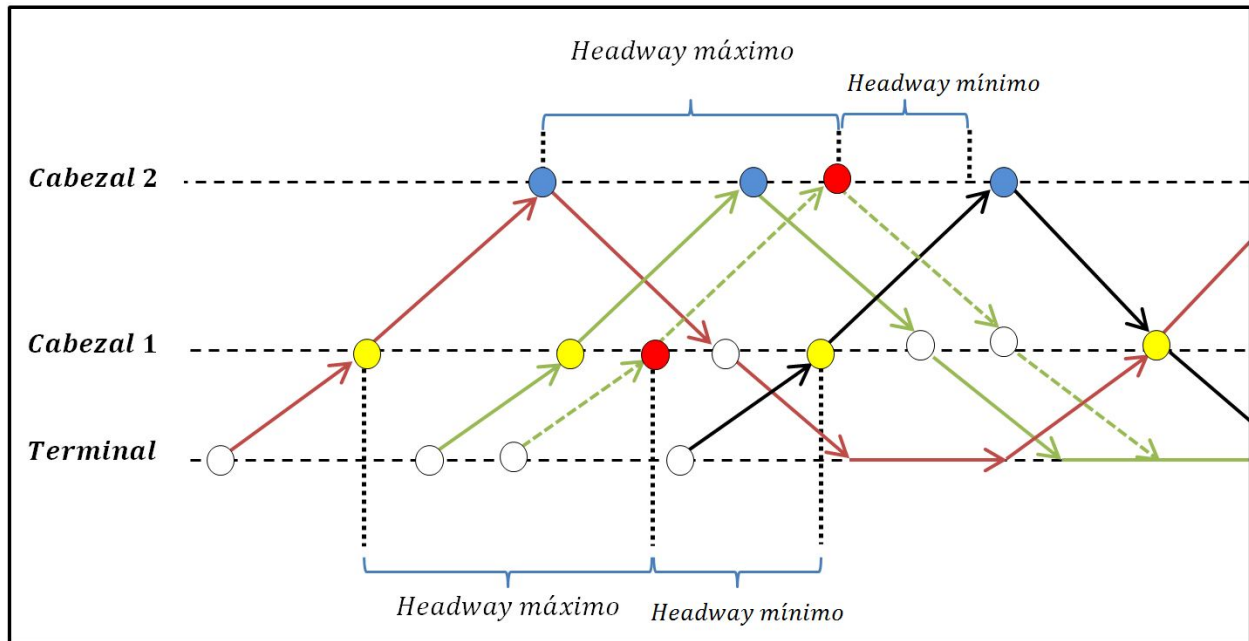


Figura 4.14: Simetría del modelo por efecto de los *headways*.

Si consideramos que se desplaza el inicio de la salida desde el terminal para el bus verde, lo cual se muestra con la línea punteada verde y viajes en círculos rojos en la Figura 4.14, observamos que esta nueva solución cumple con los *headways* establecidos y además se realizan 4 viajes por la ruta (+) y 3 por la ruta (-) al igual que la solución original.

La problemática anterior se puede aminorar imponiendo que algunas salidas se realicen en un periodo de tiempo específico, por ejemplo considerando que en cada inicio de bloque debe existir una salida, lo que en la práctica usualmente se utiliza. Esta solución es viable y a pesar de que no elimina totalmente el problema, reduce el espacio factible de soluciones y por ende el tiempo de resolución requerido.

Si bien las variables activas son distintas para la Formulación I y II, resulta interesante verificar si una solución de la Formulación I es factible para la Formulación II y viceversa.

La Formulación I entrega todos los movimientos específicos que debe realizar un bus dentro del día, y particularmente si más de un bus se encuentra esperando en un nodo de transbordo en un periodo de tiempo específico, la próxima salida no tiene una regla de despacho definida. Una solución de la Formulación II consiste en resolver el problema y luego utilizar el procedimiento de asignación de viajes a buses explicado en la sección 3.6, el cual asigna la próxima salida al bus que lleva esperando en terminal el mayor tiempo. Dado esto, la solución de la Formulación I no es factible para la Formulación II, a menos que para cada variable I, IM, F, FM, X y E se elimine el id del bus y luego se utilice el procedimiento BTA para asignar los viajes, con lo cual esta nueva solución sera factible para la Formulación II.

Una solución de la Formulación II, es decir, resolver el problema y asignar los viajes a buses, siempre será factible para la Formulación I incluso al eliminar simetrías, lo anterior debido a que el procedimiento BTA asigna el id al bus en orden creciente según los tiempos de inicio de las variables de primeras salidas I , luego al ordenar las variables I por tiempo y tipo de bus y luego utilizar BTA se obtiene la solución factible para la Formulación I.

A continuación se realiza un análisis de sensibilidad del tamaño de flota respecto a la velocidad de *deadheading*.

4.4.1. Sensibilidad del tamaño de flota respecto a la velocidad de *deadheading*

Dado que la cantidad de buses requeridos se redujo al resolver una misma instancia incorporando la estrategia de *deadheading*, resulta interesante analizar que sucede si el tiempo de viaje por estas rutas se reduce o aumenta. Para resolver tal inquietud, se resuelven 2 nuevas instancias las que corresponden a:

1. Tiempo de viaje por la ruta de deadheading un 10 % menor (D-10 %).
2. Tiempo de viaje por la ruta de deadheading un 50 % menor (D-50 %).

El tiempo de resolución requerido para la instancia **D-10 %** fue de 10 minutos y 30 segundos, obteniendo un 0.98 % de *gap*. Para la instancia **D-50 %** el tiempo de resolución requerido fue de 10 minutos y 50 segundos, obteniendo un 1.07 % de *gap*. En cuanto al número de buses se requieren 142 y 131 para la instancia **D-10 %** y **D-50 %** respectivamente.

En la Figura 4.15 se compara el número de buses requeridos para la Formulación II la cual no incorpora la estrategia de *deadheading*, con la Formulación III para las instancias **D-10 %**, **D-30 %** y **D-50 %**.

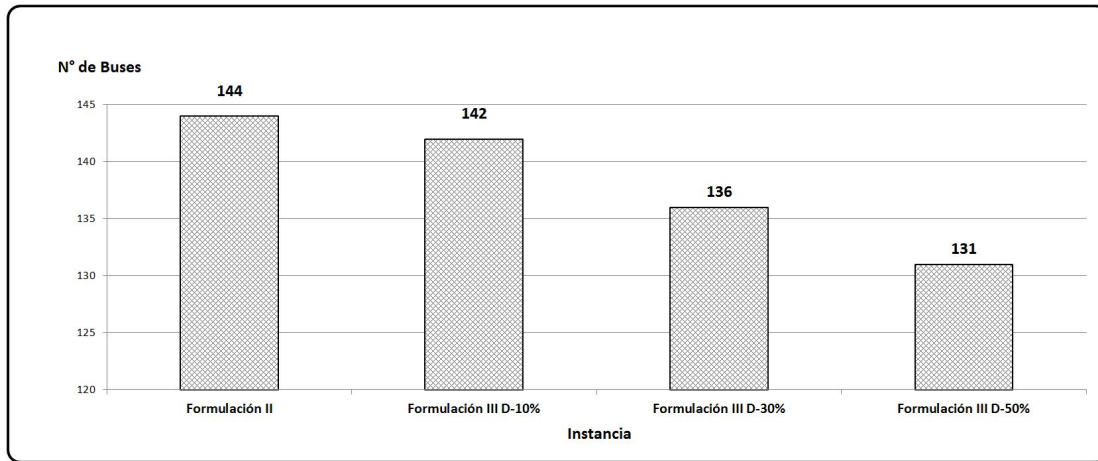


Figura 4.15: Buses requeridos para cada instancia.

De la Figura anterior, se desprende claramente que a medida que el tiempo por la ruta de *deadheading* disminuye, también disminuye la cantidad de buses requeridos, donde en el mejor de los casos se reducen 13 buses comparado al caso de no utilizar la estrategia, lo que en la práctica equivale a una compra por 1,700 millones de pesos aproximadamente.

A pesar que la estrategia de *deadheading* reduce la cantidad de buses requeridos, en todos los escenarios analizados el número de buses requeridos es muy superior a la cantidad de buses que posee el terminal actualmente, por lo que es imposible implementar los resultados sin previamente aumentar la cantidad de buses disponibles, el proceso anterior se detalla en el Capítulo 5 sección 5.7.

4.5. Caso terminal Pie Andino

En esta sección se resolverá una nueva instancia, la que consiste en resolver con la Formulación III el terminal Pie Andino, el cual es el más grande de la zona. Para resolver esta instancia, se considera que las rutas de *deadheading* tienen una duración menor de un 30 % comparado a la ruta comercial, al igual que en el terminal Juanita. El problema resultante tiene un tamaño de 640 mil variables, 320 mil de restricciones y 2.5 millones de coeficientes distintos de cero.

El tiempo de resolución requerido fue de 3 horas y 54 minutos, obteniendo un 0.70 % de *gap*. En cuanto a los resultados se tiene que el número de buses requeridos es de 147 y el diseño de flota es el siguiente:

Servicio	F02	F03	F03c	F05	F06	F09	F11	F19	F20	F21	F22	Total
Buses Plaza 42	4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	6
Buses Plaza 56	2	0	3	0	0	0	5	0	0	11	8	29
Buses Plaza 60	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3
Buses Plaza 97	2	18	0	25	25	12	1	10	16	0	0	109
Total	8	18	4	25	25	12	7	13	16	11	8	147

Tabla 4.22: Diseño de flota para el terminal Pie Andino.

El tiempo de resolución requerido fue de 15 veces mayor comparado al terminal Juanita. Lo anterior se debe a que este terminal posee 2 servicios más y tiene 4 tipos de buses diferentes, lo que aumenta el tamaño de combinaciones posibles.

El valor de la función objetivo fue de \$ 50,341,173, por lo cual en el peor caso existe una brecha de \$ 352,388 respecto a la mejor solución posible (0 % *gap*). El costo fijo asociado a una variable I activa corresponde a \$260,000 (ver Anexo A.4), entonces la brecha de \$ 352,388 corresponde a lo más a 1 bus, por lo que la solución encontrada es una buena solución y se adecua a los requerimientos operacionales de la empresa, además el tiempo de resolución es bajo considerando la magnitud del problema.

En la siguiente sección se presentarán aplicaciones tecnológicas que servirán para apoyar la implementación real del modelo.

Capítulo 5

APLICACIÓN TECNOLÓGICA DEL MODELO PROPUESTO

Para apoyar la gestión operacional diaria se desarrolla una aplicación dinámica, que permite obtener el rendimiento de ICF e ICR para cada servicio-sentido j , en cualquier punto intermedio correspondiente al largo de duración del período p . Lo anterior se realiza a través de reportes proporcionados por SONDA, los cuales permiten obtener datos relevantes de los buses, como por ejemplo el servicio que está ejecutando un bus en particular y el momento en que inicio la expedición.

La idea principal de la herramienta es permitir a los operadores COF (Centro de Operación de Flota), los cuales constantemente monitorean la operación real de la flota, observar los rendimientos instantáneos de frecuencia y regularidad, de forma que puedan distribuir los recursos de mejor manera según las necesidades del momento. ¹

La metodología de cálculo de los índices de cumplimiento de ICF e ICR esta basada en la metodología presente en el Anexo I del contrato de concesión disponible en la web².

¹Se agradece el apoyo del Jefe COF, Rodrigo Montero M., con el cual compartimos el conocimiento adquirido en los reportes provistos por SONDA para generar una herramienta aplicable y útil en la empresa.

²<http://www.dtpm.cl/descargas/contratos/ALIMENTADORA/MODIFICACION%20DE%20CONTRATO%20A4.pdf>
[Consulta: 01/06/2012]

5.1. ICF por servicio sentido

El índice de cumplimiento de frecuencia por servicio sentido j para el periodo p del día d se calcula de la siguiente manera:

$$ICF_{jpd} = \begin{cases} 1 & \text{si } \frac{S_{jpd}^{obs}}{S_{jsp}^{req}} \geq 1 \\ \frac{S_{jpd}^{obs}}{S_{jsp}^{req}} & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (5.1)$$

donde:

- S_{jpd}^{obs} : Conjunto de salidas observadas en el servicio sentido j en el periodo p del día d .
- S_{jpd}^{req} : Conjunto de salidas requeridas por programa operacional en el servicio sentido j en el periodo p del día d .

5.2. ICR por servicio sentido

El índice de cumplimiento de regularidad por servicio sentido j para el periodo p se calcula de la siguiente manera:

$$ICR_{jp} = \begin{cases} 1 & \text{si } CV_{jp} \leq 0.4 \\ 1 - \frac{CV_{jp} - 0.4}{1.5 - 0.4} & \text{si } 0.4 < CV_{jp} \leq 1.5 \\ 0 & \text{si } CV_{jp} \geq 1.5 \\ Vacío & \text{si } F_{jp} = 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

donde:

- CV_{jp} : Corresponde al coeficiente de variación del servicio sentido j en el periodo p .
- F_{jp} : Corresponde a la frecuencia del servicio sentido j en el periodo p .

El coeficiente de variación para cada servicio sentido j y periodo p , se calcula con la siguiente fórmula:

$$CV_{jp} = \sqrt{\frac{\sum_{l \in L_{jp}} \frac{(H_{jp}^l - \bar{H}_{jp})^2}{(\bar{H}_{jp})^2}}{|L_{jp}| - 1}} \quad \forall |L_{jp}| \geq 1 \quad (5.3)$$

donde:

- L_{jp} : Conjunto de todos los *headways* del servicio sentido j en el periodo p .
- H_{jp}^l : *Headway* entre la salida l y $l + 1$ del servicio sentido j en el periodo p .
- \bar{H}_{jp} : Promedio de los *headways* del servicio sentido j en el periodo p .
- $|L_{jp}|$: Número de *headways* del servicio sentido j en el periodo p .

Adicionalmente se consideran las siguientes particularidades:

1. Si $|L_{jp}| = 0$ o $|L_{jp}| = 1$ y $F_{jp} < 2$ entonces $CV_{jp} = 1.5$.

2. Si $|L_{jp}| = 1$ y $F_{jp} \geq 2$ entonces $CV_{jp} = \sqrt{\frac{\sum_{l \in L_{jp}} \frac{(H_{jp}^l - H_p^{medio})^2}{(H_p^{medio})^2}}{|L_{jp}| - 1}}$.

donde:

- H_p^{medio} es la duración del periodo p dividido en 2.

Como se desprende de las fórmulas 5.1 y 5.2, el indicador de frecuencia mide la cantidad de salidas para un servicio sentido j en un bloque horario p en comparación a lo planificado y la regularidad mide que tan distantes se realizan los despachos en comparación al promedio de los despachos realizados. Si bien el indicador de frecuencia es bastante importante, ya que una cantidad de buses en operación determina la capacidad de pasajeros a transportar; la regularidad es aún mas importante, debido a que está directamente relacionada con los tiempos de espera de los usuarios. Cortes et al. (2010) demuestran que intervalos regulares en la ruta minimizan el tiempo promedio de espera de los usuarios. Lo anterior motiva a incorporar una herramienta que permita mejorar la regularidad en los despachos, la que se detallará en la siguiente sección.

5.3. Intervalo óptimo de la próxima salida

Dado que la regularidad esta directamente relacionada con los tiempos de espera de los usuarios, en esta sección se describe una herramienta desarrollada que proporciona el tiempo en el cual se debe realizar la siguiente salida, de modo de mejorar el indicador de regularidad. Para obtener lo anterior es necesario encontrar el intervalo entre la última salida efectuada y la siguiente, como se muestra en la figura 5.1, de tal forma que se minimice el coeficiente de variación:

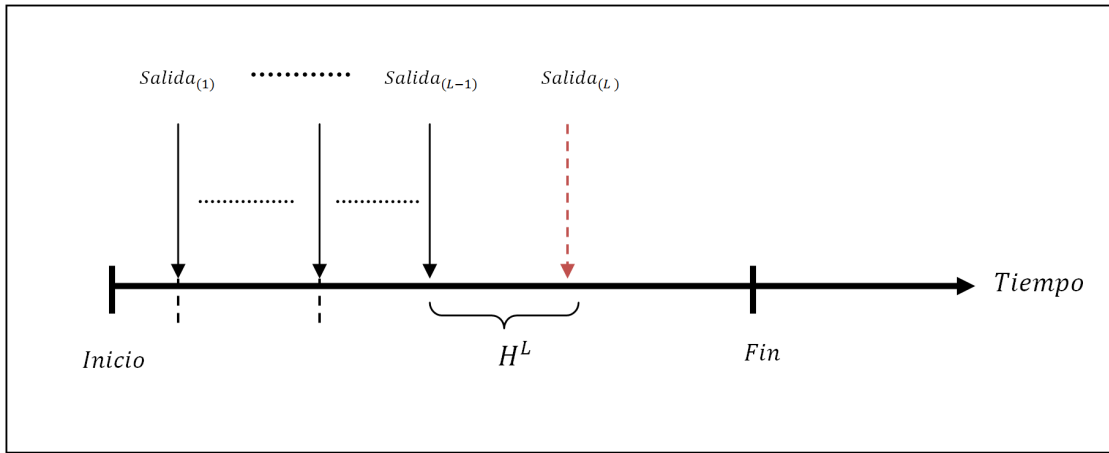


Figura 5.1: Próxima salida en intervalo óptimo.

Utilizando la nomenclatura de 5.2, el problema a resolver corresponde a encontrar el *headway* entre la salida $L - 1$ y L definido por H_{jp}^L que minimice el coeficiente de variación:

$$\min_{H_{jp}^L} CV_{jp} = \sqrt{\frac{\sum_{l \in L_{jp}} \frac{(H_{jp}^l - \bar{H}_{jp})^2}{(\bar{H}_{jp})^2}}{L_{jp} - 1}} \quad \forall L_{jp} \geq 1 \quad (5.4)$$

Si se define $G_{jp} = \sqrt{\sum_{l \in L_{jp}} (H_{jp}^l - \bar{H}_{jp})^2}$, el problema anterior se puede escribir como:

$$\min F_{jp} = \frac{\sqrt{\sum_{l \in L_{jp}} (H_{jp}^l - \bar{H}_{jp})^2}}{\bar{H}_{jp}} = \frac{G_{jp}}{\bar{H}_{jp}}$$

Derivando la función F con respecto al último *headway* H_{jp}^L se obtiene:

$$\frac{dF_{jp}}{dH_{jp}^L} = \frac{\frac{dG_{jp}}{dH_{jp}^L} \cdot \bar{H}_{jp} - \frac{G_{jp}}{L}}{(\bar{H}_{jp})^2}, \quad \frac{d\bar{H}_{jp}}{dH_{jp}^L} = \frac{1}{L} \quad (5.5)$$

Es importante notar que:

$$\frac{dG_{jp}}{dH_{jp}^L} = \frac{\left(\sum_{l \in L_{jp}} (H_{jp}^l - \bar{H}_{jp})^2\right)'}{2G_{jp}}, \text{ con } ()' \text{ derivada respecto } H_{jp}^L. \quad (5.6)$$

Igualando la derivada de F a 0 se llega a que:

$$\frac{\left(\sum_{l \in L_{jp}} (H_{jp}^l - \bar{H}_{jp})^2\right)' \cdot \bar{H}_{jp}}{2} = \frac{(G_{jp})^2}{L} \quad (5.7)$$

Desarrollando lo anterior se obtiene:

$$\bar{H}_{jp} \cdot \left[\sum_{l=1}^{L-1} (\bar{H}_{jp} - H_{jp}^l) + (H_{jp}^L - \bar{H}_{jp}) \cdot (L-1) \right] = \sum_{l \in L_{jp}} (H_{jp}^l - \bar{H}_{jp})^2 \quad (5.8)$$

Simplificando y agrupando términos:

$$L \cdot (H_{jp}^L - \bar{H}_{jp}) \cdot \bar{H}_{jp} = \sum_{l=1}^L (H_{jp}^l)^2 - \sum_{l=1}^L H_{jp}^l \cdot \bar{H}_{jp} \quad (5.9)$$

Desarrollando el lado izquierdo de la ecuación anterior:

$$L \cdot H_{jp}^L \cdot \bar{H}_{jp} - \sum_{l=1}^L H_{jp}^l \cdot \bar{H}_{jp} = \sum_{l=1}^L (H_{jp}^l)^2 - \sum_{l=1}^L H_{jp}^l \cdot \bar{H}_{jp} \quad (5.10)$$

Donde finalmente se obtiene el intervalo óptimo:

$$H_{jp}^L = \frac{\sum_{l=1}^{L-1} (H_{jp}^l)^2}{\sum_{l=1}^{L-1} H_{jp}^l} \quad (5.11)$$

El procedimiento anterior resulta poco práctico si los despachos hasta la salida $L-1$ han sido muy irregulares, ya que al utilizarlo iterativamente y optimizar la regularidad de los despachos faltantes, se podría tener como repercusión realizar menos salidas que las requeridas, dado que \tilde{H}_{jp}^L multiplicado por el número de salidas faltantes podría ser muy superior al tiempo restante para terminar el bloque.

Para mejorar tal falencia, se optimizará la regularidad, pero considerando la cantidad de salidas faltantes del bloque, procedimiento que se detallará en la siguiente sección.

5.4. Intervalo óptimo de las próximas n salidas

Cumplir con la cantidad de salidas requeridas por periodo y servicio-sentido es indispensable, debido a que la cantidad de buses en la calle tiene relación directa con la oferta de capacidad de transporte. Dado esto, se hace necesario optimizar la regularidad, pero considerando el total de salidas faltantes del bloque; es decir, si se deben realizar L salidas en el servicio-sentido j , periodo p y faltan aún n salidas, se deben encontrar los intervalos $\{H_{jp}^i\}_{i=L-n}^{L+1} = \overline{\{H_{jp}^n\}}$ como se muestra en la Figura 5.2.

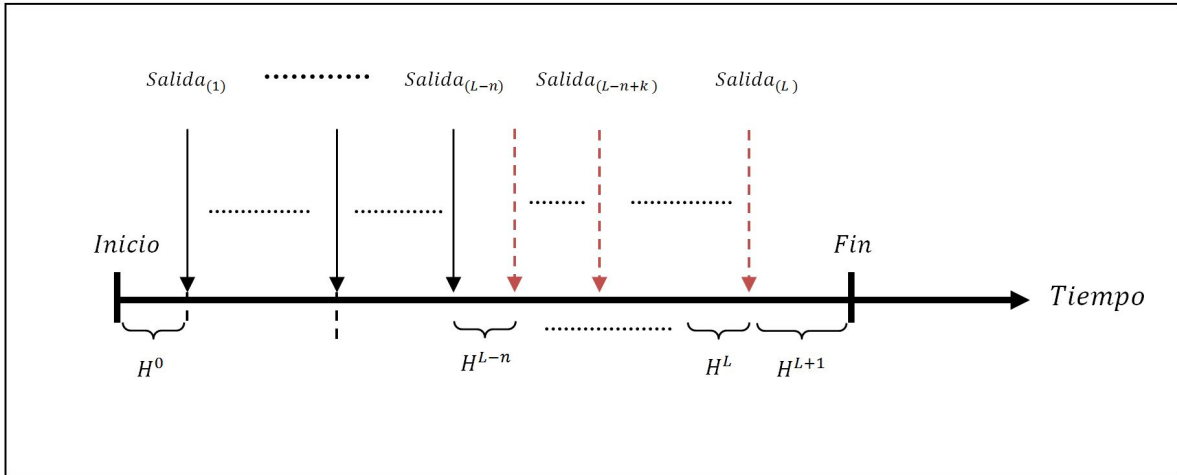


Figura 5.2: Intervalos óptimos para las próximas n salidas.

Adicionalmente, se considera el intervalo de la primera salida respecto al inicio (H_{jp}^0) y de la última respecto al fin (H_{jp}^{L+1}), por lo que el problema a resolver en este caso corresponde a encontrar el conjunto $\{H_{jp}^i\}_{i=L-n}^{L+1}$ que minimice el coeficiente de variación:

$$\min_{\{H_{jp}^i\}_{i=L-n}^{L+1}} CV_{jp} = \sqrt{\frac{\sum_{l \in L_{jp}} \frac{(H_{jp}^l - \bar{H}_{jp})^2}{(\bar{H}_{jp})^2}}{L_{jp} - 1}} \quad \forall L_{jp} \geq 1 \quad (5.12)$$

sujeito a:

$$\sum_{l=0}^{L+1} H_{jp}^l = T_p \quad (5.13)$$

donde T_p corresponde a la duración del periodo p .

El problema anterior es no lineal, por lo que para encontrar la solución se utilizarán las condiciones de KKT sobre el siguiente Lagrangeano:

$$L(\overline{\{H_{jp}^n\}}, \lambda) = CV_{jp} + \lambda \cdot \left(\sum_{l=0}^{L+1} H_{jp}^l - T_p \right) \quad (5.14)$$

Los puntos que minimizan a CV_{jp} sujeto a la restricción $\sum_{l=0}^{L+1} H_{jp}^l - T_p = 0$ están dentro de los puntos críticos de $L(\overline{\{H_{jp}^n\}}, \lambda)$ que hacen cero las derivadas parciales respecto a H_{jp}^i con $(i = L - n, \dots, L + 1)$ y que hacen cero la derivada parcial con respecto a λ :

$$\frac{\partial L(\overline{\{H_{jp}^n\}}, \lambda)}{\partial H_{jp}^i} = \frac{\partial CV_{jp}}{\partial H_{jp}^i} + \lambda \cdot \frac{\partial \left(\sum_{l=0}^{L+1} H_{jp}^l - T_p \right)}{\partial H_{jp}^i} = 0 \quad (5.15)$$

$$\frac{\partial L(\overline{\{H_{jp}^n\}}, \lambda)}{\partial \lambda} = 0 \Leftrightarrow \sum_{l=0}^{L+1} H_{jp}^l - T_p = 0 \quad (5.16)$$

De expresión (5.15) se desprenden las siguientes $n + 1$ ecuaciones:

$$\frac{\partial CV_{jp}}{\partial H_{jp}^{L-n}} = \frac{\frac{\partial G_{jp}}{\partial H_{jp}^{L-n}} \cdot \bar{H}_{jp} - \frac{G_{jp}}{L}}{(\bar{H}_{jp})^2} = -\lambda \quad (5.4.1)$$

⋮

$$\frac{\partial CV_{jp}}{\partial H_{jp}^{L+1}} = \frac{\frac{\partial G_{jp}}{\partial H_{jp}^{L+1}} \cdot \bar{H}_{jp} - \frac{G_{jp}}{L}}{(\bar{H}_{jp})^2} = -\lambda \quad (5.4.n+1)$$

Las $n + 1$ ecuaciones son iguales a $-\lambda$ y al relacionarlas se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\frac{\partial G_{jp}}{\partial H_{jp}^{L-n}} \cdot \bar{H}_{jp} - \frac{G_{jp}}{L}}{(\bar{H}_{jp})^2} = \frac{\frac{\partial G_{jp}}{\partial H_{jp}^{L-n+1}} \cdot \bar{H}_{jp} - \frac{G_{jp}}{L}}{(\bar{H}_{jp})^2} \quad (\text{a.1})$$

⋮

$$\frac{\frac{\partial G_{jp}}{\partial H_{jp}^{L-1}} \cdot \bar{H}_{jp} - \frac{G_{jp}}{L}}{(\bar{H}_{jp})^2} = \frac{\frac{\partial G_{jp}}{\partial H_{jp}^L} \cdot \bar{H}_{jp} - \frac{G_{jp}}{L}}{(\bar{H}_{jp})^2} \quad (\text{a.n})$$

Al desarrollar la ecuacion (a.k), se obtiene:

$$\frac{\partial G_{jp}}{\partial H_{jp}^{L-n+k}} = \frac{\partial G_{jp}}{\partial H_{jp}^{L-n+k+1}} \iff H_{jp}^{L-n+k} = H_{jp}^{L-n+k+1} \quad (5.17)$$

El resultado de (5.17) es válido para $k = \{0, \dots, n\}$ por lo que:

$$H_{jp}^{L-n} = H_{jp}^{L-n+1} = \dots = H_{jp}^{L+1} = H_{jp}^{opt} \quad (5.18)$$

De expresión (5.18) se concluye que todos los intervalos entre los despachos deben ser iguales y el valor óptimo de los *headways* es igual a H_{jp}^{opt} .

De la ecuación (5.16) se desprende que $\lambda \geq 0$, ya que la ecuación 5.13 debe satisfacerse. Al reemplazar el valor obtenido de (5.18) en la ecuación (5.13) se obtiene el intervalo de despacho óptimo para las siguientes n salidas:

$$H_{jp}^{opt} = \frac{T_p - \sum_{l=0}^{L+n-1} H_{jp}^l}{n+1} \quad (5.19)$$

5.5. Implementación herramienta computacional

La herramienta fue desarrollada en Microsoft Excel, utilizando el lenguaje de programación Visual Basic for applications y el uso de ActiveX Data Objects, para poder realizar consultas SQL desde VBA. Un ejemplo de como luce la aplicación se presenta a continuación:

Terminal	Pie Andino																		
Tipo día	Laboral																		
Hora Reporte	18:50																		
Ejecutar																			

09 - Punta Tarde 17:30:00-20:29:59												Salidas Parciales a las: 18:50:59					Salidas Totales Punta Tarde 17:30:00-20:29:59				
Terminal	Servicio	Sentido	Requeridas	Observadas	Faltantes	ICF	ICR	Ultima PPU Despachada	Hora Ultimo Despacho	Hora próximo despacho	Óptimo entre despachos	S - S	Requeridas PO	Observadas	Faltantes	ICF					
Pie Andino	F02	Ida	11	10	-1	91%	96%	ZK-7758	18:46:36	18:52:36	0:06:52	F02I	24	10	-14	42%					
Pie Andino	F02	Regreso	11	8	-3	73%	81%	BBKD-21	18:39:40	18:45:40	0:06:28	F02R	24	8	-16	33%					
Pie Andino	F03	Ida	11	9	-2	82%	70%	CJRC-28	18:49:01	18:56:01	0:07:42	F03I	21	9	-12	43%					
Pie Andino	F03	Regreso	10	7	-3	70%	100%	BWRF-25	18:49:48	18:56:48	0:07:09	F03R	20	7	-13	35%					
Pie Andino	F03c	Ida	5	5	0	100%	96%	WJ-2886	18:45:37	18:59:37	0:14:51	F03cI	11	5	-6	45%					
Pie Andino	F03c	Regreso	5	4	-1	80%	100%	WU-5577	18:50:18	19:02:18	0:12:22	F03cR	11	4	-7	36%					
Pie Andino	F05	Ida	14	10	-4	71%	95%	CJRD-48	18:50:25	18:54:25	0:04:43	F05I	30	10	-20	33%					
Pie Andino	F05	Regreso	14	14	0	100%	70%	CJRC-78	18:50:26	18:55:26	0:05:49	F05R	30	14	-16	47%					
Pie Andino	F06	Ida	13	10	-3	77%	97%	CJRC-76	18:47:50	18:52:50	0:05:40	F06I	27	10	-17	37%					
Pie Andino	F06	Regreso	14	12	-2	86%	79%	CJRG-31	18:45:18	18:51:18	0:06:07	F06R	28	12	-16	43%					
Pie Andino	F09	Ida	14	16	0	114%	81%	BHRX-56	18:43:41	18:50:41	0:07:04	F09I	30	16	-14	53%					
Pie Andino	F09	Regreso	19	16	-3	84%	90%	BWRF-19	18:50:38	18:53:38	0:03:40	F09R	42	16	-26	38%					
Pie Andino	F11	Ida	9	7	-2	78%	100%	WU-5565	18:40:16	18:49:16	0:09:05	F11I	18	7	-11	39%					
Pie Andino	F11	Regreso	9	8	-1	89%	100%	PW-6150	18:42:05	18:51:05	0:09:44	F11R	18	8	-10	44%					
Pie Andino	F19	Ida	17	14	-3	82%	100%	BBKB-13	18:49:57	18:53:57	0:04:46	F19I	34	14	-20	41%					
Pie Andino	F19	Regreso	15	14	-1	93%	97%	WU-5562	18:38:22	18:43:22	0:05:17	F19R	34	14	-20	41%					
Pie Andino	F20	Ida	10	8	-2	80%	87%	CJRC-77	18:39:50	18:47:50	0:08:28	F20I	20	8	-12	40%					
Pie Andino	F20	Regreso	10	7	-3	70%	100%	CJRD-39	18:40:28	18:47:28	0:07:47	F20R	20	7	-13	35%					
Pie Andino	F21	Ida	15	11	-4	73%	97%	BBKB-14	18:46:26	18:50:26	0:04:41	F21I	32	11	-21	34%					
Pie Andino	F21	Regreso	15	10	-5	67%	95%	ZA-9339	18:49:01	18:53:01	0:04:21	F21R	32	10	-22	31%					
Pie Andino	F22	Ida	11	8	-3	73%	100%	WU-5573	18:42:48	18:48:48	0:06:18	F22I	24	8	-16	33%					
Pie Andino	F22	Regreso	11	10	-1	91%	83%	WJ-2895	18:48:46	18:54:46	0:06:44	F22R	24	10	-14	42%					

Figura 5.3: Herramienta ICF-ICR online.

Como se observa en la Figura 5.3, además de los indicadores propuestos se agrega la información de la última PPU despachada y la hora de salida. Esto permite obtener cuantas salidas se han realizado luego de procesado el reporte, ya que descargar los datos de SONDA y obtener el cálculo lleva alrededor de 4 minutos, tiempo en cual puede existir más de 1 salida. Esto permite gestionar en los periodos de cambio de bloque (5 minutos antes que termine el bloque por ejemplo) las salidas faltantes exigidas por programa operacional.

El reporte ICF-ICR online se complementa con el software Sinóptico provisto por Sonda (<http://www.sonda.com/gestion-de-flotas/#>), herramienta que permite gestionar la flota y observar la posición de los buses en cada momento con un desfase del orden de 30 segundos. Adicionalmente, es posible planificar en el software las salidas que realizará un conjunto de buses, lo que permite poner a prueba la solución de la modelación propuesta. En la siguiente sección se detalla la implementación del itinerario programado por bus.

5.6. Implementación del itinerario programado por bus

Como se mencionó en la sección 5.3, actualmente la empresa posee el software Sinóptico, el cual además de proporcionar la posición del bus, permite obtener información relevante para cada bus. Por ejemplo el estado del bus (en ruta, detenido, en panne , etc), paradero más cercano, velocidad instantánea, distancia recorrida desde que fue asignado, patente, plaza, tiempo aproximado al que se encuentra el bus que le antecede y también el sucesor.

Es importante destacar, que el detalle de la programación de la flota se puede cargar al sistema Sinóptico, en el módulo Itinerario Planificación. Gracias a esta herramienta es posible realizar seguimiento y obtener la diferencia entre lo programado y lo ejecutado, para así realizar las gestiones pertinentes; por ejemplo si el bus va más atrás/adelante de lo programado, es posible enviar un mensaje al conductor para que aumente/disminuya la velocidad. STP aún no ha logrado aplicar esta herramienta de forma exitosa, ya que en la planificación realizada hasta el 1er semestre 2013 solo se resolvía el problema de diseño de horarios, por lo cual no se conocía lo que cada bus debía realizar en el día de operación.

Para implementar el itinerario programado, se carga en Sinóptico la programación del modelo y además se utiliza una cartilla para cada bus, como se aprecia en la Figura 5.4. Cada una las cartillas es entregada a un conductor, el cual debe cumplir con las salidas exigidas.

Bus 1		Bus 2		Bus 3		Bus 4	
Ruta	Hora	Ruta	Hora	Ruta	Hora	Ruta	Hora
Regreso	17:30	Ida	17:30	Regreso	17:46	Ida	17:46
Ida	18:02	Regreso	18:02	Ida	18:18	Regreso	18:18
Regreso	18:34	Ida	18:34	Regreso	18:50	Ida	18:50
Ida	19:06	Regreso	19:06	Ida	19:22	Regreso	19:22
Regreso	19:38	Ida	19:38	Regreso	19:54	Ida	19:54
Ida	20:14	Regreso	20:12	Ida	20:26	Regreso	20:26
Regreso	20:42	Ida	20:48	Regreso	20:58	Ida	21:10
		Regreso	21:18	Ida	21:26		

Figura 5.4: Programación de buses servicio F03C.

La Figura 5.5 muestra el funcionamiento de la herramienta de planificación; notar que los buses que van encima del carril corresponden a buses planificados (programados) y los externos seguidos de una línea fina muestran como lucen en su operación real. Dado lo anterior, si el bus externo va mas atrás (o adelante) del bus del carril, corresponde a que va atrasado (o adelantado) según lo planificado. Las siguientes Figuras muestran la operación real del servicio F03C, particularmente para un día tipo laboral desde las 17:30 hasta las 18:41:

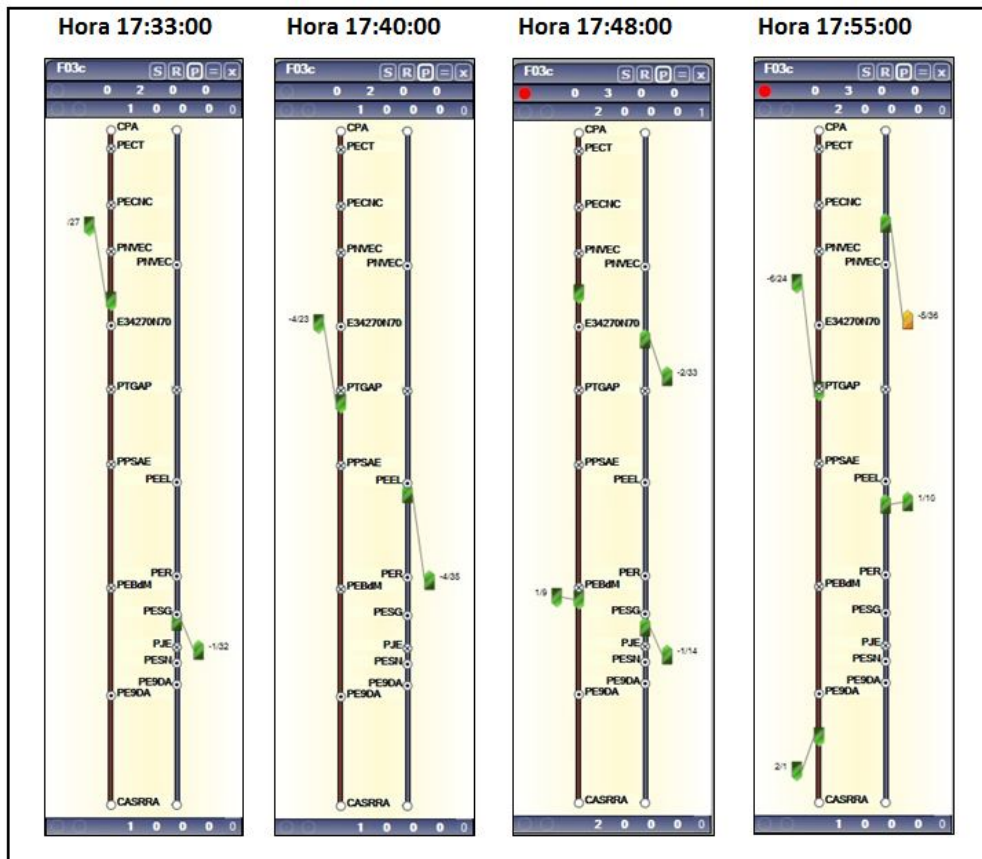


Figura 5.5: Operación real F03C entre 17:33-17:55.

Como se observa en la Figura 5.5, a las 17:33 existen 2 buses en ruta, lo que coincide con la programación de buses de la Figura 5.4. A las 17:48, existen 3 buses reales en ruta y 4 programados, debido a que la salida de las 17:46 desde el terminal no se ha realizado. Esta salida se realiza tardíamente, notamos que a las 17:55 se encuentran los 4 buses requeridos trabajando, con 2 buses operando atrasados según lo planificado.

En la Figura 5.6 a las 18:04 se observan los 4 buses requeridos trabajando, con 2 que están atrasados y 2 adelantados. El adelantamiento de los 2 buses se acentúa a las 18:12, observando que uno de ellos llegó de forma muy anticipada al terminal, por lo que existe un bus programado en el carril sin su bus real. Finalmente a las 18:41, se observa que los buses reales van muy cerca a los programados, lo que permite cumplir con las salidas exigidas y además obtener una buena regularidad en el servicio.

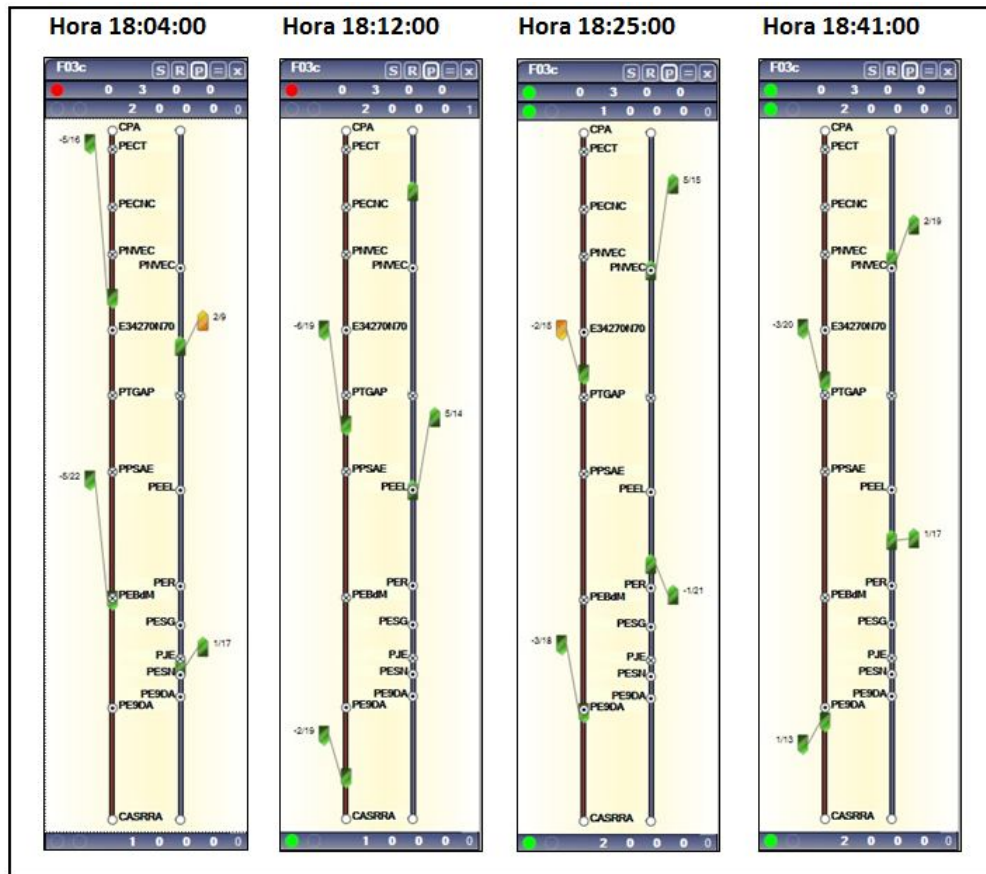


Figura 5.6: Operación real F03C entre 18:04-18:41.

A continuación se detallará el proceso de implementación del modelo en la empresa y los resultados operacionales obtenidos.

5.7. Implementación real

En esta sección, se presenta el proceso de implementación de los resultados del modelo en la empresa y posteriormente los rendimientos reales en frecuencia y regularidad.

Como se presentó en la sección 4.4.3, los resultados del modelo requieren más buses de los disponibles, tanto para el terminal Juanita como para Pie Andino. Por tal motivo STP SANTIAGO debió negociar con Transantiago un aumento de flota, proceso que inició en Octubre del 2012 y culminó en Abril 2013, acordando incorporar 43 buses de tipo plaza 98 a la Flota Operativa Base (FOB), con lo cual la FOB de la empresa aumentó a 374 buses. La distribución por terminal resultante fue la siguiente:

Terminal	FOB antigua	Aumento	FOB actual
Juanita	118	16	134
La Primavera	58	8	66
Los Tilos	25	0	25
Pie Andino	130	19	149

Tabla 5.1: Número de buses en cada terminal post-negociación.

Los 43 buses ingresaron a la operación el día 17-06-2013, periodo en el cual comenzó a regir la modificación del programa operacional basado en los resultados del modelo, los cuales fueron previamente verificados por el departamento de planificación de Transantiago. La presentación realizada a Transantiago constó de los siguientes documentos:

- Anexo-PO N°1-Servicios: anexo que contiene la descripción de los servicios (existentes y eliminados) de la Unidad de Negocio.
- Anexo-PO N°2-Trazados: anexo que contiene para cada servicio de la Unidad de Negocio, los puntos de inicio (ida y regreso) y el trazado (calle a calle).
- Anexo-PO N°3-Horarios de Salida de Buses: anexo que contiene para cada servicio-sentido de la Unidad de Negocio, los horarios de salida, tipo de bus y su capacidad de transporte para cada una de las expediciones.

- Anexo-PO N°4-Variables de Operación de los Servicios: anexo que contiene las variables de velocidad y distancias por servicio-sentido, para cada media hora y tipo de día.
- Anexo-PO N°5-Secuencias de Paradas: anexo que contiene las paradas de cada uno de los servicios-sentido ordenadas secuencialmente, indicando en detalle la ubicación de cada una.
- Anexo-PO N°6-Horarios de Pasada por Puntos Intermedios: anexo que contiene los horarios de pasada de servicios-sentidos en puntos intermedios del trazado.
- Anexo-PO N°7-Usos de Infraestructura Tarifada: anexo que contiene el uso de infraestructura por la cual el Concesionario deba efectuar un pago.
- Anexo-PO N°8-Plan de Campaña Informativa: anexo que contiene la presentación de un Plan de Campaña Informativa que deberá detallar los medios que se emplearán para informar a los usuarios los nuevos servicios y/o modificaciones.
- Anexo-PO N°9-Frecuencias por Servicio Sentido: anexo que contiene, para cada servicio-sentido de la Unidad de Negocio, los horarios de salida por media hora, frecuencia, su tiempo de recorrido y su capacidad de transporte.
- Anexo-PO N°10-Programaciones: anexo que contiene todos los movimientos de los buses comerciales y no comerciales agrupados por bus lógico, paso por p^ortico, expediciones consideradas a pago y flota requerida.

Se debe destacar que la empresa no presentaba una herramienta para generar el Anexo 10 con las programaciones de los buses, problema que fue solucionado con la utilización e implementación de la metodología propuesta en esta tesis.

En la siguiente sección se presentan los rendimientos reales obtenidos por la empresa, particularmente para el terminal Juanita en los meses de noviembre a diciembre del 2012 y de marzo a agosto del año 2013.

5.8. Rendimientos operacionales

Las mayores exigencias operacionales del día se encuentran en los periodos puntas (mañana y tarde); por este motivo, se mostrará la evolución de los rendimientos de frecuencia y regularidad para tales periodos. Como se observa en la Figura 5.7, el indicador de frecuencia presenta un aumento de 2.8% en la punta mañana y un aumento de 5.6% en la punta tarde desde noviembre 2012 a agosto 2013.

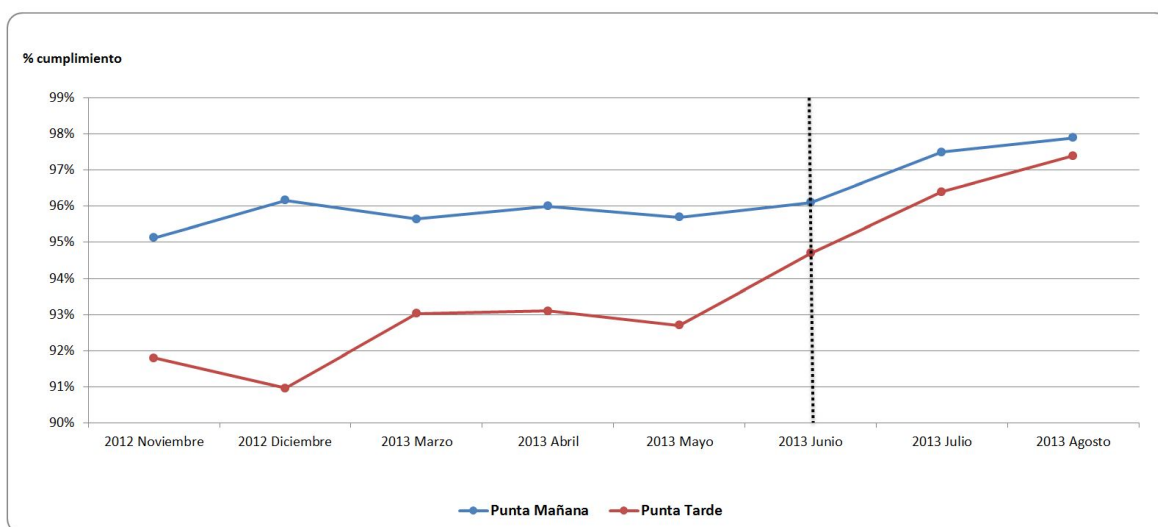


Figura 5.7: Evolución rendimiento indicador Frecuencia para terminal Juanita.

Se observa una clara pendiente positiva desde la implementación de los resultados (línea vertical punteada), logrando en la punta mañana un rendimiento de 97.9% y en la punta tarde un rendimiento de 97.4%. Adicionalmente, en la Tabla 5.2 se observa como disminuye la brecha entre los rendimientos de los periodos punta mañana y tarde, con una diferencia inicial de 3.33% en noviembre 2012 hasta un mínimo de 0.5% en agosto 2013.

Periodo	Nov 12	Dic 12	Mzo 13	Abr 13	May 13	Jun 13	Jul 13	Ago 13
Diferencia PMA-PTA	3.33 %	5.20 %	2.62 %	2.90	3.00 %	1.40 %	1.10 %	0.50 %

Tabla 5.2: Diferencia de rendimientos de frecuencia entre periodos punta mañana y tarde.

Al comparar los rendimientos de frecuencia en horarios puntas obtenidos por el terminal Juanita, con el rendimiento promedio del sistema en el periodo abril-junio 2013³, se observa en las Figuras 5.9 y 5.8 que luego de la implementación, los rendimientos alcanzados en frecuencia tanto en punta mañana como tarde son muy superiores al promedio del sistema.

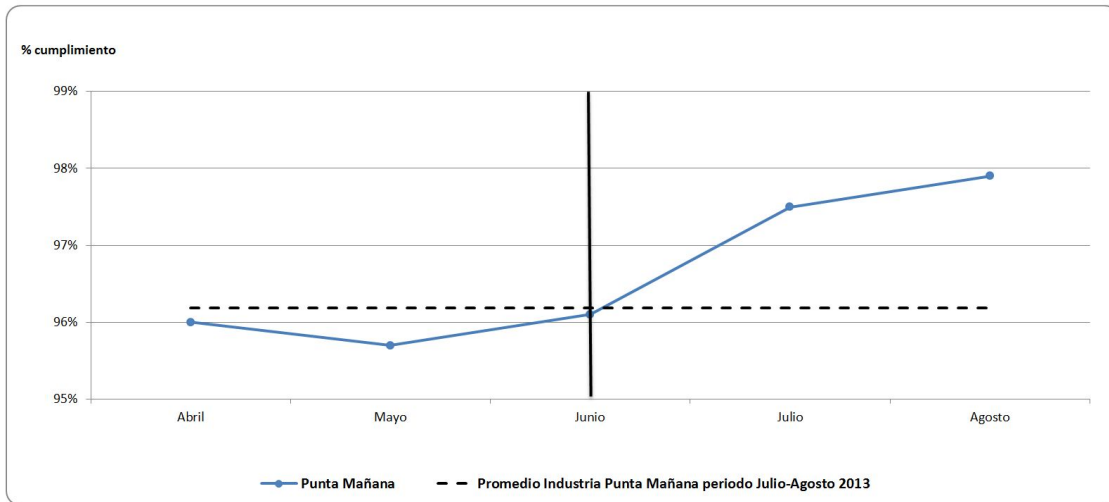


Figura 5.8: Comparación con ICF PMA promedio del sistema periodo Abril-Junio 2013.

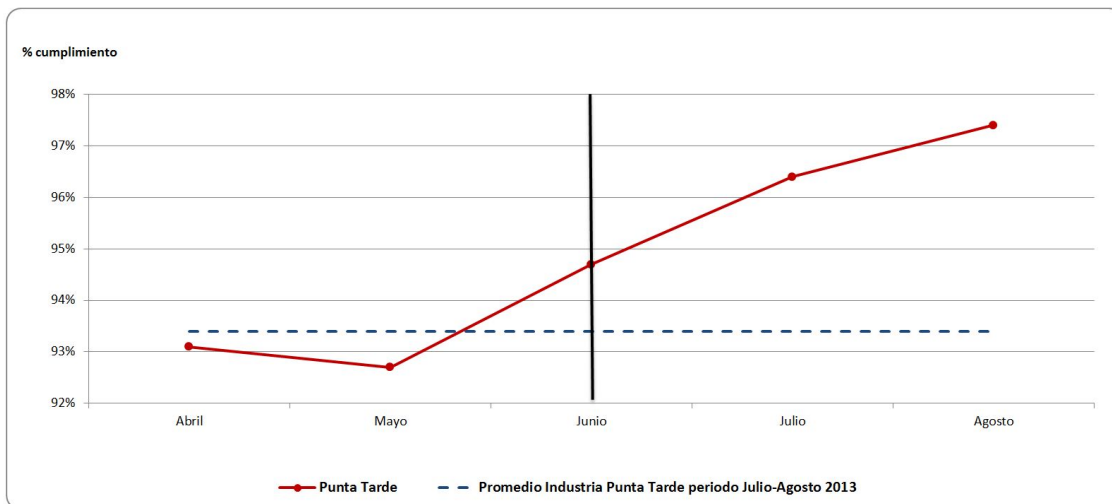


Figura 5.9: Comparación con ICF PTA promedio del sistema periodo abril-junio 2013.

³Disponible en: <http://www.dtpm.cl/index.php/2013-04-29-20-33-57/ranking-calidad-de-servicio> [Consulta: 01/10/2013]

Como se observa en la Figura 5.10, el indicador de regularidad (ICR-I) presenta un aumento de 7.5 % en la punta mañana y un aumento de 11.4 % en la punta tarde desde noviembre 2012 a agosto 2013.

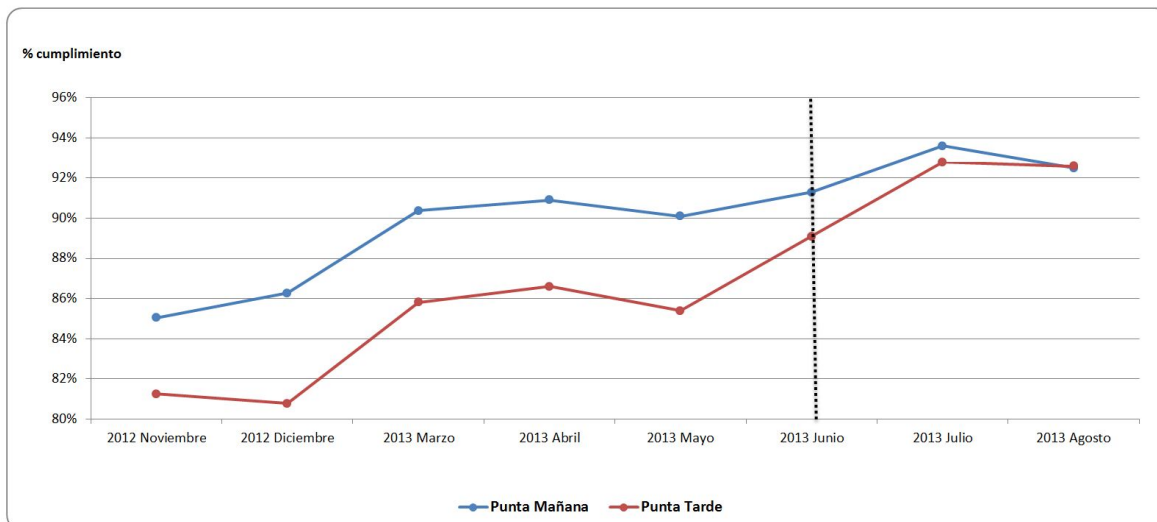


Figura 5.10: Evolución rendimiento indicador Regularidad para terminal Juanita.

En relación a la regularidad, del mismo modo se observa una clara pendiente positiva desde la implementación de los resultados (línea vertical punteada), logrando en la punta mañana un rendimiento de 92.5 % y en la punta tarde un rendimiento de 92.6 %. Adicionalmente, en la Tabla 5.3 se observa como disminuye la brecha entre los rendimientos de los periodos punta mañana y tarde, con una diferencia inicial de 3.79 % en noviembre 2012 hasta un mínimo de -0.10 % en agosto 2013.

Periodo	Nov 12	Dic 12	Mzo 13	Abr 13	May 13	Jun 13	Jul 13	Ago 13
Diferencia PMA-PTA	3.79 %	5.48 %	4.55 %	4.30	4.70 %	2.20 %	0.80 %	-0.10 %

Tabla 5.3: Diferencia de rendimientos de regularidad entre periodos punta mañana y tarde.

Se observa que en Julio 2013, el terminal supera el 90 % de ICR-I en ambas puntas, valor muy superior al rendimiento promedio de la industria del trimestre abril-junio 2013, equivalentes a 83.25 % y 81.87 % para el periodo punta mañana y tarde respectivamente.

El Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM), trimestralmente evalúa a las siete unidades de negocio del sistema a través de indicadores de frecuencia y regularidad y adicionalmente genera un ranking de estos indicadores⁴.

A continuación, se compararán los rendimientos del primer ranking (1R) de calidad de servicio periodo julio-septiembre 2012 (relleno achurado en los gráficos), con el quinto ranking (5R) de calidad de servicio periodo julio-septiembre 2013 (relleno sólido en los gráficos), tomando como base para cada unidad de negocio el rendimiento del periodo julio-septiembre 2012. Los resultados obtenidos son los siguientes:

En la punta mañana, todas las empresas aumentan sus rendimientos de ICF, como se observa en la Figura 5.11, donde STP obtuvo el tercer lugar, aumentando un 2.1 % su rendimiento de frecuencia a nivel unidad. En relación a la regularidad, del mismo modo se evidencia un alza de todas las empresas, donde STP en este caso lidera el ranking con un aumento de 11 % y ocupa además el primer lugar de regularidad como se observa en la Figura 5.12. Se destaca el hecho que solamente Alsacia no logra cumplir con el estandar mínimo de 80 %.

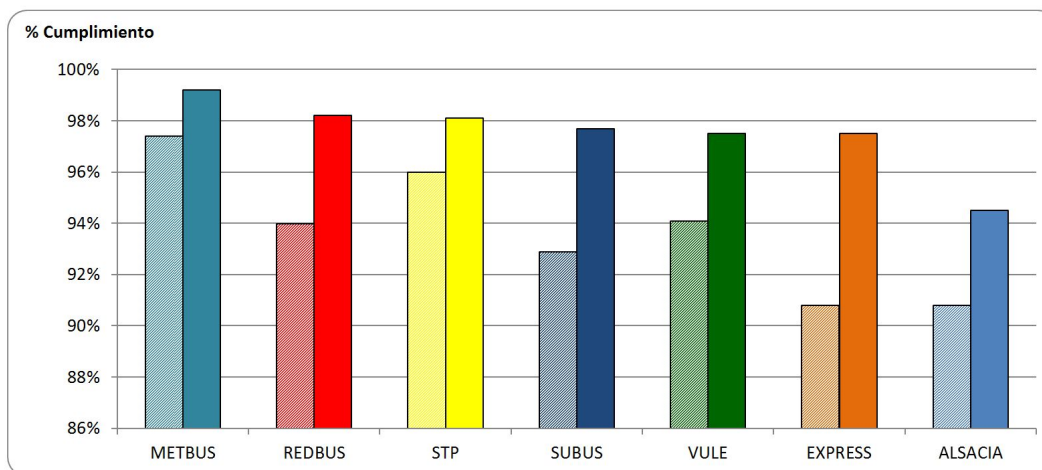


Figura 5.11: Comparación ICF punta mañana.

⁴<http://www.dtpm.cl/index.php/2013-04-29-20-33-57/ranking-calidad-de-servicio>

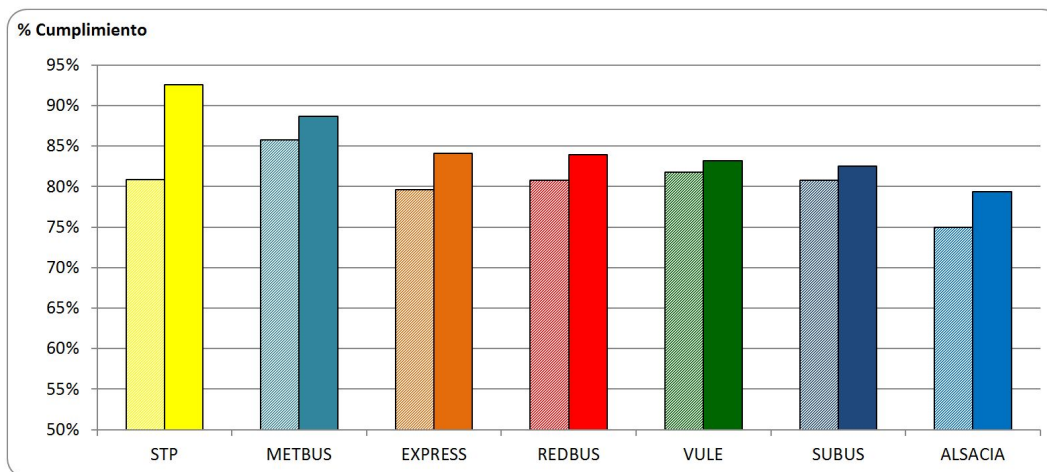


Figura 5.12: Comparación ICR-I punta mañana.

En la punta tarde todas las empresas aumentan sus rendimientos de ICF, como se observa en la Figura 5.13, con STP obteniendo el segundo lugar, aumentando un 4.9 % su rendimiento de frecuencia a nivel unidad. En relación a la regularidad, se evidencia nuevamente un alza de todas las empresas a excepción de Vule y Red Bus, las cuales disminuyen levemente su rendimiento. STP ocupa el primer lugar con un 91.7 %, como se observa en la Figura 5.14. Al igual que en la punta mañana, solamente Alsacia no logra cumplir con el estandar mínimo de 80 %.

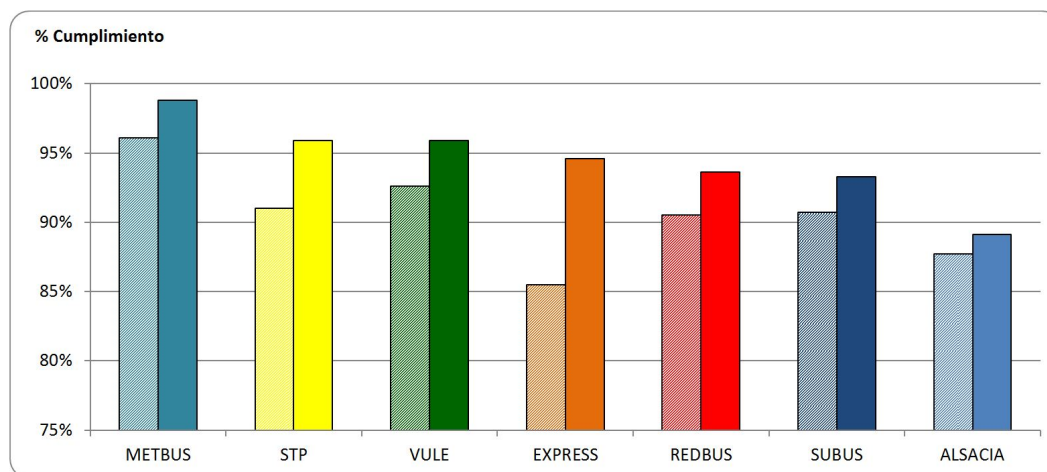


Figura 5.13: Comparación ICF punta tarde.

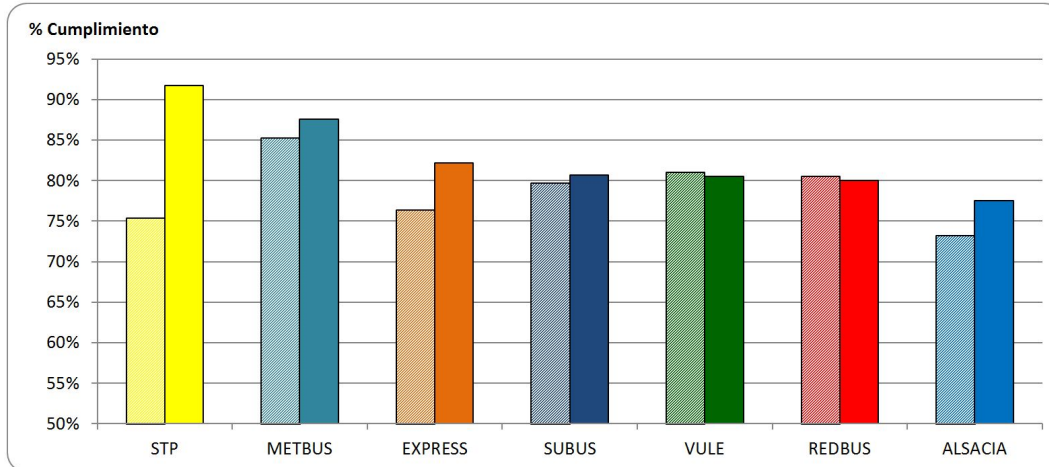


Figura 5.14: Comparación ICR-I punta tarde.

Al analizar la evolución de los descuentos, se observa que luego de la implementación estos se reducen de 2 % (junio-13) a 1 % (agosto-13). La reducción no es directamente proporcional al alza en los indicadores, lo que se debe principalmente a que rendimientos de frecuencia superiores a 92 % no tienen un descuento asociado.

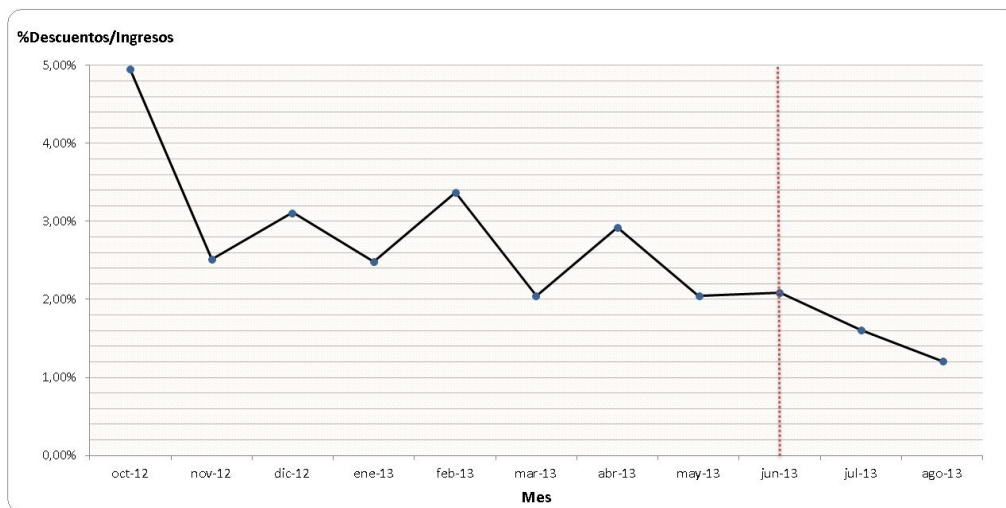


Figura 5.15: Evolución descuentos contractuales de frecuencia y regularidad.

De la implementación del modelo, se desprende que STP logró aumentar su rendimiento de frecuencia como regularidad, disminuir los descuentos y también posicionarse dentro de los primeros lugares del ranking de calidad de servicio trimestral.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un modelo de programación entera mixta para la segunda y tercera etapa del proceso de planificación de las operaciones del Transporte Público, las que corresponden a las etapas de *timetabling* y asignación de buses. Este modelo fue aplicado particularmente para la unidad de negocio 7 del Transantiago a cargo de los servicios F. El modelo propuesto integra las decisiones de horarios de viajes, asignación y programación de buses y su formulación se basa en una red expandida en el tiempo, donde la programación de los buses son caminos en la red y los viajes programados son nodos visitados por esos caminos. El modelo propuesto es lo suficientemente flexible como para adaptarse a diferentes niveles de capacidad, frecuencias y tiempos de viaje para diversos intervalos de tiempo, tanto para rutas de circulación como de *deadheading*.

A pesar que este trabajo se enfoca en resolver el *timetabling* y la asignación de buses, es importante destacar la relevancia de una asignación óptima de conductores, debido a que los costos operacionales recaen en este ítem principalmente (cerca de un 41 %). Es por este motivo que varios autores han buscado resolver las etapas de la asignación de vehículos y conductores de forma conjunta (dado un *timetabling*). En este trabajo, dadas las condiciones impuestas por la autoridad de frecuencia y capacidad de transporte por hora para cada servicio y ruta, no es posible establecer los horarios de viaje y la asignación de buses de manera separada, ya que al haber varios tipos de buses no se sabe de antemano cuál es más

conveniente de utilizar, además de observarse una cantidad fija de buses por tipo.

Al analizar la estrategia de *deadheading*, su aplicación muestra un alto beneficio al minimizar los costos fijos de operación, los cuales están directamente relacionados con el tamaño de la flota. La estrategia muestra una reducción entre un 1.4 % y 9 % en el tamaño de flota comparado al caso de no utilizar *deadheading*, por lo cual determinar rutas de *deadheading* con un tiempo mucho menor al de la ruta comercial es una tarea primordial para los concesionarios al momento de implementar esta estrategia. Adicionalmente, esta estrategia muestra mejores rendimientos al ajustarse tanto a la capacidad de transporte como a las frecuencias mínimas exigidas, permitiendo satisfacer los desbalances de demanda que presentan los servicios con una cantidad menor de buses, comparado al escenario de no utilizar la estrategia.

En relación a los parámetros del modelo, resulta indispensable mencionar el elemento más crítico al momento de implementar los resultados, el que corresponde a los tiempos de viaje. Una subestimación de los tiempos de viaje, básicamente vuelve infactible el cumplimiento de una programación de buses dada, ya que produciría una subestimación de la flota requerida y por ende una merma en los resultados operacionales. El error cometido por STP en sus estimaciones consistía en no incluir los tiempos muertos, los cuales en algunos casos resultan ser un 30 % del tiempo total de viaje, lo que repercute enormemente en los requerimientos de flota para operar.

En cuanto al parámetro de la capacidad de transporte, en esta Tesis se ha desarrollado una metodología para su estimación, la cual se basa en una regresión tipo Kernel sobre las transacciones agrupadas por servicio, ruta y cada media hora. Una de las falencias de esta metodología, corresponde a que sólo observa subidas de pasajeros (transacciones) por media hora y no observa el paradero en que fue realizada la transacción ni en que paraderos se bajan los usuarios, por lo cual no es posible observar el perfil de carga de cada servicio y ruta. Lo anterior se podrá solucionar con los resultados de la investigación entre Transantiago y la Universidad de Chile, en la cual estiman una secuencia de viajes, basados en la secuencia de transacciones de una misma tarjeta bip!. El uso de la información anterior permitirá realizar una planificación adecuada y distribuir los recursos de forma óptima en los servicios.

El principal resultado obtenido fue la programación de los viajes que debe realizar cada

bus dentro del día de operación, lo cual permite generar cartillas de trabajo que pueden facilitar la gestión diaria. Adicionalmente, los desarrollos en tecnologías de información para sistemas AVL (Localización Automática de Vehículos) permiten integrar el resultado del modelo al software de monitoreo de buses Sinóptico, de forma de controlar la operación correcta de la programación propuesta. Si bien en esta Tesis se muestra un itinerario programado para un servicio pequeño de 4 buses (F03C), en la actualidad la empresa esta realizando prototipos en servicios de mayor tamaño (mayor a 17 buses), ya que como se ha observado en el servicio F03C, los conductores se autoregulan en función de las salidas de su cartilla.

La aplicación tecnológica desarrollada, llamada “Reporte ICF-ICR Online”, se ha vuelto fundamental en la operación, ya que logra controlar la cantidad de salidas observadas en función de las requeridas por programa operacional, para cualquier periodo específico dentro de un bloque horario de operación. En relación al intervalo óptimo de salida, este no se logró implementar de forma exitosa, debido a que actualmente la información de los buses se debe descargar desde los servidores de Sonda, lo que demora alrededor de 3 a 4 minutos, tiempo en el cual el despachador puede haber ya gestionado un viaje. Una posible solución para implementar esta herramienta, consiste en poseer la ejecución de los despachos de forma online de manera interna (sin depender de Sonda), generando los despachos con una tablet a través de un sistema web, en la cual se pueda ingresar el servicio, ruta, PPU y conductor.

Finalmente, es importante recalcar que con el enfoque propuesto, la empresa ha aumentado el rendimiento de frecuencia y regularidad a corto plazo, logrando un aumento de 4% en ICF y 6% de ICR-I en el periodo punta tarde. Lo anterior tiene grandes beneficios para los usuarios y la empresa, ya que por una parte se entrega un mejor servicio a los usuarios y por otra parte la empresa logra tener una planificación eficiente, reduciendo los costos y además los descuentos contractuales por incumplimientos de indicadores de ICF e ICR-I.

Bibliografía

- [1] Bokinge, U., Hasselstrom, D., (1980). Improved vehicle scheduling in public transport through systematic changes in the time-table. *Euro. J. Oper. Res.* 5, 388-395.
- [2] Carpaneto, G., Dell' Amico, M., Fischetti, M. and Toth, P. (1989). A branch and bound Algorithm for the Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem. *Networks* 19, 531-548.
- [3] Ceder, A., (1986). Methods for creating bus timetables. *Transportation Research A* 21, 59-83.
- [4] Ceder, A. and Tal, O., (1999). Timetable Synchronization for buses. In N.H.M Wilson Edition. Computer-Aided scheduling of Public Transport. Springer, Berlin 245-258.
- [5] Ceder, A. and Tal, O., (2001). Designing synchronization into bus timetables. *Transportation Research Record*, 1760, 3-9.
- [6] Ceder, A., Golany. B., Tal, O., (2001). Creating bus timetables with maximal synchronization. *Transportation Research Part A* 35, 913-928.
- [7] Ceder, A., (2007). *Public Transit Planning and Operation. Theory, Modeling and Practice*, 1st Ed. Elsevier, Butterworth-Heinemann.
- [8] Ceder, A., (2011). Optimal Multi-Vehicle Type Transit Timetabling and Vehicle Scheduling. *Procedia-Social and Behavioral Science*, 20, 19-30.
- [9] Cortés, C.E., Sáez, D., Milla, F., Nuñez, A., Riquelme, M. (2009). Hybrid predictive control for real-time optimization of public transport systems operations based on

- evolutionary multi-objective optimization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 18(2010), 757-769.
- [10] Cortés, C.E., Jara-Díaz, S., Tirachini, A. (2011). Integrating short turning and dead-heading in the optimization of transit services. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 45(5), 419-434.
- [11] 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.
- [12] Chowdhury, S.M., and Chien, S.I.-J., (2002). Intermodal transit system coordination. *Transportation Planning and Technology*, 25(4), pp. 257-287.
- [13] Dantzing, G.B. and Wolfe, P. (1960). Decomposition Principle for Linear Programs. *Operations Research* 8, 101-111.
- [14] Dell' Amico, M., Fischett, M. and Toth, P. (1993). Heuristic algorithms for the multiple depot vehicle scheduling problem, *Management Science*, 39(1), 115-123.
- [15] Eranki, A., (2004). A model to create bus timetables to attain maximum synchronization considering waiting times at transfer stops. Master's Thesis, Department of Industrial and Management Systems Engineering, University of South Florida.
- [16] 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.
- [17] Freling, R., Wagelmans, A.P., and Paixão, J.M., (2001). Models and Algorithms for Single-Depot Vehicle Scheduling. *Transportation Science* 35, 165-180.
- [18] 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.
- [19] Hastie, T., Tibshirani R., y Friedman, J. (2001), *The Elements of Statistical Learning*, Springer.

- [20] Hall, R.W., (1985). Vehicle Scheduling at a Transportation Terminal with Random Delay en Route. *Transportation Science*, 19, 308-320.
- [21] Huisman, D., Freling, R., Wagelmas, A.P.M., (2005). Multiple-depot integrated vehicle and crew scheduling. *Transportation Sci.* 39(4), 491-502.
- [22] Hurdle, V. F. (1973). Minimum cost schedules for a public transportation route. *Transportation Science.*, 7(2), 109157.
- [23] Ibarra-Rojas, O.J., Fouilhoux, P., Kedad-Sidhoum, S., Rios-Solis, Y.A., (2012). Valid inequalities for the synchronization of bus timetabling. Technical Report PISIS-2012-02 78, Graduate Program in Systems Engineering, UANL, San Nicolás de los Garza, Mexico.
- [24] Ibarra-Rojas, O.J., Y.A. Rios-Solis. 2012. Synchronization of bus timetabling. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(5), 599614.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Klemmt, W., 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.
- [28] Knoppers, P., and Muller, T., (1995). Optimized transfer opportunities in public transport. *Transportation Science*, 29 (1), 101-105.
- [29] Löbel, A. (1998). Vehicle scheduling in public transit and lagrangean pricing. *Management Science*, 44(12), 1637-1649.
- [30] Nadaraya, E. A. (1964). On Estimating Regression. *Theory of Probability and its Applications* 9 (1): 1412.

- [31] Newell, G.F., (1971) Dispatching policies for a transportation route. *Transportation Science*, 5, 91105.
- [32] Paixão, J.M., Branco, I., (1987). A quasi-assignment algorithm for bus scheduling. *Networks* 17, 249-269.
- [33] Ribeiro, C., Soumis, F., (1994). A column generation approach to the multiple-depot vehicle scheduling problem. *Operations Research* Vol. 42, N°1.
- [34] Salzbom, FJM., (1972). Optimum bus scheduling. *Transportation Science*, 6(2), 137148.
- [35] Salzbom, FJM., (1980). Scheduling bus systems with interchanges. *Transportation Science*, 14, 211-220.
- [36] Sheffi, Y. and Sugiyama, M., (1982). Optimal Bus Scheduling for a Single Bus Route: The Time Dependent Case, *Transportation Research Record*, 895:46-62.
- [37] Schonfeld, P., Chang, S., (1991). Multiple period optimization of bus transit systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 25, 453-478.
- [38] 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.
- [39] Watson, G. S., (1964). Smooth regression analysis. *Sankhya: The Indian Journal of Statistics, Series A* 26 (4), 359-372.
- [40] Wiransinghe, S. C., and G. Liu, (1995). Optimal Schedule Design for a Transit Route with One Intermediate Time Point, *Transportation Planning and Technology*, 19, 121-145.

Apéndice A

ANEXOS

A.1. Anexo 1

El ICF se desagrega en 4 capas:

- ICF SSPD: este indicador busca cautelar la oferta de transporte de cada servicio-sentido, en cada período del día de medición.
- ICF SSPM: este indicador busca cautelar la oferta de transporte de todos los servicios-sentido en cada período del mes de medición.
- ICF SSM: este indicador busca cautelar la oferta de transporte de cada servicio-sentido durante el mes de medición.
- ICF UNM: este indicador busca cautelar la oferta de transporte de todos los servicios-sentido de la Unidad durante el mes de medición.

El ICR se desagrega en 2 capas:

- ICR-I: este indicador busca prevenir que se produzcan intervalos de tiempo entre buses demasiado grandes en relación a lo planificado por el operador.

- ICR-P: este indicador busca cautelar la puntualidad en la prestación de los servicios respecto al itinerario informado a los usuarios, en servicios con frecuencia menor a 5 buses hora.

A.2. Anexo 2

Definición periodo	Hora Inicio	Hora Fin	Horas por periodo
13. Pre Nocturno Sábado (Madrugada)	0:00:00	0:59:59	1
14. Nocturno Sábado	1:00:00	5:29:59	4,5
15. Transición Sábado Mañana	5:30:00	6:29:59	1
16. Punta Mañana Sábado	6:30:00	10:59:59	4,5
17. Mañana Sábado	11:00:00	13:29:59	2,5
18. Punta Mediodía Sábado	13:30:00	17:29:59	4
19. Tarde Sábado	17:30:00	20:29:59	3
20. Transición Sábado Nocturno	20:30:00	22:59:59	2,5
21. Pre Nocturno Sábado (Noche)	23:00:00	23:59:59	1
22. Pre Nocturno Domingo (Madrugada)	0:00:00	0:59:59	1
23. Nocturno Domingo	1:00:00	5:29:59	4,5
24. Transición Domingo Mañana	5:30:00	9:29:59	4
25. Mañana Domingo	9:30:00	13:29:59	4
26. Mediodía Domingo	13:30:00	17:29:59	4
27. Tarde Domingo	17:30:00	20:59:59	3,5
28. Transición Domingo Nocturno	21:00:00	22:59:59	2
29. Pre Nocturno Domingo (Noche)	23:00:00	23:59:59	1

Tabla A.1: Intervalos horarios para tipo de día sábado y domingo.

A.3. Anexo 3

		12 Periodos del tipo de día Laboral											
		0:00 0:59	1:00 5:29	5:30 6:29	6:30 8:29	8:30 9:29	9:30 12:29	12:30 13:59	14:00 17:29	17:30 20:29	20:30 21:29	21:30 22:59	23:00 23:59
Servicio	Ruta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
F10	Ida (+)	33.1	39.4	41.5	52.7	49.6	49.9	51.4	51.9	57.0	49.9	41.9	36.9
F10	Regreso(-)	35.5	-	39.5	49.8	46.3	45.2	47.1	48.2	54.7	51.3	42.4	38.2
F12	Ida (+)	26.2	27.5	29.6	35.4	32.3	37.4	37.8	36.9	35.5	31.5	31.0	27.4
F12	Regreso(-)	24.7	24.2	27.3	34.1	33.3	28.7	30.2	32.4	42.1	37.7	27.9	26.2
F12c	Ida (+)	16.0	16.8	18.9	22.3	22.6	22.6	22.8	22.9	23.4	20.5	18.8	16.7
F12c	Regreso(-)	15.2	14.9	15.0	16.3	17.0	17.5	18.4	18.6	19.6	18.3	17.0	16.0
F13	Ida (+)	41.5	41.3	53.3	69.4	62.5	59.4	59.9	62.4	73.4	61.6	50.5	43.9
F13	Regreso(-)	43.2	41.3	48.1	65.1	59.3	56.0	58.1	60.0	74.4	63.7	53.3	48.2
F13c	Ida (+)	-	-	29.3	32.5	31.0	-	-	-	30.5	-	-	-
F13c	Regreso(-)	-	-	-	31.1	31.4	-	-	-	38.0	-	-	-
F15	Ida (+)	31.3	36.3	39.5	48.3	44.3	40.8	42.0	43.3	48.2	43.2	36.9	33.3
F15	Regreso(-)	36.9	-	37.8	46.7	43.5	45.3	48.4	49.8	55.7	51.0	44.6	40.8
F18	Ida (+)	22.8	29.0	29.8	35.0	33.7	32.3	32.5	33.2	36.0	31.8	27.1	24.5
F18	Regreso(-)	25.5	-	28.6	33.2	32.8	32.9	34.5	36.6	41.6	37.2	30.5	27.8
F25	Ida (+)	40.9	50.9	51.4	66.3	58.9	51.1	52.4	55.4	64.0	57.7	47.7	42.2
F25	Regreso(-)	42.7	-	47.9	63.1	59.1	49.1	53.3	57.4	70.5	66.8	51.1	45.9
F25e	Ida (+)	47.7	47.7	34.6	47.0	39.2	47.7	47.7	47.7	47.7	47.7	47.7	47.7
F25e	Regreso(-)	44.7	44.7	44.7	44.7	44.7	44.7	44.7	44.7	42.1	43.2	44.7	44.7

Tabla A.2: Tiempo de viaje para cada servicio, ruta y periodo del terminal Juanita.

A.4. Anexo 4

Los valores de los costos utilizados son los siguientes:

Costo Fijo:

$$cf_b = \$260,000$$

Costo Variable por kilómetro:

Tipo de Bus (Plaza)	Costo Variable (cv_b)
43	\$163
56	\$205
60	\$228
97	\$340

Tabla A.3: Costo variable por kilómetro y tipo de bus

A.5. Anexo 5

La definición de geocerca, se define en la página 42 del documento Manual ICPKH Fase IId de noviembre 2010 (válido para ICT) del siguiente link:

<http://www.dtpm.cl/index.php/2013-04-29-20-33-57/manuales2> [Consulta: 01/08/2011].

A continuación se muestra un extracto de la metodología de velocidades de Transantiago. La velocidad comercial de los servicios es una variable clave para el buen desarrollo del sistema, pues su impacto en el nivel de servicio percibido por el usuario es directo. Asimismo, esta variable está directamente ligada con el tamaño de flota que debe tener el sistema y con los indicadores de cumplimiento del Programa de Operación.

Por lo anterior, esta variable debe ser correctamente estimada para efectos de diseño y control, y cuidadosamente monitoreada con el fin de implementar medidas que eviten detrimentos sistemáticos de la misma.

A.5.1. Obtención de información por Servicio

Mecanismo de Triada

Se dice que un bus Cumplió Servicio de Ida cuando dicho bus registró posición en las geocercas del punto de inicio, luego del punto de control y finalmente del punto de término, todos puntos asociados al Servicio. De la misma forma, se dice que un bus Cumplió Servicio de Regreso cuando dicho bus registra posición en los mismos puntos definidos para el Servicio de Ida, pero en sentido contrario.

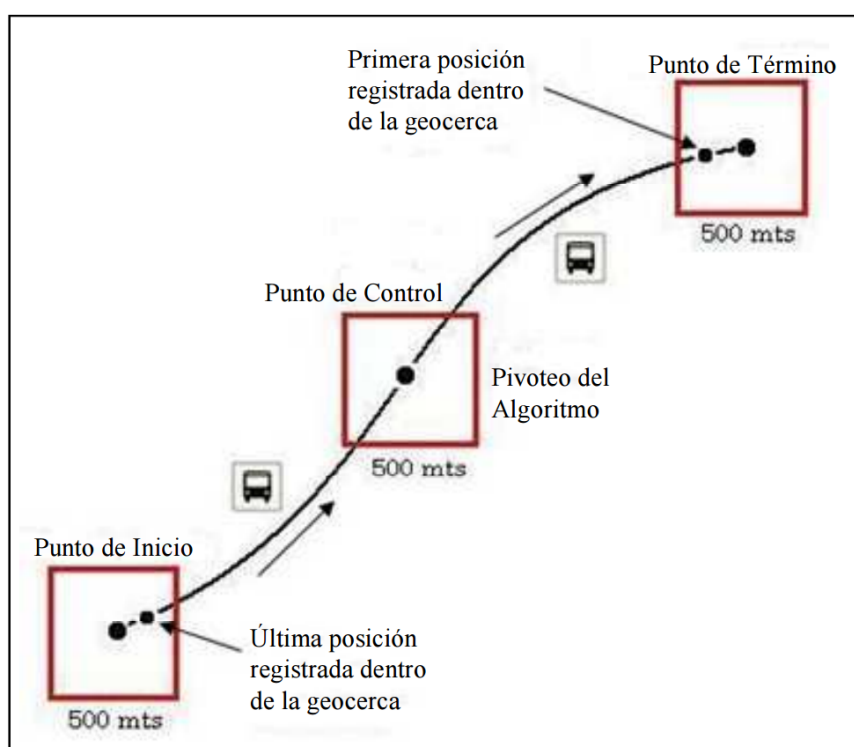


Figura A.1: Mecanismo de triada. Fuente: Transantiago.

Los puntos de control se definen aproximadamente en la mitad del recorrido del bus y en una coordenada en la cual la "geocerca" registre el posicionamiento tanto de los buses que cumplen servicio de ida, como de los buses que cumplen servicio de regreso, tal como se ilustra en la Figura anterior.