



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

ESTRUCTURAS ÓPTIMAS DE LÍNEAS DE TRANSPORTE PÚBLICO CONSIDERANDO
DISTINTOS PERIODOS EN SANTIAGO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

MACARENA ANDREA DE LOS ÁNGELES VILLALOBOS ZAID

PROFESOR GUÍA:
SERGIO JARA DÍAZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANTONIO GSCHWENDER KRAUSE
ANDRÉS FIELBAUM SCHNITZLER

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: MACARENA ANDREA DE LOS ÁNGELES VILLALOBOS ZAID
FECHA: ABRIL 2018
PROF. GUÍA: SERGIO JARA DÍAZ

ESTRUCTURAS ÓPTIMAS DE LÍNEAS DE TRANSPORTE PÚBLICO CONSIDERANDO DISTINTOS PERIODOS EN SANTIAGO

El diseño estratégico de un sistema de transporte público en áreas urbanas se basa en la estructura de líneas (red de transporte público), las flotas, frecuencias y tamaños de bus correspondientes. Un diseño adecuado depende de la forma de la ciudad y estructura de la demanda. Sin embargo, la estructura de la demanda varía a lo largo del día, por lo que un único diseño puede no ser apropiado y cambiarlo continuamente no es sensato. El objetivo de esta memoria es evaluar si es mejor diseñar para punta mañana y adaptar las líneas para fuera de punta o viceversa, basándose en datos reales de la ciudad de Santiago. Para esto, se minimizan los costos totales de diferentes estructuras de líneas en ambos periodos por separado para conocer la mejor estructura en cada periodo, y luego se diseña de las dos maneras mencionadas anteriormente, con el fin comparar los costos diarios.

Para lograr lo anterior, se trabaja una representación topológica simplificada de Santiago, utilizando el modelo basado en centros propuesto por Fielbaum et al. (2017a), donde la ciudad está compuesta por un distrito central (CBD) y zonas constituidas por un subcentro y una periferia. Usando datos de viajes reales en el sistema de transporte público de la ciudad se proponen ocho macrozonas con las respectivas distancias entre los 17 nodos resultantes y una estructura de demanda por periodos. Luego, se consideran cuatro estructuras de líneas (exclusivas, directas, hub&spoke y troncal-alimentador) para optimizar sus frecuencias para los periodos punta y fuera de punta por separado, minimizando la suma de los costos de los operadores y de los usuarios. De lo anterior, para la estructura con menor costo, se rescatan las flotas óptimas resultantes en ambos periodos; luego, considerando esta flota disponible se adaptan las frecuencias del otro periodo de tal manera que la proporción de buses utilizados sea la misma que el periodo óptimo.

Al optimizar las frecuencias de las cuatro estructuras de líneas en punta mañana y fuera de punta resulta que la mejor estructura (aquella que presenta menor costo total) es la de líneas exclusivas para ambos periodos, considerando distintos valores de la penalidad por transbordo en un análisis de sensibilidad. Al diseñar y adaptar la flota para ambos periodos, se observa que al diseñar para fuera de punta se presentan menores costos diarios que al diseñar para punta mañana y adaptar, debido a que el periodo fuera de punta tiene mayor relevancia en el día. Sin embargo, la diferencia de costos de ambas formas de diseñar es leve, debido a que existen costos que no disminuyen con la forma de diseñar, variando solamente tiempos de espera y costos de operadores. Además, este resultado se mantiene al cambiar algunos parámetros como las categorías de buses o la cantidad de horas de cada periodo en un día, por lo que los resultados son robustos.

Finalmente, se comparan los resultados obtenidos con la forma de operación de Santiago, resultando que los buses en el mejor diseño encontrado son más pequeños y con frecuencias más altas que las actuales, lo cual hace notar la importancia de considerar el costo de los usuarios de igual manera que el de los operadores.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia y amigos. Especialmente a mi mamá, que gracias a su esfuerzo me fue posible estudiar sin preocupaciones y sacar la carrera adelante; a mi hermano Nicolás, que me acompañó todos estos años codo a codo estudiando juntos y que fue un apoyo fundamental en esta memoria con sus consejos y ayudas en las largas jornadas en la oficina; y a mi perrita Amy, que ha sido mi fiel compañera desde que entré a la universidad y me saca una sonrisa cada vez que mueve su colita.

También quiero agradecer a toda la gente de la universidad que me ha acompañado en estos 6 años, a los amigos que están siempre pendientes, a los profesores, a todas las personas que aportaron en mi formación, especialmente a la gente del departamento de transporte.

Quiero dar un especial agradecimiento a la comisión de la memoria. Al profesor Sergio gracias por la paciencia y los consejos teóricos para sacar la memoria adelante. Al profesor Antonio que siempre tenía un comentario acertado que era un gran aporte para el trabajo. Y a Andrés que siempre estuvo ahí con consejos y sugerencias útiles sin los cuales este trabajo no sería posible.

Tabla de Contenido

Capítulo 1 : Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Herramientas Computacionales y Datos Utilizados.....	3
1.4. Estructura de la Memoria.....	3
Capítulo 2 : Diseño de Sistemas de Transporte Público	5
2.1. Optimización de Sistemas de Transporte Público.....	5
2.1.1. Modelos de Corredor Aislado.....	5
2.1.2. Efectos de Restricciones Financieras.....	8
2.1.3. Estructuras de Líneas.....	8
2.2. Modelo Basado en Centros.....	9
2.3. Formulación Problema dos Periodos.....	11
2.3. Síntesis.....	16
Capítulo 3 : El Modelo Basado en Centros: Descripción de Santiago.....	17
3.1. Descripción de Santiago.....	17
3.2. Descripción del Modelo de Ciudad.....	20
3.3. Representación de Santiago.....	22
3.3.1. Datos Disponibles.....	22
3.3.2. Estructura Topológica de Santiago.....	24
3.3.3. Estructura de Demanda.....	31
3.4. Síntesis.....	37
Capítulo 4 : Estructuras de Líneas Estratégicas.....	40
4.1. Función de Costos, Supuestos y Parámetros.....	40
4.2. Estructuras de Líneas.....	43
4.2.1. Líneas Directas.....	44
4.2.2. Líneas Exclusivas.....	48
4.2.3. Troncal-Alimentador.....	50
4.2.4. Hub&Spoke.....	52
4.3. Síntesis.....	53
Capítulo 5 : Resultados Dos Periodos.....	55
5.1. Resultados Punta Mañana.....	55

5.1.1. Líneas Directas	55
5.1.2. Líneas Exclusivas	57
5.1.3. Troncal – Alimentador	58
5.1.4. Hub&Spoke	59
5.2. Resultados Fuera de Punta	60
5.2.1. Líneas Directas	60
5.2.2. Líneas Exclusivas	63
5.2.3. Troncal – Alimentador	63
5.2.4. Hub&Spoke	65
5.3. Análisis de Sensibilidad Costo por Transbordo	66
5.4. Análisis de Sensibilidad Tiempo de Espera	68
5.4.1. Incluyendo Número de Calles por Arco	68
5.4.2. Incluyendo Fracción del Intervalo de Llegada Real de Santiago	70
5.5. Síntesis	72
Capítulo 6 : Adaptar Flota a Otro Periodo	75
6.1. Metodología para Adaptar Flota	75
6.2. Resultados Adaptar Flota para Dos Periodos	78
6.2.1. Diseñar para Punta Mañana y Adaptar para Fuera de Punta	78
6.2.2. Diseñar para Fuera de Punta y Adaptar para Punta Mañana	79
6.2.3. Comparación de Resultados	80
6.3. Análisis de Sensibilidad	81
6.3.1. Sobre las Categorías de Buses	81
6.3.2. Sobre la Duración de los Periodos	83
6.3.3. Sobre la Compra de Buses Nuevos	84
6.4. Síntesis	85
Capítulo 7 : Análisis Comparativo	87
7.1. Análisis de Resultados	87
7.2. Operación Actual de Santiago	88
7.3. Comparación Estructuras Óptimas y Forma de Operación Actual	93
Capítulo 8 : Conclusión	101
8.1. Síntesis	101
8.2. Discusión	102
8.2. Extensiones	103
Bibliografía	105

Anexos.....	108
A. Frecuencias, Flota y Tamaño de Embarque por Línea	108

Índice de Tablas

Tabla 3.1: Periodos utilizados en la EOD 2012.....	23
Tabla 3.2: Comunas por macrozona.....	25
Tabla 3.3: Distancias medias en ruta y euclidianas por periodo	31
Tabla 3.4: Rango horario periodos punta mañana y fuera de punta.....	31
Tabla 3.5: Matriz de viajes entre macrozonas, punta mañana (pax/hr).....	33
Tabla 3.6: Matriz de viajes entre macrozonas, fuera de punta (pax/hr).....	33
Tabla 3.7: Viajes punta mañana y fuera de punta. Comparación por tipo de viaje.....	34
Tabla 3.8: Matriz de viajes entre divisiones de macrozonas, punta mañana (pax/hr).....	35
Tabla 3.9: Matriz de viajes entre divisiones de macrozonas, fuera de punta (pax/hr).....	35
Tabla 3.10: Matriz de viajes utilizada en la modelación, punta mañana (pax/hr).....	36
Tabla 3.11: Matriz de viajes utilizada en la modelación, fuera de punta (pax/hr).....	36
Tabla 4.1: Resumen de los valores de los parámetros utilizados	43
Tabla 4.2: Asignación de pasajeros a líneas, estructura directa	48
Tabla 4.3: Asignación de pasajeros a líneas, troncal – alimentador.....	51
Tabla 4.4: Asignación de pasajeros a líneas, hub&spoke.....	53
Tabla 5.1: Resultados generales líneas directas, punta mañana	56
Tabla 5.2: Indicadores resumen por línea, líneas directas, punta mañana.....	56
Tabla 5.3: Líneas con frecuencia cero, líneas directas, punta mañana.....	56
Tabla 5.4: Resultados generales líneas exclusivas, punta mañana	57
Tabla 5.5: Indicadores resumen por línea, líneas exclusivas, punta mañana	58
Tabla 5.6: Resultados generales troncal-alimentador, punta mañana	58
Tabla 5.7: Indicadores resumen por línea, troncal-alimentador, punta mañana.....	59
Tabla 5.8: Indicadores resumen por línea, buses alimentadores, punta mañana	59
Tabla 5.9: Indicadores resumen por línea, buses troncales, punta mañana	59
Tabla 5.10: Resultados generales hub&spoke, punta mañana.....	59
Tabla 5.11: Indicadores resumen por línea, hub&spoke, punta mañana.....	60
Tabla 5.12: Líneas con frecuencia cero, hub&spoke, punta mañana	60
Tabla 5.13: Resultados generales líneas directas, fuera de punta.....	61
Tabla 5.14: Indicadores resumen por línea, líneas directas, fuera de punta	61
Tabla 5.15: Líneas con frecuencia cero, líneas directas, fuera de punta	61
Tabla 5.16: Resultados generales líneas exclusivas, fuera de punta	63
Tabla 5.17: Indicadores resumen por línea, líneas exclusivas, fuera de punta.....	63
Tabla 5.18: Resultados generales troncal-alimentador, fuera de punta.....	64
Tabla 5.19: Indicadores resumen por línea, troncal-alimentador, fuera de punta	64
Tabla 5.20: Indicadores resumen por línea, buses alimentadores, fuera de punta	64
Tabla 5.21: Indicadores resumen por línea, buses troncales, fuera de punta	64
Tabla 5.22: Resultados generales hub&spoke, fuera de punta	65
Tabla 5.23: Indicadores resumen por línea, hub&spoke, fuera de punta	65
Tabla 5.24: Líneas con frecuencia cero, hub&spoke, fuera de punta.....	66
Tabla 5.25: Resultados tiempo de espera incluyendo número de calles por arco, punta mañana .	69
Tabla 5.26: Resultados tiempo de espera incluyendo número de calles por arco, fuera de punta	69

Tabla 5.27: Resultados tiempo de espera incluyendo fracción del intervalo de llegada real de Santiago, punta mañana.....	71
Tabla 5.28: Resultados tiempo de espera incluyendo fracción del intervalo de llegada real de Santiago, fuera de punta	71
Tabla 5.29: Tabla resumen de resultados punta mañana	73
Tabla 5.30: Tabla resumen de resultados fuera de punta	73
Tabla 6.1: Cantidad de buses de cada tipo obtenidos al optimizar cada periodo por separado, líneas exclusivas	76
Tabla 6.2: VRC para distintos valores de ϵ , adaptar para de punta	79
Tabla 6.3: VRC para distintos valores de ϵ , adaptar para punta mañana	79
Tabla 6.4: Comparación de indicadores para dos maneras de diseñar y adaptar la flota	80
Tabla 6.5: Cantidad de buses de cada tipo obtenidos de optimizar cada periodo por separado, 4 categorías de buses	81
Tabla 6.6: Comparación de indicadores para dos maneras de diseñar y adaptar la flota, 4 categorías de buses	82
Tabla 6.7: Comparación de indicadores para dos maneras de diseñar y adaptar la flota, duración de periodos modificada	83
Tabla 6.8: Comparación de indicadores para dos maneras de diseñar y adaptar la flota, compra de nuevos buses libre.....	85
Tabla 7.1: Cantidad de cada tipo de bus, operación Transantiago	91
Tabla 7.2: Detalle operativo de las líneas que unen al par PNorte-POriente	92
Tabla 7.3: Comparación flota operacional Transantiago, punta mañana óptimo y adaptado	94
Tabla 7.4: Comparación cantidad de Plazas punta mañana, sistema actual (2016-2017) y mejor diseño encontrado	95
Tabla 7.5: Comparación costos de operación diario, sistema actual (2016-2017) y mejor diseño encontrado	96
Tabla 7.6: Frecuencias actuales Metro de Santiago, punta mañana	97
Tabla 7.7: Comparación frecuencias punta mañana Transantiago, líneas exclusivas y directas, para tres pares OD relevantes	98
Tabla 7.8: Comparación pasajeros punta mañana Transantiago, líneas exclusivas y directas, para tres pares OD relevantes	98
Tabla A.1: Detalles por línea, líneas directas, punta mañana.....	108
Tabla A.2: Detalles por línea, líneas exclusivas, punta mañana.....	110
Tabla A.3: Detalles por línea, troncal-alimentador, punta mañana	113
Tabla A.4: Detalles por línea, hub&spoke, punta mañana	113
Tabla A.5: Detalles por línea, líneas directas, fuera de punta	113
Tabla A.6: Detalles por línea, líneas exclusivas, fuera de punta	116
Tabla A.7: Detalles por línea, troncal-alimentador, fuera de punta	119
Tabla A.8: Detalles por línea, hub&spoke, fuera de punta.....	120

Índice de Figuras

Figura 2.1: Estructura urbana propuesta por Fielbaum et al. (2017a)	10
Figura 2.2: Patrón de demanda del modelo de Fielbaum et al. (2017a)	10
Figura 2.3: Dos maneras de pensar en los horarios puntas	12
Figura 3.1: Mapa de comunas del “Gran Santiago”	18
Figura 3.2: Cerros y calles relevantes en Santiago	19
Figura 3.3: Viajes en Transporte Público atraídos en punta mañana por unidad de área, división por comuna, mayo 2016	20
Figura 3.4: Estructura urbana (subcentro-periferia-CBD), propuesta en Fielbaum et al. (2017a)	21
Figura 3.5: Estructura de demanda, punta mañana, propuesta por Fielbaum et al. (2017a)	22
Figura 3.6: Zonificación “diseño 777”	24
Figura 3.7: Zonificación modelo basado en centros	26
Figura 3.8: División de Santiago realizada por Jara-Díaz et al. (2013)	27
Figura 3.9: Viajes atraídos en punta mañana por zona "diseño 777", mayo 2016	28
Figura 3.10: División de macrozonas en subcentro y periferia	29
Figura 3.11: Estructura de Santiago con distancias [km], siguiendo modelo basado en centros ..	30
Figura 3.12: Histograma de viajes cada media hora, día laboral normal	32
Figura 3.13: Estructura de demanda punta mañana	37
Figura 3.14: Estructura de demanda fuera de punta	38
Figura 4.1: Heurística líneas directas 8 nodos	45
Figura 4.2: Estructura líneas directas, punta mañana, vista desde el nodo Sur	46
Figura 4.3: Estructura líneas directas, fuera de punta, vista desde el nodo Sur	47
Figura 4.4: Estructura líneas exclusivas, punta mañana, vista desde el nodo Sur	49
Figura 4.5: Estructura líneas exclusivas, fuera de punta, vista desde el nodo Sur	49
Figura 4.6: Líneas que unen subcentros a través del CBD, 8 nodos	50
Figura 4.7: Estructura troncal-alimentador, vista desde el nodo Sur	51
Figura 4.8: Estructura hub&spoke, vista desde el nodo Sur	52
Figura 5.1: Análisis de sensibilidad costo por transbordo, punta mañana	67
Figura 5.2: Análisis de sensibilidad costo por transbordo, fuera de punta	67
Figura 6.1: VRC para distintos valores de ϵ , adaptar fuera de punta	79
Figura 6.2: VRC para distintos valores de ϵ , adaptar punta mañana	79
Figura 7.1: Líneas y estaciones de metro, 2017	89
Figura 7.2: Red cubierta por las líneas de Transantiago, 28/10/17	90
Figura 7.3: Ejemplo selección líneas Transantiago para el par PNorte-POriente	92
Figura 7.4: Ejemplo selección (amarillo) líneas Transantiago para el par PSur-Oriente – CBD ..	99

Capítulo 1 : Introducción

1.1. Motivación

El diseño estratégico de un sistema de transporte público en áreas urbanas se basa en la estructura de líneas (red de servicios de transporte), las flotas, frecuencias y tamaños de bus correspondientes. Un diseño adecuado depende de la forma de la ciudad y de la estructura de la demanda. Sin embargo, la estructura de la demanda varía a lo largo del día, por lo que un único diseño puede no ser apropiado y cambiarlo continuamente no es sensato. Por lo tanto, al tener un patrón de viajes distinto para cada periodo del día, cuyas duraciones son diferentes, no se tiene certeza de la mejor manera de diseñar.

Como se menciona anteriormente, los viajes (volumen y distribución) son diferentes a lo largo del día, pudiendo distinguir dos periodos: punta y fuera de punta, donde el periodo punta es de menor duración y se distingue por un mayor volumen de viajes por hora. En la literatura existen argumentos a favor de basar el diseño estratégico del sistema de transporte público tanto en el periodo punta como en fuera de punta; el problema es que el sistema debe operar durante todo el día, por lo que si se diseña para un periodo éste debe ser capaz de adaptarse al otro. Por lo tanto, motivándose en lo anterior, en este trabajo se pretende llegar a saber si es mejor diseñar para hora punta y adaptar las líneas para fuera de punta o viceversa, entendiendo que ambas estrategias generarán diferentes costos totales (operadores y usuarios). Así, comparando los costos totales de ambas maneras de diseñar, será posible concluir qué forma de operación es la que mejor se adapta a la ciudad de Santiago con la demanda actual.

En esta memoria se utiliza la ciudad de Santiago como herramienta para afrontar el problema anterior. En primer lugar, se establece una estructura topológica única de Santiago, transversal a todos los periodos del día y se encuentra la estructura de demanda para los periodos punta mañana y fuera de punta. Para lo anterior se utiliza una descripción paramétrica del modelo basado en centros propuesto por Fielbaum et al. (2017a), donde la ciudad está compuesta por varias zonas – cada una con su respectiva periferia y subcentro - y un distrito central (CBD).

Teniendo la estructura espacial de la ciudad, es posible generar en ella estructuras de líneas de transporte público, las cuales son un conjunto de líneas de buses que permite movilizar a todos los pasajeros. En esta memoria se analizan dos tipos de estructuras de líneas: aquellas basadas en transbordos, donde gran parte de los pasajeros deben utilizar más de un servicio para llegar a su destino, y estructuras directas con o sin paradas intermedias, donde no es necesario transbordar. Luego, una vez definida la estructura de servicios, se plantea un problema de optimización, donde se determinan los mejores valores de frecuencias y tamaños de bus para cada línea en cada estructura. En este caso el problema de optimización consiste en minimizar el valor de los recursos consumidos (VRC) que tiene como componente de los operadores el costo de compra de los buses y de operación, mientras que el recurso de los usuarios corresponde a los tiempos de espera y de viaje, además del costo por transbordo.

Para lograr el objetivo planteado, en primer lugar, se encuentran estructuras de líneas óptimas para ambos periodos por separado, minimizando el costo total del sistema (costo de los operadores más el de los usuarios). De esta manera se puede tener claridad de las diferencias producidas por el

cambio en la estructura de demanda en ambos periodos. En este trabajo se profundiza lo realizado por Fielbaum et al. (2016), donde se comparan cuatro estructuras (líneas directas, exclusivas, hub&spoke y troncal-alimentador) para diferentes niveles y distribución de pasajeros (parámetros de demanda) considerando o no la penalidad por transbordo, en periodo punta mañana con datos “tipo” Santiago siguiendo una descripción espacialmente simétrica. En esta memoria se trabaja con descripciones espaciales no simétricas para Santiago, incluyendo asimetrías en las demandas, de manera de representar de forma simplificada pero fiel a la ciudad.

El objetivo de lo anterior es realizar un análisis comparativo de los resultados en ambos periodos del día y explorar la mejor forma de operar cada periodo, determinando cantidad y tamaño de buses que componen la flota, así como también las frecuencias de cada servicio. Se postula que las estructuras, sus frecuencias y tipos de bus, serán en general distintas para ambos períodos debido a la naturaleza de los viajes en periodo punta mañana (más largos con fuerte componente inter-zonal) y fuera de punta (más cortos con aumento de viajes intra-zonales), además el periodo punta presenta una mayor cantidad de viajes por hora, pero el periodo fuera de punta tiene una mayor cantidad de horas en el día.

Por otro lado, es interesante llegar a saber si la forma de operación actual del transporte público en Santiago se acerca o no al mejor resultado obtenido de minimizar costos de usuarios y operadores para un periodo y luego adaptar las frecuencias y tamaños de bus para el otro periodo. De esta manera se puede hacer una evaluación preliminar de Transantiago y establecer las direcciones en las cuales se debe mover el sistema para que se parezca a la mejor manera de diseñar encontrada, en términos de tamaños de buses, frecuencias y estructura de líneas. Para esto, se describen las principales características del sistema de transporte público de la ciudad (Transantiago), el cual se compone de Metro, una línea de tren y buses operados por diferentes empresas; además se incluye un análisis para saber a qué estructura se parece la operación actual utilizando el modelo basado en centros. Finalmente, con los resultados obtenidos, se compara la mejor forma de operar encontrada en esta memoria con la operación actual de Santiago, contrastando la flota (cantidad y tipos de bus), frecuencias y estructuras de líneas. De esta manera es posible determinar qué tan cerca o lejos de la mejor forma de diseñar se encuentra la forma de operación actual de Santiago, y analizar las diferencias considerando costos de operadores y usuarios.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de esta memoria es determinar la mejor forma de diseñar de manera estratégica el sistema de transporte público en Santiago, considerando que se tienen dos periodos diferentes en el día. Para lograr el objetivo central es necesario tener una estructura de ciudad (espacial y de demanda), por lo que, en primer lugar, se debe establecer la estructura topológica de Santiago. Para esto se utiliza el modelo basado en centros propuesto en Fielbaum et al. (2017a). Es decir, establecer la cantidad de macrozonas, sus respectivas periferias y subcentros, así como las distancias entre nodos. Además, encontrar la estructura de demanda para los periodos punta y fuera de punta entre los nodos definidos anteriormente. Con lo anterior se busca representar de manera simplificada pero fiel a la ciudad de Santiago.

Luego, se quiere encontrar las estructuras de líneas que minimicen los costos totales (de operadores más el de los usuarios) para ambos periodos del día de manera aislada, a través de las descripciones geométricas y de demanda de Santiago, de manera de establecer las diferencias entre los resultados de cada periodo. Es decir, se busca comparar los resultados de cada periodo, tanto la estructura de

líneas que minimiza el costo total como las frecuencias y tamaños de bus resultantes para cada línea. Con esto se adaptará la flota desde un periodo a otro, con el fin de ver qué estrategia de diseño posee menor costo.

Finalmente, se tiene como objetivo comparar los resultados encontrados con el sistema actual (Transantiago), contrastando frecuencias, flota (cantidad y tipos de bus) y la estructura de líneas utilizada. Para esto, se busca describir la forma de operación actual de Santiago, y además saber a qué estructura de líneas se parece, utilizando el modelo basado en centros. Con esto se quiere saber qué tan cerca o lejos de la mejor forma de diseñar se encuentra la forma de operación actual.

1.3. Herramientas Computacionales y Datos Utilizados

Para determinar la estructura topológica y de demanda de Santiago, se hace uso de datos reales de viajes en transporte público de Santiago. De esta manera, con el software *QGIS* (un sistema de información geográfica), se analiza la cantidad y distribución de viajes en la ciudad para dividirla en las macrozonas del modelo basado en centros. Además, para determinar las distancias entre nodos se utiliza *AutoCAD*, donde es posible dibujar el esquema final con las distancias calculadas a partir de la distancia media de viajes entre zonas.

Luego, se consideran cuatro estructuras de líneas en el análisis de optimización de frecuencias para ambos periodos, dos del tipo directas (exclusivas y directas) y dos basadas en transbordos (truncal-alimentador y hub&spoke). Este proceso se realiza en el software de código abierto *R*, donde se programa la función de costos a minimizar, así como también la asignación de pasajeros a líneas para cada estructura y periodo. Por otro lado, el proceso de diseñar para un periodo y adaptar para el otro se realiza en *Excel*. De esta manera, es posible determinar los costos totales para cada forma de diseñar.

Finalmente, el análisis de la forma de operación actual de Transantiago se realiza con datos disponibles en la página web del Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM). Luego, para determinar a qué estructura se parece el sistema de transporte público actual, se procesan los distintos servicios en el software *QGIS*, donde se tiene además la zonificación del modelo basado en centros.

1.4. Estructura de la Memoria

El problema de diseñar el sistema de transporte público ha sido largamente estudiado, por lo que en el Capítulo 2 se realiza una revisión bibliográfica de algunos de los trabajos realizados en temas relacionados con los objetivos de esta memoria; es decir, con diseño de transporte público optimizando costos de operadores y usuarios, incorporando estructuras de líneas e incluyendo el efecto de más de un periodo al día.

Luego, en el Capítulo 3 se muestra la estructura topológica y de demanda del modelo basado en centros aplicado a Santiago. En el Capítulo 4, se define la función de costos a minimizar, así como los supuestos y parámetros utilizados, además de describir las cuatro estructuras de líneas a considerar, junto con la asignación de pasajeros a líneas.

El resultado de la optimización de frecuencias para las cuatro estructuras de líneas en los dos periodos por separado se muestra en el Capítulo 5, donde además se analiza la sensibilidad del

costo por transbordo. Luego, en el Capítulo 6 se tienen los resultados de adaptar la flota desde un periodo a otro, aquí se realizan análisis de sensibilidad sobre distintas variables que afectan el costo total.

Luego, en el Capítulo 7 se realiza el análisis de los resultados del proceso de optimización del sistema de transporte público y de la metodología aplicada para adaptar la flota a otro periodo, para luego comparar el mejor diseño encontrado con el funcionamiento actual del sistema de transporte público de Santiago. Finalmente, en el Capítulo 8 se muestran las principales conclusiones de los resultados encontrados y se presentan las posibles extensiones del trabajo.

Capítulo 2 : Diseño de Sistemas de Transporte Público

Para diseñar un sistema de transporte público, las flotas, frecuencias y tamaños de bus de una estructura de líneas pueden ser determinados de diferentes maneras, donde una de ellas plantea un problema de optimización en redes simplificadas que tenga como resultado los mejores valores de frecuencias y tamaños de bus dada la estructura de red. Además, se debe tener en cuenta que este proceso depende de la forma de la ciudad y de la estructura de la demanda.

En este capítulo se presenta la revisión de distintos artículos relacionados con el diseño estratégico de sistemas de transporte público y la consideración de más de un periodo del día en el diseño, el cual es el tema central de esta memoria. En primer lugar, se muestran los trabajos enfocados en la optimización de sistemas de transporte público. Luego, se presenta el trabajo realizado a partir del modelo basado en centros propuesto en Fielbaum et al. (2017a). Finalmente, se muestra la formulación del problema de considerar dos periodos en el diseño.

2.1. Optimización de Sistemas de Transporte Público

El proceso de optimización de sistemas de transporte público se basa en el hecho de que existen recursos aportados por dos actores, los operadores de buses y los usuarios del sistema, los que se busca minimizar. Por un lado, los operadores aportan los costos asociados a los buses, tanto de operación como de compra, mientras que los usuarios aportan el tiempo de acceso al bus, tiempo de espera, tiempo de viaje en el vehículo, tiempo de egreso y la molestia asociada al transbordo cuando corresponda.

En la presente sección se muestran los modelos desarrollados en cuanto a la optimización de sistemas de transporte público, destacando en algunos casos las principales conclusiones. En primer lugar, se presentan los modelos de corredor aislado, donde se considera un bus operando en una sola línea. Luego, se tiene una pequeña acotación sobre qué sucede con el sistema cuando se agrega al modelo una restricción financiera para diseñar. Finalmente, se muestra la expansión espacial del modelo de una línea junto con algunos de los trabajos desarrollados para distintas estructuras de ciudad propuestas.

2.1.1. Modelos de Corredor Aislado

Los primeros trabajos realizados sobre optimización de frecuencias en sistemas de transporte público utilizan un modelo de una línea única, donde los pasajeros van desde un origen a un destino en un corredor aislado. Este modelo tiene diversas variaciones, los primeros consideran el tiempo de ciclo de los buses independiente de la cantidad de pasajeros (no consideran tiempos de subida y bajada), hasta los más complejos donde se incluye el efecto de la demanda variable durante el día de forma paramétrica y otros que incluyen una variación del costo del tiempo de viaje dependiendo del hacinamiento.

En este contexto, el primer modelo desarrollado fue el de Mohring (1972), el cual es un modelo microeconómico que optimiza la operación de buses en una ruta aislada. En la Ecuación 2.1 se muestra el valor total de los recursos consumidos (VRC) para este modelo, función que se busca minimizar, donde se tiene una flota de B buses, con costos de operación c por vehículo (asumiendo

conocido el tamaño) y una frecuencia de f buses por hora. Además, Y representa los pasajeros totales, t_w el tiempo de espera promedio en el paradero, t_v el tiempo de viaje en vehículo y t_a el tiempo de acceso, donde p_w , p_v y p_a son los valores del tiempo de espera, de viaje y de acceso, respectivamente. Luego, en la Ecuación (2.2) se presenta la relación del valor de la flota con la frecuencia, asumiendo que el tiempo de ciclo (t_c , igual al tiempo que demora hacer el recorrido ida y vuelta) es constante.

$$VRC = B \cdot c + p_w \cdot t_w \cdot Y + p_v \cdot t_v \cdot Y + p_a \cdot t_a \cdot Y \quad (2.1)$$

$$B = f \cdot t_c \quad (2.2)$$

Luego, asumiendo que el tiempo de espera promedio es la mitad del intervalo entre buses ($1/f$) y que t_v y t_a son constantes, remplazando la Ecuación 2.2 en la Ecuación 2.1 se obtiene la expresión de VRC dependiendo sólo de la frecuencia, esto se muestra en la Ecuación 2.3, donde se puede ver que al aumentar la frecuencia se incrementan los costos de los operadores y disminuyen los tiempos de espera de los usuarios. Ahora bien, derivando la expresión de VRC dependiendo solo de la frecuencia e igualando a cero se obtiene la frecuencia óptima para este modelo, mostrada en la Ecuación 2.4. Esta expresión se conoce como la “fórmula de la raíz cuadrada”, donde si aumenta la demanda incrementa el valor de la frecuencia, de igual manera si los costos de operadores o el tiempo de ciclo aumentan, la frecuencia óptima disminuye.

$$VRC = f \cdot t_c \cdot c + p_w \cdot \frac{1}{2 \cdot f} \cdot Y + p_v \cdot t_v \cdot Y + p_a \cdot t_a \cdot Y \quad (2.3)$$

$$f^* = \sqrt{\frac{p_w}{2 \cdot t_c \cdot c} \cdot Y} \quad (2.4)$$

Luego, Mohring (1972) presenta un modelo más complejo donde incluye los tiempos de subida y bajada de los pasajeros en el tiempo de ciclo, además de una componente estocástica para la cantidad de paradas que realiza cada bus a lo largo del corredor. Este modelo se presenta sin esta componente estocástica en Jansson (1980), es decir, asumiendo que los buses se detienen en todas las paradas. De esta manera, el modelo de Jansson (1980) expresa el tiempo de ciclo dependiendo del número de pasajeros que suben y bajan, como se muestra en la Ecuación 2.5, donde t es el tiempo de subida y bajada de los pasajeros y T es el tiempo del vehículo en movimiento durante un ciclo. Además, a partir de esta expresión y la Ecuación 2.2 se tiene la Ecuación 2.6, donde se puede obtener la flota a partir de la frecuencia y viceversa.

$$t_c = t \cdot \frac{Y}{f} + T \quad (2.5)$$

$$B = f \cdot T + t \cdot Y \quad (2.6)$$

Ahora bien, considerando que los tiempos de acceso son constantes (por lo que no es relevante en el proceso de optimización, no incluyéndose en VRC), que el tramo total recorrido por el bus es L y que el tramo promedio recorrido por los pasajeros es l , se tiene la expresión de VRC en la

Ecuación 2.7. Luego, usando las ecuaciones 2.5 y 2.6 se puede reescribir esta expresión en la Ecuación 2.8, donde se tiene el valor de los recursos consumidos en función de la flota.

$$VRC = B \cdot c + p_w \cdot \frac{1}{2 \cdot f} \cdot Y + p_v \cdot \frac{l}{L} \cdot t_c \cdot Y \quad (2.7)$$

$$VRC = B \cdot c + p_w \cdot \frac{T}{2 \cdot (B - t \cdot Y)} \cdot Y + p_v \cdot \frac{l}{L} \cdot \left(T + \frac{t \cdot T \cdot Y}{B - t \cdot Y} \right) \cdot Y \quad (2.8)$$

Luego, minimizando la expresión 2.8 con respecto a la flota y utilizando la Ecuación 2.6, se obtiene la frecuencia óptima para este modelo, mostrada en la Ecuación 2.9, la cual representa una versión modificada de la “fórmula de la raíz cuadrada”. Además, el número promedio de pasajeros a bordo en este modelo está dado por la Ecuación 2.10, el cual debe ser menor a la capacidad asumida para el costo de operación c .

$$f^* = \sqrt{\frac{Y}{c \cdot T} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot p_w + p_v \cdot t \cdot Y \cdot \frac{l}{L} \right)} \quad (2.9)$$

$$k = \frac{Y \cdot l}{f \cdot L} \quad (2.10)$$

Finalmente, Jansson (1980) analiza lo que sucede cuando se minimiza el costo social, es decir, la suma del costo de los operadores y el de los usuarios, se tiene que las características del servicio resultante son en general muy diferentes a los sistemas de transporte público existentes a esa fecha, debido a que debiese haber más buses y de tamaño mucho menor. Además, Jansson (1980) discute sobre cómo abordar el problema planteado anteriormente considerando dos periodos del día, lo cual se profundiza en la sección 2.3 del presente capítulo.

Luego, Jara-Díaz y Gschwender (2003b) desarrollan un modelo como extensión del modelo de Jansson, donde incluyen el efecto del tamaño del vehículo en los costos de operación (lineales, calculados a partir de la Ecuación 2.11) y la influencia del hacinamiento en el valor del tiempo de viaje en vehículo (Ecuación 2.12), donde k es la cantidad de pasajeros en el bus y K es la capacidad. Finalmente, comparan este nuevo modelo con los modelos de Jansson (1980), Mohring (1972) y Chang y Schonfeld (1991).

$$c(K) = c_0 + c_1 \cdot K \quad (2.11)$$

$$p_v(\phi) = p_{v0} + p_{v1} \cdot \phi \quad , \quad \phi = \frac{k(f)}{K} \quad (2.12)$$

Como se puede ver, los modelos de Mohring (1972) y Jansson (1980) consideran que los parámetros son homogéneos durante la operación, estos casos inspiran nuevos modelos que incluyen varianzas en el cálculo de algunos parámetros, como varianzas en la demanda por periodos de forma paramétrica, el costo de operación de los buses dependiendo de la capacidad, el valor del tiempo de viaje dependiendo del hacinamiento, entre otros.

2.1.2. Efectos de Restricciones Financieras

Motivándose con lo dicho en Jansson (1980) respecto a que los sistemas de transporte tendrían que operar con mayor cantidad de buses y de tamaño menor, Jara-Díaz y Gschwender (2009) analizan el efecto de la restricción financiera en el diseño óptimo de servicios de transporte público, siguiendo el modelo de Jansson (1980) de un corredor aislado.

A partir de la expresión del valor de los recursos consumidos (VRC, igual a la suma del costo de los operadores y de usuarios) se tiene que, al dejar todo lo demás constante y aumentar la frecuencia, aumenta el costo de los operadores y disminuye el de los usuarios. Siguiendo esto, muestran que si solo se considerara el costo de los operadores las frecuencias son mucho menores y el tamaño de los buses son excesivamente grandes.

En Jara-Díaz y Gschwender (2009) plantean un problema de minimización de los costos totales de manera similar al VRC propuesto en Jansson (1980), donde se agrega la restricción que la resta entre los costos de los operadores y los ingresos del sistema (suma de la tarifa y el subsidio) debe ser menor que cero, es decir, que se cubra el costo de los operadores con el pago de la tarifa y el subsidio (no necesariamente óptimo). Luego, esta restricción posee un multiplicador, el cual aumenta al disminuir los ingresos.

Ahora bien, al tener una restricción financiera minimizando el costo total se tiene que, al hacerse más ajustada la restricción financiera, disminuye el efecto de los valores del tiempo de los usuarios en los resultados de las frecuencias y tamaños de buses óptimos. De esta manera, cuando se exige mayor cobertura autónoma de costos, las frecuencias disminuyen y los buses resultantes son de mayor tamaño, haciendo el servicio para los usuarios cada vez peor.

En esta memoria no se considera la restricción financiera en el proceso de optimización, pero lo anterior es relevante al momento de hacer comparaciones con operación actual del sistema de transporte público en Santiago. Debido a que en Jara-Díaz y Gschwender (2009) establecen que una restricción financiera ajustada influyó en el diseño de Transantiago, se espera que las frecuencias de la operación actual sean más pequeñas y los buses más grandes que los resultados que se encuentren al momento de optimizar el sistema minimizando los costos de usuarios y operadores en igual medida.

2.1.3. Estructuras de Líneas

Los modelos nombrados anteriormente se basan en un corredor aislado, por lo que en ellos hablar de estructuras de líneas no tiene sentido. Como se menciona anteriormente, las estructuras de líneas son un conjunto de servicios de transporte público que permiten movilizar a todos los pasajeros, donde a cada línea se le puede determinar frecuencias y tamaños de buses mediante un proceso de optimización de los costos del sistema. Existen estructuras que basan sus líneas en los transbordos, es decir gran parte de los pasajeros requieren transbordar, mientras que otras establecen recorridos directos, donde se conectan sin transbordos todos los pares origen destino, en general los recorridos directos implican mayor número de servicios.

Es por lo anterior que Jara-Díaz y Gschwender (2003a) estudian la expansión de los modelos simples de una línea a una estructura espacial específica, de manera de analizar si son mejor las líneas directas o las basadas en transbordos. El resultado más interesante es que la clásica expresión de la

raíz cuadrada para frecuencias óptimas se mantiene cuando se pasa a una estructura de red. Los resultados muestran que la mejor estructura de líneas depende de muchos factores como los valores del tiempo de viaje y de espera, así como también del patrón de la demanda. Aun así, se tiene que a mayor demanda la mejor estructura son las directas y las estructuras basadas en transbordos se hacen más costosas.

Daganzo (2010) estudia distintas estructuras de sistemas de transporte que sean capaz de competir con la accesibilidad del automóvil. Para ello utiliza una grilla para representar la ciudad, donde la demanda está distribuida uniformemente. Dado esto, aún no se tiene una representación fiel de la ciudad, ya que se desconoce la existencia de un punto más importante que otro en cuanto a demanda, como lo puede ser un distrito central (CBD).

Luego, Badia, Estrada y Robusté (2016) discuten cuál estructura de líneas es la mejor opción para servir un patrón de movilidad urbano. Lo anterior se hace con un modelo analítico usado para evaluar cada estructura para un patrón de movilidad monocéntrico. Una de las conclusiones es que la mejor estructura no es siempre la misma, ya que depende del patrón de movilidad que tenga la ciudad. Por ejemplo, si la demanda es alta y se concentra en un punto son mejores las estructuras radiales, pero si la demanda es dispersa son mejores las estructuras basadas en transbordos.

En el artículo de Gschwender et al. (2016) los autores analizan cuatro estructuras de líneas para una red representativa en forma de *Y* invertida, minimizando el costo de los operadores y de los usuarios. Analizan el sistema de troncal alimentador contra tres estructuras del tipo directas, es decir, que no se necesitan transbordos. En particular, analizan el resultado para distintos valores del costo por transbordo, teniendo que el resultado depende del valor que se utilice para este parámetro. Algunas de las conclusiones son que el sistema troncal-alimentador se justifica cuando hay poca demanda en la periferia, ya que se traduce en menos tiempos de espera en comparación a otras estructuras.

Los modelos nombrados anteriormente utilizan distintas formas de ciudad, de tal manera de representar de la mejor forma posible la movilidad de las personas. Se puede ver que los primeros modelos utilizan una grilla con demanda uniforme, lo que no reconoce que existen puntos más relevantes donde se concentra mayor actividad y trabajos. Luego, Gschwender et al. (2016) asumen una estructura con dos calles secundarias que confluyen en una avenida, por lo que diferencian dos tipos de flujos de pasajeros. En la siguiente sección se presenta un modelo que diferencia zonas, cada una con periferia y subcentro, y el centro de trabajo (CBD).

2.2. Modelo Basado en Centros

El trabajo que se realiza en la memoria utiliza la descripción paramétrica de una estructura urbana propuesta por Fielbaum et al. (2017) y es una profundización de lo realizado Fielbaum et al. (2016), donde se optimiza el sistema de transporte comparando cuatro estructuras de líneas. Es por esto que en la presente sección se describen brevemente ambos artículos, además de un último artículo donde estudian distintas heurísticas aplicadas al modelo basado en centros.

Los modelos anteriores proponen distintas estructuras simplificadas para representar la ciudad, ya sea una grilla uniforme o identificando la periferia del centro. En su tesis de magíster Fielbaum (2014) propone una estructura urbana, con su red topológica y matriz origen destino, que, según parámetros de la red representa de mejor manera una ciudad que cualquiera de las conocidas.

Dependiendo de los patrones de demanda, es posible representar ciudades monocéntricas (presentan un centro muy relevante), policéntricas (presenta varios centros relevantes) y dispersas (no presenta zonas de mayor relevancia que otra), permitiendo la construcción de distintas estructuras de líneas de transporte.

En Fielbaum et al. (2017) se describe de manera detallada la estructura urbana introducida en Fielbaum (2014), desde ahora en adelante se llama a esta estructura “modelo basado en centros”. El modelo propuesto es útil para el diseño normativo de sistemas de transporte, es lo suficientemente simple para permitir desarrollos analíticos, pero es lo suficientemente complejo para representar los diferentes fenómenos urbanos.

En el modelo basado en centros, la ciudad está compuesta por varias zonas – cada una con su respectiva periferia y subcentro - y un distrito central (en adelante CBD), como se muestra en la Figura 2.1. Además, la estructura urbana propuesta sigue el patrón de demanda mostrado en la Figura 2.2, donde existen viajes desde la periferia al CBD, a su subcentro o a otros subcentros, y viajes desde cada subcentro al CBD o a subcentros vecinos, considerando los viajes en hora punta.

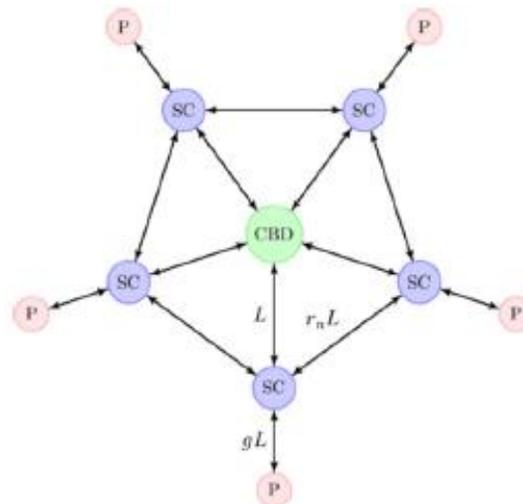


Figura 2.1: Estructura urbana propuesta por Fielbaum et al. (2017a)

(Fuente: Fielbaum et al. (2017a))

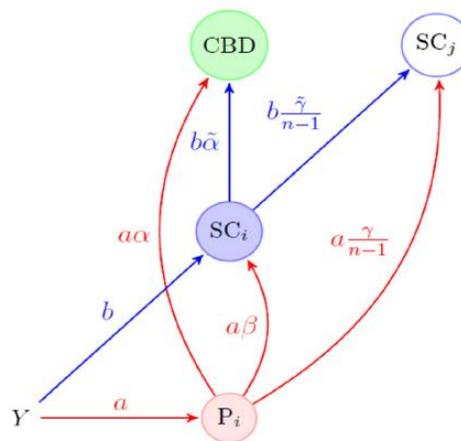


Figura 2.2: Patrón de demanda del modelo de Fielbaum et al. (2017a)

(Fuente: Fielbaum et al. (2017a))

Luego, en Fielbaum et al. (2016), encuentran la forma de operación que optimiza el costo del sistema con datos “tipo” Santiago, comparando cuatro estructuras de líneas (directas, troncal-alimentador, hub&spoke y exclusivas), las cuales tienen distintas formas de operar los servicios. Resuelven numéricamente para diferentes niveles y distribución de pasajeros (parámetros de demanda) considerando o no el efecto del transbordo, en periodo punta mañana, considerando geometría y demanda simétrica.

Dentro del análisis numérico realizado en Fielbaum et al. (2016), se muestra que cuando el costo por transbordo no se considera, las mejores estructuras son las basadas en transbordo, como lo son el sistema hub&spoke y el troncal-alimentador. Mientras que, al considerar la penalidad por transbordo igual a 24 veces un minuto en el vehículo, prevalecen las estructuras directas y exclusivas, las cuales no poseen ningún transbordo, a excepción de niveles de demanda bajo que bajo cierta estructura de demanda pueden ser mejores las otras dos estructuras.

Por otro lado, en Fielbaum et al. (2017b) se estudia el rol de las heurísticas de construcción de estructuras de líneas de transporte público en el modelo de ciudad basado en centros. Es por esto que se aplican 4 heurísticas, de las cuales una de las que presenta el mínimo costo promedio es el modelo de Ceder y Wilson (1986). Esta heurística está basada en líneas directas, mejorándola, debido a que permite desviaciones para recoger una mayor cantidad de pasajeros y reduciendo el número de líneas. Lo anterior es relevante en este caso, ya que una de las estructuras de líneas analizadas en esta memoria se construye a partir de esta heurística, debido a que para niveles de demanda altos (como se verá más adelante es el caso de Santiago) tiene el menor costo de todas las estructuras presentadas al utilizar el modelo basado en centros.

En el artículo de Ceder y Wilson (1986) se describe la heurística basada en líneas directas aplicada a cualquier red. El algoritmo presentado puede ser usado para diseñar nuevas rutas de buses tomando en cuenta los intereses de los pasajeros y de los operadores. Además, el algoritmo se puede adaptar a la estructura de ciudad determinada.

Como se menciona anteriormente, este modelo es el que se utiliza en este trabajo, donde se debe definir la cantidad de zonas a utilizar, así como también la demanda para punta mañana y fuera de punta. Debido a que se consideran ambos periodos en el análisis de tal manera de saber la mejor forma de dimensionar y repartir una flota de buses, es que en la siguiente sección se presentan algunos trabajos donde formulan el problema de dos periodos en el diseño de sistemas de transporte público.

2.3. Formulación Problema dos Periodos

En esta sección se muestran trabajos relacionados con el problema de considerar dos periodos en el diseño estratégico de sistemas de transporte público, un periodo punta con mayor demanda y uno fuera de punta donde la cantidad de viajes por hora es menor, cada uno con duraciones diferentes en el día. Esta sección es de gran importancia, debido a que la formulación del valor de los recursos consumidos que se utiliza en esta memoria se basa en algunos de los trabajos mostrados a continuación.

Uno de los primeros trabajos en tratar el problema de dos periodos es el de Chang y Schonfeld (1991) donde optimizan el sistema de transporte propuesto, el cual es en dos dimensiones (existen líneas de buses en dos direcciones), donde además de optimizar las frecuencias de los buses se

tiene como variable de decisión el espaciamiento de líneas paralelas. Para este caso se considera que la demanda varíe en forma continua o en periodos a lo largo del día. Por lo que encuentran expresiones analíticas para frecuencias y tamaños de buses para cada uno de los casos con demanda fija y variable. Además, estudian diferentes funciones objetivo, cuando la demanda es fija minimizan el costo total (suma de operadores más el de los usuarios), mientras que cuando considera demanda variable maximizan las ganancias de los operadores y por otro lado maximizan el bienestar social.

Yang et al. (2005) desarrollaron un modelo multi-periodo para taxis, donde toman en cuenta que la demanda varía a lo largo del día, esto implica que la intensidad de servicio de taxis no debe ser constante en el día. Encuentran la cantidad óptima de taxis que deben estar operando en periodos de una hora en función de la demanda en esa hora. Esto genera un antecedente, pero no se encuentra aplicado al transporte público.

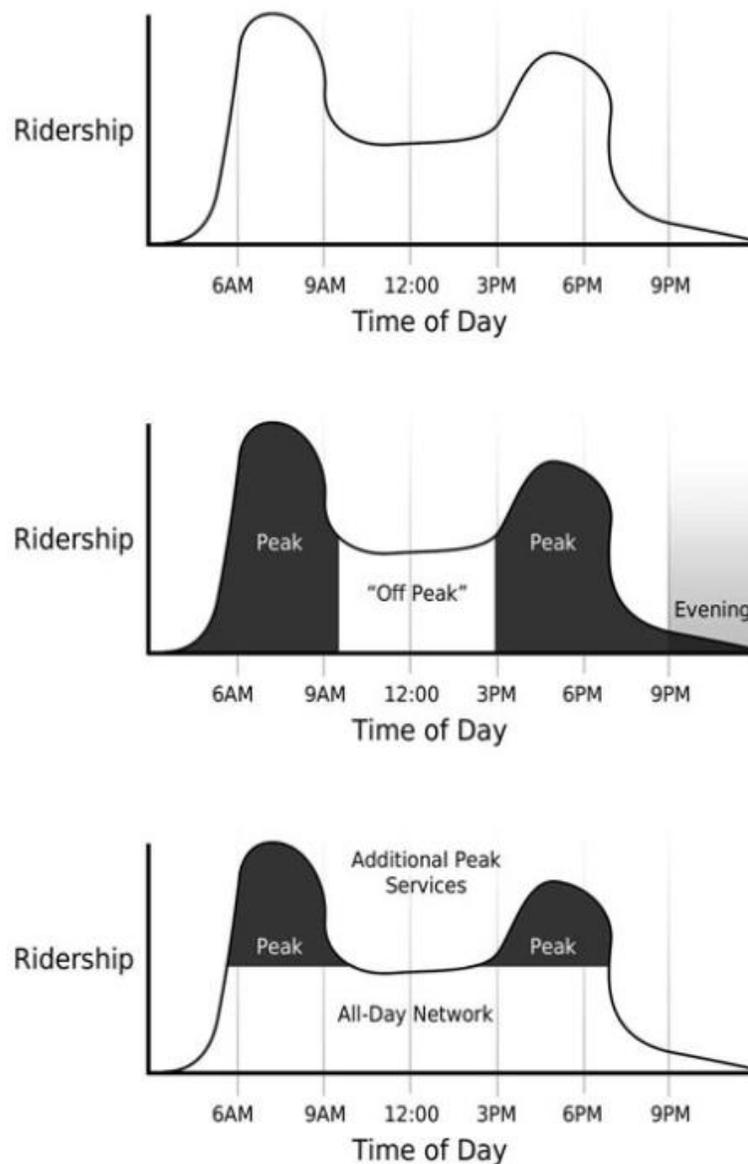


Figura 2.3: Dos maneras de pensar en los horarios puntas

(Fuente: Walker (2012))

En el libro de Walker (2012), en el Capítulo 6: “Peak or all day?”, el autor comenta acerca de la optimización del transporte público considerando que la demanda varía a lo largo del día. Walker expresa que hay dos maneras de pensar en los horarios punta, cada una de las cuales implica en diseños de redes de transporte diferentes. En primer lugar, opina que si el horario punta es muy marcado es mejor diseñar para esas horas y adaptar para el resto del día. Luego, expresa que si el horario fuera de punta es importante en cantidad de viajes, es razonable tener servicios adicionales en hora punta. Esto se puede ver en la Figura 2.3, donde se tiene una distribución de viajes por hora a lo largo del día, distinguiéndose periodos punta, los cuales pueden ser pensados como los periodos que definen el servicio, el cual se adapta para fuera de punta o como periodos donde existen servicios adicionales a la red diseñada en base a fuera de punta. Cabe destacar que esto último es una opinión sin fundamentos analíticos, sin embargo presenta un antecedente de que existe la idea de poder diseñar en base a otro periodo que no sea punta, dependiendo de la distribución de viajes que se tenga a lo largo del día.

Anteriormente, en la sección 2.1.1, se muestra la formulación del modelo de Jansson (1980) para la optimización de un sistema de transporte público como corredor aislado. En esa misma investigación discute sobre los costos de operación que se tienen al considerar un periodo punta y un periodo fuera de punta, con el fin de pronunciarse respecto al valor de la frecuencia óptima dependiendo de la demanda presente en cada periodo.

En cuanto a la estructura de costos de operación, Jansson (1980) explica que cuando se consideran dos periodos los costos de personal son los únicos que generan conflicto dentro de los costos de los operadores, debido a que no es posible contratar conductores sólo para el horario punta. Además, distingue dos categorías de buses, aquellos buses que operan durante todo el día y otros que operan únicamente en periodos puntas, destacando que la flota quedará determinada por el periodo punta que requiere mayor cantidad de buses.

Para solucionar el conflicto de los costos de personal, Jansson (1980) propone contratar conductores en dos turnos largos para operar los buses durante todo el día, mientras que para operar en horarios punta se contratan conductores en turnos divididos en dos periodos. Esto implica que la adición de otro bus para operar en punta implica un costo incremental de personal de w' , mientras que el ingreso de operar un bus todo el día implica un costo de $2 \cdot w$.

En cuanto a los costos incrementales de los operadores, se tiene que al introducir un bus que sirva durante todo el día aumenta el costo en IC_0 (Ecuación 2.13), donde se tiene que r es el costo de funcionamiento de un bus-kilómetro, n es el número de ciclos realizados por un bus que sirve durante todo el día, n_1 es el número de ciclos realizados por buses que operan sólo en hora punta, L es la distancia del ciclo, B_0 es el número de buses que operan en fuera de punta y B_1 el número de buses en punta. Este costo incremental se obtiene de introducir un bus que realice n ciclos en el día, $n - n_1$ en fuera de punta y n_1 en punta, y retirar un bus que opera sólo en punta que realiza n_1 ciclos en punta. Mientras que al introducir un nuevo bus que opere exclusivamente en hora punta se aumenta el costo en IC_1 (Ecuación 2.14), donde s es el costo de no operar las horas fuera de punta. Este costo incremental se obtiene de operar un bus adicional exclusivamente en punta sirviendo n_1 ciclos al día.

$$IC_0 = 2 \cdot w - w' + r \cdot (n - n_1) \cdot L, \text{ siempre que } B_0 < B_1 \quad (2.13)$$

$$IC_1 = w' + s + r \cdot n_1 \cdot L, \text{ siempre que } B_1 \geq B_0 \quad (2.14)$$

Respecto a la magnitud relativa de ambos costos incrementales, se tiene que la razón de IC_0/IC_1 es aproximadamente $2/3$, resultando más costoso para los operadores introducir un nuevo bus que sirva exclusivamente en punta que durante todo el día.

Luego, estudia el caso de operar con la misma cantidad de buses en punta y fuera de punta, asumiendo que también las frecuencias son las mismas (teniendo en cuenta que en punta hay mayor cantidad de pasajeros, pero en fuera de punta se tiene un mayor nivel de tolerancia con los pasajeros que demoran más en el proceso de subida y bajada). Con esto, se obtiene la expresión del valor de los recursos consumidos mostrada en la Ecuación 2.15, donde E es la suma de la duración de los periodos punta y fuera de punta en el día y Q es el flujo promedio de pasajeros por hora, el resto de las variables siguen la misma notación de la sección 2.1.1.

Aplicando las condiciones de primer orden respecto a la flota se obtiene una expresión modificada para la fórmula de la raíz cuadrada, la cual es similar a la mostrada en la Ecuación 2.9. Sin embargo, ahora la frecuencia depende del flujo y del tiempo de ciclo en hora punta, así como también del costo incremental de operación el cual incluye la diferencia por turnos del personal, como se muestra en la Ecuación 2.16.

$$VRC = B \cdot IC + \frac{p_w \cdot E \cdot Y}{2 \cdot f} + \frac{p_v \cdot E \cdot Q \cdot B}{f} \quad (2.15)$$

$$f^{opt} = \sqrt{\frac{E \cdot Y \cdot \left(\frac{p_w}{2} + p_v \cdot t \cdot Q_1\right)}{IC \cdot T_1}} \quad (2.16)$$

Siguiendo la idea de modelos simples de líneas únicas y basándose en lo expuesto por Jansson (1980), Jara-Díaz et al. (2017) proponen un modelo considerando dos periodos, punta y fuera de punta. Todo esto bajo la motivación de que un buen diseño de servicios de transporte público en áreas urbanas depende fuertemente del patrón de demanda, y éste no se mantiene constante a lo largo del día, existiendo un periodo muy cargado y otro que necesita menos capacidad, pero no necesariamente menos relevante. Una diferencia importante del modelo, en comparación al modelo considerando sólo un periodo, es que en la función del valor de recursos consumidos (VRC) se integran los valores de parámetros dependientes de cada periodo en un día.

La formulación del problema de dos periodos propuesta por Jara-Díaz et al. (2017), consta de una línea única con la flota compuesta de buses de tamaño K , con frecuencias f_P en periodo punta y f_N en fuera de punta. Además, el tiempo de ciclo y la longitud de los viajes dependen del periodo, por lo que el valor de los recursos consumidos depende de la demanda por periodo (Y_P, Y_N), el largo promedio de los viajes (l_P, l_N) y el tiempo de ciclo (t_{CP}, t_{CN}). Además, la duración de cada periodo se denota como E_P y E_N .

Respecto a los costos de operadores, éstos son separados en dos componentes: una relacionada a la adquisición de buses y otra correspondiente a los costos de operación, cada una de las cuales se considera lineal respecto al tamaño de los buses (Ecuación 2.11), donde c_{BC} y c_{KC} son los costos unitarios de la compra de buses, mientras que c_{BO} y c_{KO} están asociados a la operación. Es necesario notar que el costo de capital de los buses viene dado por el periodo que necesite mayor flota para operar (máximo entre B_P, B_N), mientras que los costos de operación son independientes por periodo.

En la Ecuación 2.17 se muestra el valor de los recursos consumidos considerando los aspectos anteriores. Donde el primer término corresponde al costo de capital, seguido por el costo de operación diario, el tercer término es el costo asociado al tiempo de espera, finalmente se tiene el costo asociado al tiempo de viaje. Los demás términos tienen las mismas definiciones que las utilizadas en la sección 2.1.

$$VRC = \max(B_P, B_N)(c_{BC} + c_{KC} \cdot K) + (B_P \cdot E_P + B_N \cdot E_N)(c_{BO} + c_{KO} \cdot K) + \frac{p_w}{2} \cdot \left(\frac{Y_P \cdot E_P}{f_P} + \frac{Y_N \cdot E_N}{f_N} \right) + \frac{p_v}{L} \cdot (l_P \cdot t_{cP} \cdot Y_P \cdot E_P + l_N \cdot t_{cN} \cdot Y_N \cdot E_N) \quad (2.17)$$

$$K = \frac{Y_P \cdot l_P}{f_P \cdot L} \quad (2.18)$$

Si se asumen que el tamaño de los buses vendrá dado por el periodo de mayor demanda, imponiendo que los buses van llenos en uno de los periodos, se tiene lo mostrado en la Ecuación 2.18. Además, la máxima flota vendrá dada por el periodo de mayor demanda por lo que el término $\max(B_P, B_N)$ puede ser reemplazado por B_P . Para este problema no se existe solución analítica por lo que los análisis son realizados numéricamente.

Un análisis relevante realizado en Jara-Díaz et al. (2017) es el de los efectos cruzados entre periodos. Así, cuando la demanda del periodo punta mañana aumenta, las frecuencias y el tamaño de buses aumenta, haciendo que en el periodo fuera de punta las frecuencias disminuyan, debido a que los buses son más caros que antes. Por otro lado, cuando aumenta la cantidad de pasajeros en el periodo fuera de punta, las frecuencias de punta mañana aumentan, debido a que los buses en fuera de punta se hacen más relevantes, necesitando buses más pequeños. Finalmente, al considerar ambos periodos en la minimización de costos de operadores y usuarios, las frecuencias del periodo de punta mañana disminuyen respecto a si se considerara sólo este periodo. En cambio, las frecuencias de fuera de punta aumentan cuando se consideran ambos periodos en el análisis.

Los trabajos anteriores hacen alusión a que el diseño de sistema de transporte público varía al basar el diseño en el periodo de mayor demanda, pero habitualmente con menor duración en el día, o basar el diseño en el periodo de menor demanda, pero con mayor cantidad de horas en el día. Además, se tiene que si se diseña considerando la existencia de ambos periodos y se optimiza el sistema de esta manera se obtiene un resultado intermedio al obtenido al considerar cualquiera de los dos periodos por separado.

2.3. Síntesis

Los trabajos presentados en las secciones anteriores son la base teórica de esta memoria, partiendo del modelo más simple de una línea donde se obtienen expresiones para la frecuencia y tamaño óptimo de los buses. Para luego aplicar la minimización de costo total en modelos más complejos que involucran estructuras de líneas. Hasta modelos que consideran dos periodos del día en su análisis, los cuales son los más relevantes para la modelación presentada en los capítulos siguientes.

Debido a que esta memoria considera distintos periodos del día en el análisis (punta y fuera de punta) es que la última formulación del problema de dos periodos resulta fundamental para lo que se realiza en los capítulos siguientes. Sin embargo, este modelo solo está aplicado al modelo de corredor aislado, por lo que en esta memoria se busca saber sobre cuál periodo es mejor diseñar para la ciudad de Santiago utilizando distintas estructuras de líneas aplicadas al modelo basado en centros.

Capítulo 3 : El Modelo Basado en Centros: Descripción de Santiago

En esta memoria se busca saber la mejor forma de diseñar y adaptar una flota de buses para distintos periodos en la ciudad de Santiago. Para esto se utiliza el modelo basado en centros descrito Fielbaum et al. (2017a), optimizando las frecuencias de los servicios de distintas estructuras de líneas para dos periodos. Lo anterior depende de la forma de la ciudad y de la estructura de demanda, por lo que describir Santiago de la mejor forma posible es de gran importancia para representar el fenómeno de manera correcta, tanto en su geometría como en la cantidad y distribución de viajes.

El primer paso para encontrar las estructuras óptimas de líneas para punta y fuera de punta en Santiago, es definir la estructura geométrica única de la ciudad y de demanda por periodo, utilizando el modelo basado en centros descrito en la sección 2.2. Para esto, se debe determinar la cantidad de macrozonas que tendrá la estructura de la ciudad, definir subcentros y periferias de cada una, así como las distancias entre ellas, para establecer la estructura topológica y la correspondiente demanda de viajes para fuera de punta y punta.

En el presente capítulo se describe la ciudad de Santiago y el modelo de ciudad a utilizar. Luego, se describen los datos con los cuales se trabaja para definir las estructuras geométricas y de demanda, además se explica la metodología para determinar la cantidad de macrozonas de la ciudad y las distancias entre nodos (subcentros, periferias y CBD), en base al modelo de Fielbaum et al. (2017a) y la estructura de demanda existente en Santiago, con sus respectivos resultados.

3.1. Descripción de Santiago

La ciudad de Santiago es la capital de Chile, compuesta por 45 comunas, ubicada en la Región Metropolitana. Donde la zona urbana llamada “El Gran Santiago” tiene un total de 34 comunas, donde residen 5.5 millones de personas aproximadamente, teniendo una gran densidad poblacional en algunos sectores.

El sistema de transporte público de Santiago, Transantiago, está compuesto por el Metro de Santiago, una línea de tren (MetroTren Nos) y por buses operados por distintas empresas, cubriendo la mayor parte de las comunas del Gran Santiago. En esta memoria se utilizan datos de los buses del Transantiago, por lo que el análisis de la estructura topológica se basará en las 34 comunas del Gran Santiago, que se muestran en la Figura 3.1.



Figura 3.1: Mapa de comunas del "Gran Santiago"

(Fuente: Elaboración Propia)

El centro histórico de la ciudad es la comuna de Santiago, sin embargo, se ha ido expandiendo hacia el oriente, ya que la comuna de Providencia tiene un gran número de trabajos y la comuna de Las Condes ha tenido un fuerte crecimiento respecto a edificios de oficinas y servicios. El sector oriente de la capital es el que concentra a la población con mayor ingreso, destacando las comunas de Las Condes, Vitacura, Lo Barnechea y La Reina. Por otro lado, las comunas más pobladas son Maipú y Puente Alto.

En cuanto a aspectos geográficos, se tiene el Cerro San Cristóbal que separa las comunas de Vitacura, Las Condes y Providencia de Recoleta y Huechuraba, además del Cerro Renca que separa a las comunas de Quilicura y Renca. Además, en las comunas más al este de la ciudad se encuentra el sector precordillerano, por lo que esas seis comunas limitan con la cordillera de los Andes. Estas

características se deben tener en cuenta al realizar la división de Santiago en las diferentes macrozonas debido al efecto de segregación que provocan. Los dos cerros mencionados anteriormente se muestran en verde en la Figura 3.2.

Cabe destacar que Santiago posee una circunvalación llamada Américo Vespucio, que deja adentro de este anillo a las 20 comunas centrales. Otra autopista relevante es la Autopista Central la cual cruza la ciudad de norte a sur separando a comunas como Independencia y Conchalí de Renca. Una de las avenidas más importantes de la ciudad es el eje Alameda-Providencia-Apoquindo que cruza Santiago de Poniente a Oriente, pasando por las comunas de Estación Central, Santiago, Providencia y Las Condes, donde se concentra gran cantidad de recorridos de Transporte Público. Estas avenidas relevantes se muestran en la Figura 3.2.

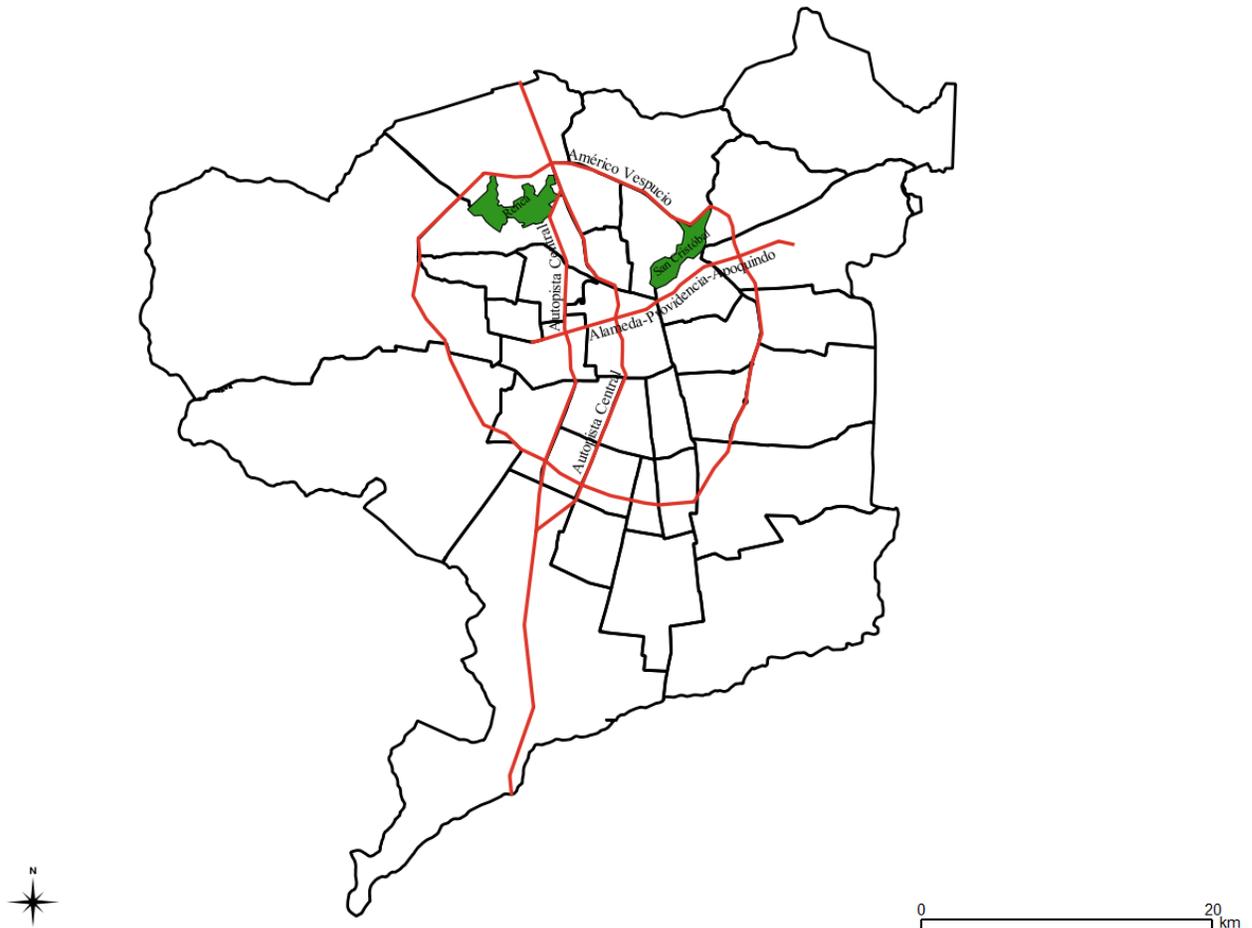


Figura 3.2: Cerros y calles relevantes en Santiago

(Fuente: Elaboración Propia)

Luego, para tener una idea de la distribución de viajes que se tiene en la ciudad de Santiago, en la Figura 3.3 se muestra la cantidad de viajes atraídos en punta mañana por unidad de área, ésta fue generada a partir del sistema de información geográfica *QGIS*. De esta figura se puede notar que el centro de la ciudad, que es la comuna de Santiago tiene la mayor densidad de viajes atraídos, seguida por la comuna de Providencia.

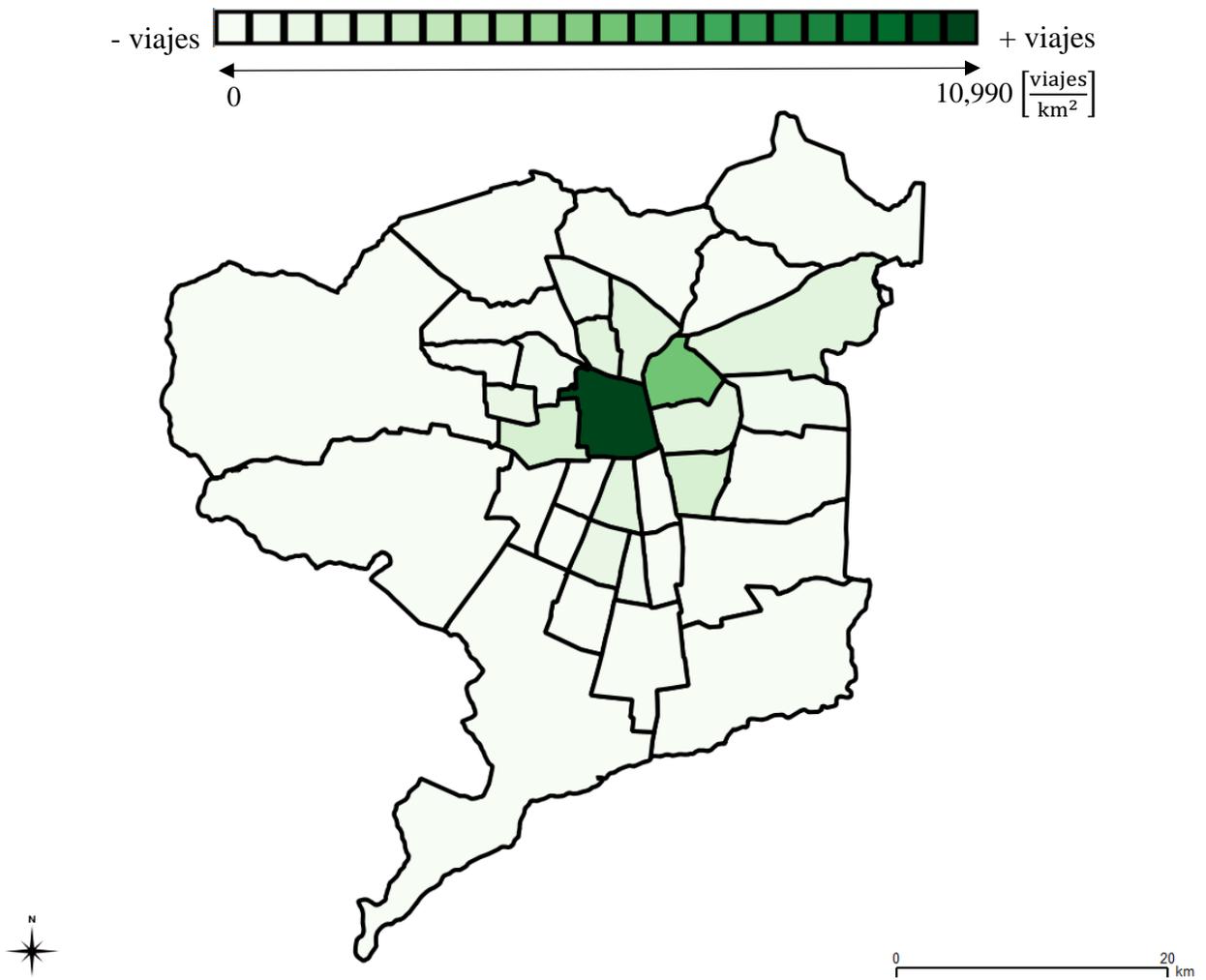


Figura 3.3: Viajes en Transporte Público atraídos en punta mañana por unidad de área, división por comuna, mayo 2016.

(Fuente: Matriz OD basada en datos bip! + GPS de buses y Elaboración Propia)

3.2. Descripción del Modelo de Ciudad

El modelo de ciudad a utilizar para la representación de Santiago es el basado en centros propuesto por Fielbaum et al. (2017a). Como se puede ver en la Figura 3.4 este modelo se compone de zonas que a su vez se dividen en periferia y subcentro y un distrito central (CBD) donde se concentra la mayor cantidad de trabajos. Además, posee parámetros como L , que es la distancia entre el CBD y cada subcentro, g que corresponde a la fracción de L que da como resultado la distancia entre los subcentros y las periferias.

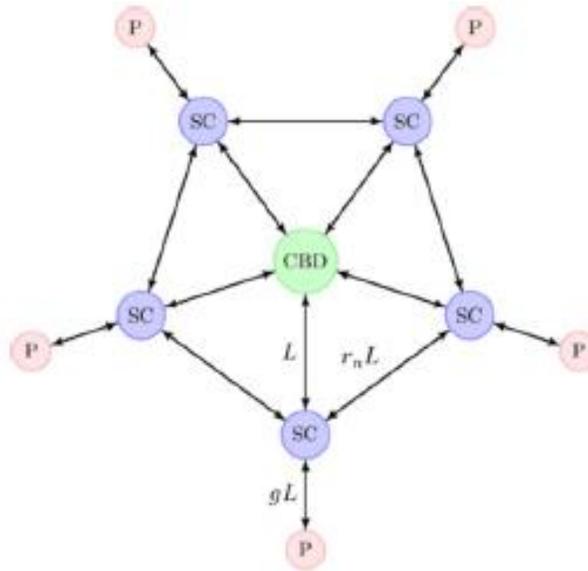


Figura 3.4: Estructura urbana (subcentro-periferia-CBD), propuesta en Fielbaum et al. (2017a)

(Fuente: Fielbaum et al. (2017a))

Para determinar la estructura topológica de Santiago es necesario determinar la cantidad de zonas con las que se representará, así como también dividir cada zona en periferia y subcentro. Con respecto a los parámetros de las distancias, éstos no serán determinados sino que se usará la distancia efectiva entre cada zona, pudiendo resultar asimétrico.

Respecto a la estructura de demanda Fielbaum et al. (2017a) trabajan con lo mostrado en la Figura 3.5, donde se muestra la distribución de viajes desde una zona, la cual establece que en el periodo punta mañana (único periodo tratado en ese artículo) existen Y viajes, de los cuales a comienzan desde la periferia al subcentro de la misma zona, al CBD y a subcentros vecinos, y b desde el subcentro al CBD y a subcentros vecinos. Mientras que los parámetros α , β , γ , $\tilde{\alpha}$, y $\tilde{\gamma}$ son las proporción de los viajes que llegan a otras zonas mencionadas anteriormente. En esta memoria no se trabajará con los parámetros de demanda, sino que se utilizarán los valores de la demanda real para cada zona, resultando valores distintos para cada par de nodos.

En punta mañana se usará una estructura de viajes similar a la propuesta por Fielbaum et al. (2017a), donde no hay viajes hacia la periferia, pero si existirán viajes desde el CBD a los subcentros, debido a la asimetría que puede tener la ciudad por la existencia del sector Oriente donde se concentra una gran cantidad de trabajos. Por otro lado, para fuera de punta se considera la existencia de viajes entre todos los pares origen destino posibles, es decir las periferias atraen viajes desde todos los demás nodos, con el fin de representar de la mejor manera posible este periodo, suponiendo que los viajes en fuera de punta no son principalmente hacia el centro.

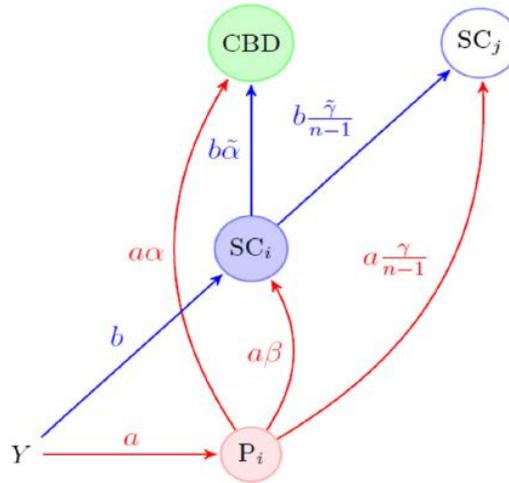


Figura 3.5: Estructura de demanda, punta mañana, propuesta por Fielbaum et al. (2017a)

(Fuente: Fielbaum et al. (2017a))

3.3. Representación de Santiago

En las secciones anteriores se describe la ciudad de Santiago y el modelo de ciudad a utilizar. En la presente sección se unen ambos elementos con el fin de determinar la estructura topológica única de Santiago, estableciendo zonas y distancias entre nodos, así como también la estructura de demanda por periodo, es decir, la cantidad de viajes que se realiza entre cada sector de cada zona. Para esto, se detallan los datos disponibles con los que se trabaja y el procedimiento para obtener ambas estructuras.

3.3.1. Datos Disponibles

En este trabajo se utilizan datos reales para describir Santiago, tanto su estructura topológica como de demanda según el modelo basado en centros, debido a que de esta manera se logra representar de forma fiel la movilidad actual de los pasajeros. Lo anterior es posible gracias a la integración de tecnología GPS en los buses, permitiendo tener una base de datos con información geolocalizada de todos los viajes realizados en transporte público.

En la presente sección se describen los datos que se tiene a disposición para realizar la descripción de Santiago, tanto de su estructura geométrica como la demanda para cada periodo del día. Se tienen dos grandes fuentes de datos que tienen información acerca del patrón de movilidad de la gente a lo largo del día. Por un lado, se tiene la encuesta origen destino (EOD) de viajes 2012 (Sectra, 2014), sobre la cual se basan las horas seleccionadas para cada periodo. Además, se tiene la matriz origen-destino (OD) de viajes en transporte público basadas en datos de la tarjeta de pago del Transantiago, bip!, y en los datos GPS de buses. Los datos disponibles se describen a continuación, junto con el uso específico que se les dará:

- Encuesta origen destino de viajes 2012 (SECTRA, 2014)

La encuesta origen destino de viajes posee información de viajes realizados en Santiago en todos los modos disponibles, los cuales se obtienen mediante una encuesta y expansión de datos. De esta encuesta se pueden obtener los viajes por comuna (es decir 34 zonas) en transporte público, pero

debido a que la descripción topológica requiere un mayor nivel de desagregación, se utiliza la matriz OD basada en datos bip! para obtener información de los viajes, además que son todos realizados en transporte público.

Por lo tanto, la EOD es utilizada para referenciar las horas que tendrá cada periodo del día, siendo el periodo punta mañana a utilizar igual al periodo Punta Mañana 1 más el Punta Mañana 2 de la Tabla 3.1, es decir de 6:00 a 9:00 hrs. Mientras que el periodo fuera de punta representativo es el Fuera de Punta 1, ya que el periodo Fuera de Punta 2 puede contener viajes de vuelta al hogar, debido a los horarios nocturnos, es decir el periodo fuera de punta que se utiliza como representativo es de 10:00 a 12:00 hrs.

Tabla 3.1: Periodos utilizados en la EOD 2012

Periodos	Horarios
Fuera de Punta 1	10:01 - 12:00
Fuera de Punta 2	9:01 - 10:00, 12:01 - 17:30, 20:31 - 23:00
Noche	23:01 - 06:00
Punta Mañana 1	6:01 - 7:30
Punta Mañana 2	7:31 - 9:00
Punta Tarde	17:31 - 20:30

(Fuente: EOD 2012)

- Matriz OD basada en datos bip! + GPS de buses (DTPM, 2017)

Las matrices origen-destino de viajes en transporte público (Metro y buses) utilizadas, fueron obtenidas con las bases de datos de la tarjeta bip! y de los GPS de los buses, mediante el software ADATRAP desarrollado por la Universidad de Chile y el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM). La matriz utilizada corresponde a cinco días laborales entre el 23 y el 27 de mayo de 2016, siendo los viajes utilizados el promedio correspondiente a estos días (DTPM, 2017).

Además, es necesario notar que se utiliza un nivel de agregación de viajes correspondiente a las zonas “diseño 777” (zonificación de alrededor de 800 zonas). Gracias a esto se puede obtener un mayor detalle para el análisis y determinación de la estructura topológica de Santiago, como se explica más adelante. En la Figura 3.6 se muestra esta zonificación.

Finalmente, los datos de viajes se tienen cada media hora, por lo que fácilmente se puede obtener los viajes totales en los periodos definidos a partir de la EOD. Además, como se tiene la información de paraderos de subida y de bajada es posible obtener las distancias medias de viajes de las macrozonas que se definan para la estructura simplificada de Santiago.



Figura 3.6: Zonificación “diseño 777”

(Fuente: Matriz OD basada en datos bip! + GPS de buses)

3.3.2. Estructura Topológica de Santiago

En primer lugar, es necesario definir la cantidad de zonas que tendrá la estructura simplificada de Santiago. Para esto, se toman en cuenta tanto aspectos geográficos como el volumen de viajes atraídos en punta mañana, con el objetivo de tener subcentros medianamente parecidos en atraktividad.

A partir de la Figura 3.3 presentada al comienzo del capítulo, es posible definir el CBD como una extensión del centro histórico de Santiago, es decir, el CBD de la estructura estará compuesto por las comunas de Santiago y Providencia. Lo anterior se debe a que concentran la mayor parte de los viajes atraídos en punta mañana y es fuente importante de trabajo, debido a la gran cantidad de edificios de oficinas y comercio, así como también es fuente importante de viajes con propósito estudio. Además, se puede notar que, de las comunas que se encuentran alrededor de las antes mencionadas, la comuna de Las Condes presenta una gran concentración de viajes, lo que da una pista de que la demanda no debiese ser simétrica como el patrón de demanda utilizado en Fielbaum et al. (2016).

Conocidas las comunas de Santiago, sus barreras naturales y los viajes que atrae cada comuna en punta mañana, se puede establecer la cantidad de macrozonas que tendrá la estructura urbana para

Santiago. Cada macrozona estará compuesta por una serie de comunas, debido a que no es necesario un mayor nivel de detalle para el análisis a nivel estratégico se utilizan las comunas para dividir Santiago.

El criterio utilizado para dividir Santiago en distintas macrozonas fue que tuviesen una cantidad similar de viajes atraídos en punta mañana y de área urbana, así como también tuvieran en lo posible adyacencia con el CBD. Dicho esto, en la Tabla 3.2 se muestran las comunas pertenecientes a cada macrozona propuesta. Finalmente, la estructura simplificada de Santiago siguiendo el modelo de centros está compuesta de 8 macrozonas, más el CBD. En la Figura 3.7 se muestran las 8 macrozonas y el CBD.

Tabla 3.2: Comunas por macrozona

Macrozona	Comunas
CBD	Santiago Providencia
Nor-Oriente	Las Condes Vitacura Lo Barnechea
Oriente	Ñuñoa La Reina Peñalolén
Sur-Oriente	Macul La Florida Puente Alto
Sur	San Miguel San Joaquín La Cisterna San Ramón La Granja El Bosque La Pintana
Sur-Poniente	Pedro Aguirre Cerda Cerrillos Lo Espejo San Bernardo
Poniente	Estación Central Maipú
Nor-Poniente	Quinta Normal Renca Quilicura Lo Prado Cerro Navia Pudahuel
Norte	Independencia Recoleta Huechuraba Conchalí

(Fuente: Elaboración Propia)

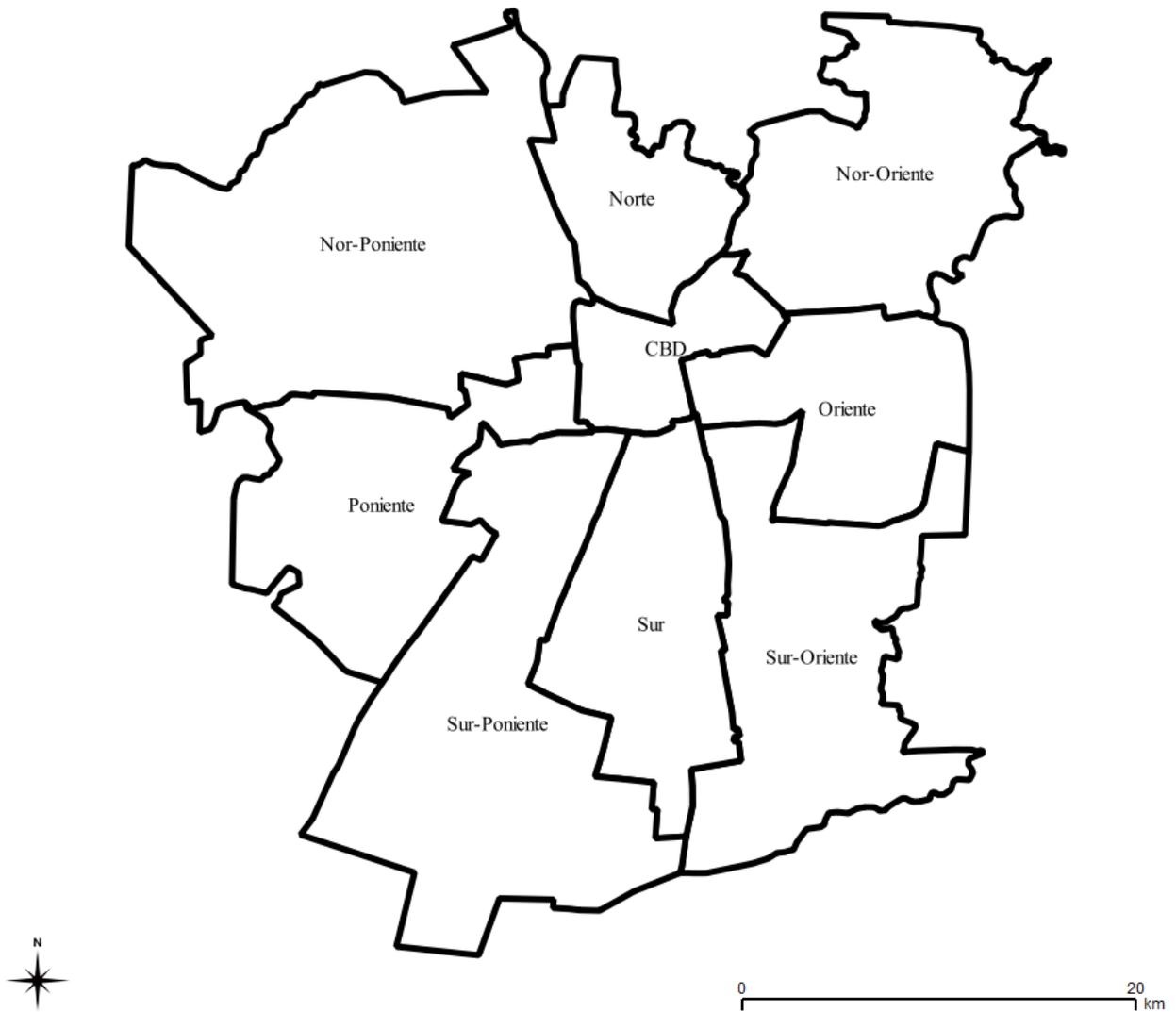


Figura 3.7: Zonificación modelo basado en centros

(Fuente: Elaboración Propia)

Como antecedente de otra zonificación propuesta para Santiago se tiene el artículo de Jara-Díaz et al. (2013), donde realizan una descripción agregada de la ciudad en seis grandes zonas (el centro más otras 5) con el objetivo de modelar uso de tiempo. La zonificación adoptada en esta memoria puede ser interpretada como una subdivisión de esas 5 zonas, donde la zona Norte y Oeste se dividen en las zonas Norte, Nor-Poniente y Poniente, la zona Sur se convierte en las sonas Sur-Poniente y Sur, mientras que las zonas Este y Sur-Este se convierten en las zonas Nor-Oriente, Oriente y Sur-Oriente. Además, el CBD de la zonificación de la Figura 3.7 es una extensión hacia el oriente, incluyendo Providencia, respecto al centro presentado en Jara-Díaz et al. (2013). La figura extraída del artículo mencionado se muestra a continuación.

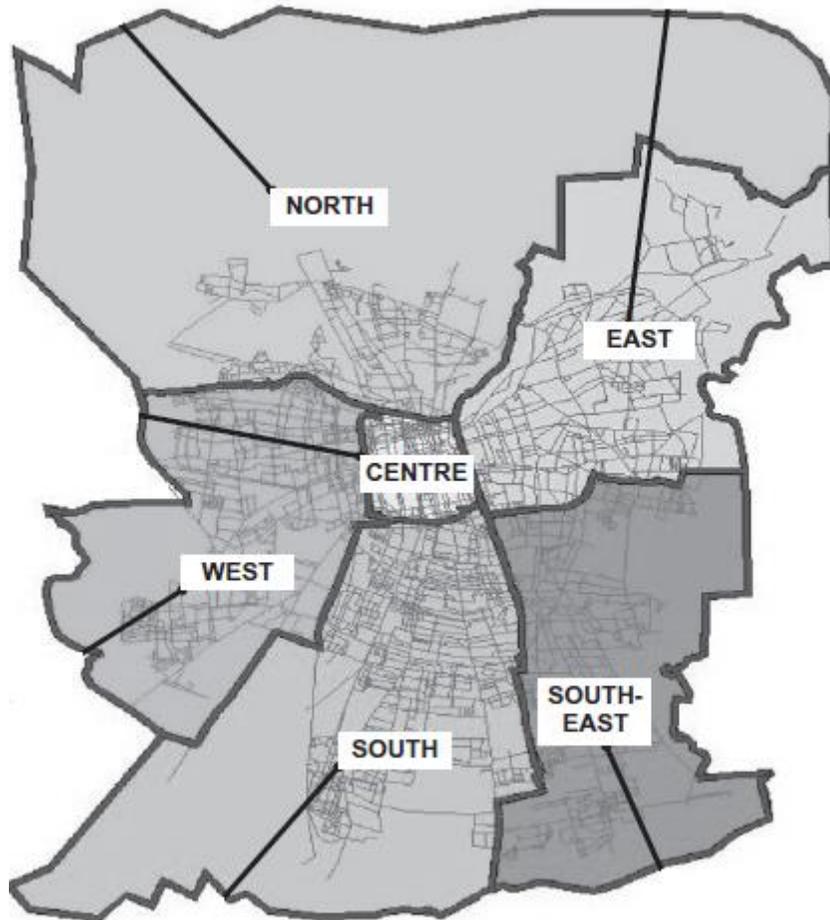


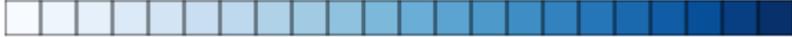
Figura 3.8: División de Santiago realizada por Jara-Díaz et al. (2013)

(Fuente: Jara-Díaz et al. (2013))

Ahora bien, es necesario distinguir entre periferia y subcentro dentro de cada macrozona, para esto, se utilizan las zonas “diseño 777” como unidad mínima de división, debido a que hay comunas que son periferia y subcentro a la vez (por ejemplo, Las Condes, Maipú, etc.), ya que generan y atraen gran cantidad de viajes en hora punta.

Cabe recordar que el subcentro de una macrozona es el lugar que más viajes atrae y que concentra una importante cantidad de trabajos y servicios, mientras que la periferia tiene características principalmente residenciales, por lo que no es importante en cuanto a la atracción de viajes en punta mañana.

En la Figura 3.9 se muestra el volumen de viajes atraídos en el periodo punta mañana de cada zona del “diseño 777”, además, se agrupan en macrozona con el fin de diferenciar las zonas que tienen mayor cantidad de viajes dentro de cada una.

- viajes  + viajes

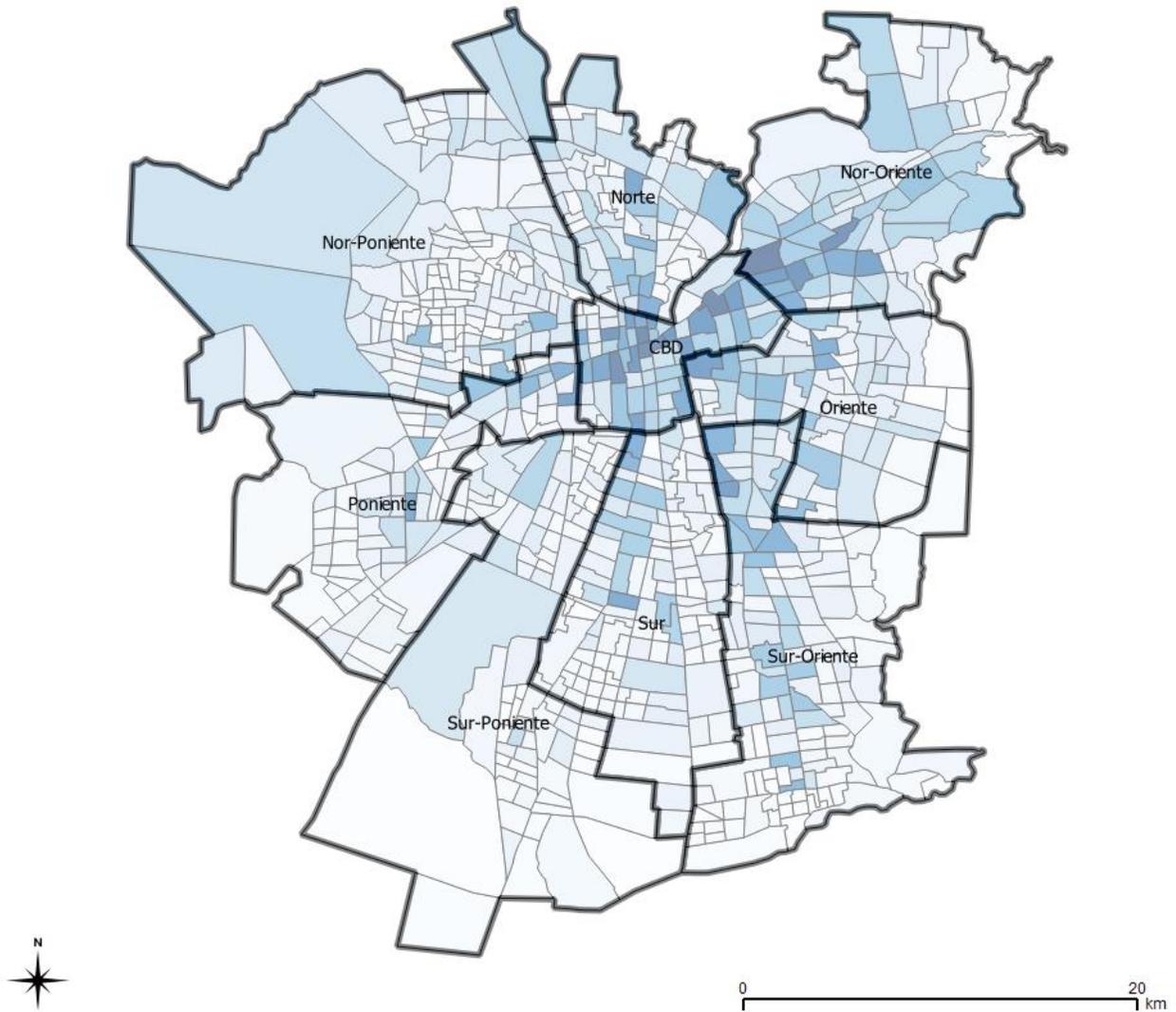


Figura 3.9: Viajes atraídos en punta mañana por zona "diseño 777", mayo 2016

(Fuente: Matriz OD basada en datos bip! + GPS de buses y Elaboración Propia)

El procedimiento para diferenciar ambas partes de una macrozona se realiza considerando aspectos geométricos y los viajes atraídos en punta mañana. Es decir, se considera como subcentro aquellas zonas que sean adyacentes al CBD y aquellas zonas que tengan una cantidad de viajes atraídos que sea considerablemente mayor en comparación al resto de las zonas de la macrozona a la cual pertenece.

La división final de cada macrozona en periferia y subcentro se muestra en la Figura 3.10. Esta división es fundamental para establecer las matrices de viajes por periodo entre cada sector de las macrozonas. Además, esta división es necesaria para calcular las distancias que se tendrán entre cada división de la zonificación adoptada.

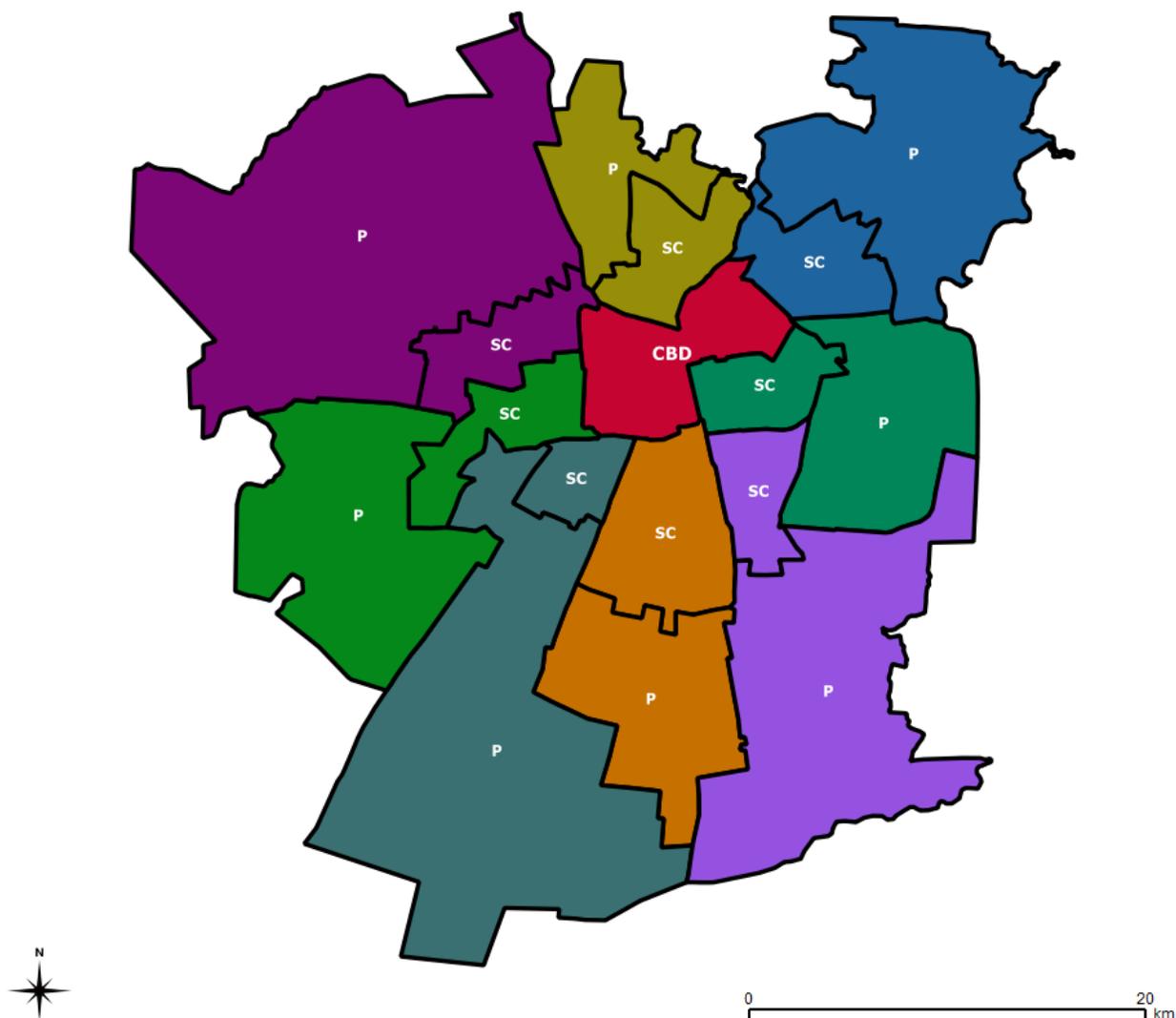


Figura 3.10: División de macrozonas en subcentro y periferia

(Fuente: Elaboración Propia)

Para construir el grafo se requiere imputar una distancia a cada arco entre periferias, subcentros y CBD, éstas fueron determinadas con las distancias medias de viajes entre las zonas “diseño 777” pertenecientes a cada sector de las macrozonas. La estructura topológica estará determinada por las distancias medias en punta mañana, debido a que basado en esos viajes se establece la división entre subcentro y periferia.

Las distancias son determinadas con una base de datos trabajada en *PostgreSQL* y un script de *Python*. Se consideran distancias euclidianas, debido a que las distancias en ruta se ven muy afectadas por las características geográficas mencionadas anteriormente. Para determinar las distancias no se consideran los viajes entre periferia-periferia ni subcentro-subcentro de una misma macrozona, ya que estos viajes no debiesen afectar en la geometría cuando se el problema a resolver es de carácter estratégico.

Una vez que se tienen las distancias entre periferia-subcentro, entre subcentros y entre subcentro-CBD, se deben ajustar las distancias entre subcentros, debido a que la circunvalación no se ajusta a las otras distancias. Es por esto que se le resta cierta distancia proporcional al largo a cada tramo

entre subcentros, luego se itera hasta que el esquema se ajuste. Este proceso se realiza utilizando *AutoCAD*, donde se tiene una serie de herramientas geométricas para obtener una figura consistente.

Finalmente, la estructura simplificada de Santiago, con las distancias en metros entre cada división de las macrozonas y el CBD, se muestra en la Figura 3.11. Cabe destacar que la estructura topológica se establece asimétrica, debido a la diferencia significativa de las distancias entre el CBD y los subcentros, entre subcentros y entre las periferias y subcentros.

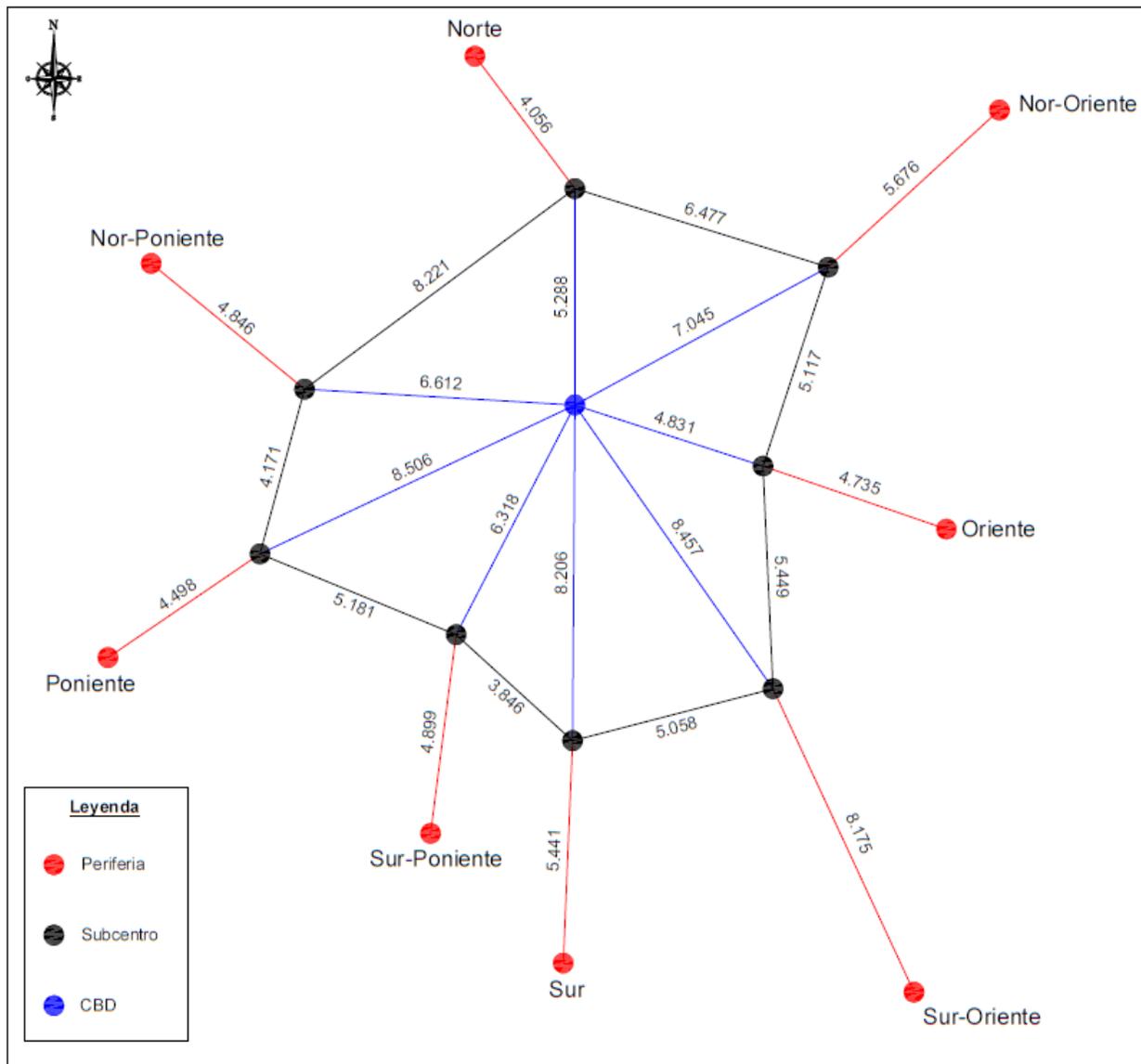


Figura 3.11: Estructura de Santiago con distancias [km], siguiendo modelo basado en centros

(Fuente: Elaboración Propia)

Como se puede ver en la figura anterior, se representa Santiago con nodos y arcos que unen cada sector de las macrozonas. En este caso las macrozonas tienen gran superficie en la ciudad representadas por un punto, del mismo modo los arcos son una línea que representan calles en la ciudad. Así, siendo v el número de avenidas relevantes (por donde circulan servicios troncales)

que representa cada arco en promedio, se encontró este valor para la ciudad de Santiago siguiendo la división mostrada en la Figura 3.10, el cual es de 4 calles por arco en promedio (con un mínimo de 3 y un máximo de 5). El valor anterior fue calculado como el promedio de las avenidas relevantes de cada arco, las cuales son aquellas que tienen mayor relevancia en cuanto a flujo de vehículos y cantidad de servicios de transporte público de superficie.

Un dato útil para tener en cuenta para el análisis de los resultados presentados en las secciones siguientes es saber la distancia media de viaje para punta mañana y fuera de punta. Es por esto que en la Tabla 3.3 se muestra el detalle de las distancias medias en ruta y distancias medias euclidianas para cada periodo.

Tabla 3.3: Distancias medias en ruta y euclidianas por periodo

Periodo	Distancia media en ruta (m)	Distancia media euclidiana (m)
Punta Mañana	10,075	8,119
Fuera de Punta	7,742	6,276

(Fuente: Elaboración Propia)

3.3.3. Estructura de Demanda

Para describir completamente Santiago desde el punto de vista estratégico hace falta establecer las matrices de viaje entre cada una de las divisiones de las macrozonas y el CBD, detallados anteriormente. Lo anterior se debe hacer para el periodo punta mañana y para fuera de punta. Como se explica anteriormente, los periodos utilizados se basan en la EOD 2012, éstos se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Rango horario periodos punta mañana y fuera de punta

Periodo	Hora Inicio	Hora Fin
Punta Mañana	06:00 hrs.	09:00 hrs.
Fuera de Punta	10:00 hrs.	12:00 hrs.

(Fuente: Elaboración Propia)

En la Figura 3.12 se puede ver la cantidad de viajes cada media hora obtenidos de las matrices origen destino de datos bip! y GPS de buses de mayo del 2016. De esta figura se puede notar que hay dos periodos punta, uno en la mañana y otro en la tarde, éstos se asumen análogos por lo que solo se estudia el periodo punta mañana. También existe un periodo punta menos marcado, el cual se conoce como punta medio día, que se da cerca de las 13:00 hrs. El periodo fuera de punta considerado queda entre punta mañana y punta medio día, donde la cantidad de viajes es menor. Finalmente, se puede notar que entre las 00:00 y las 05:00 hrs se tiene un volumen muy bajo de viajes, correspondientes a recorridos nocturnos.

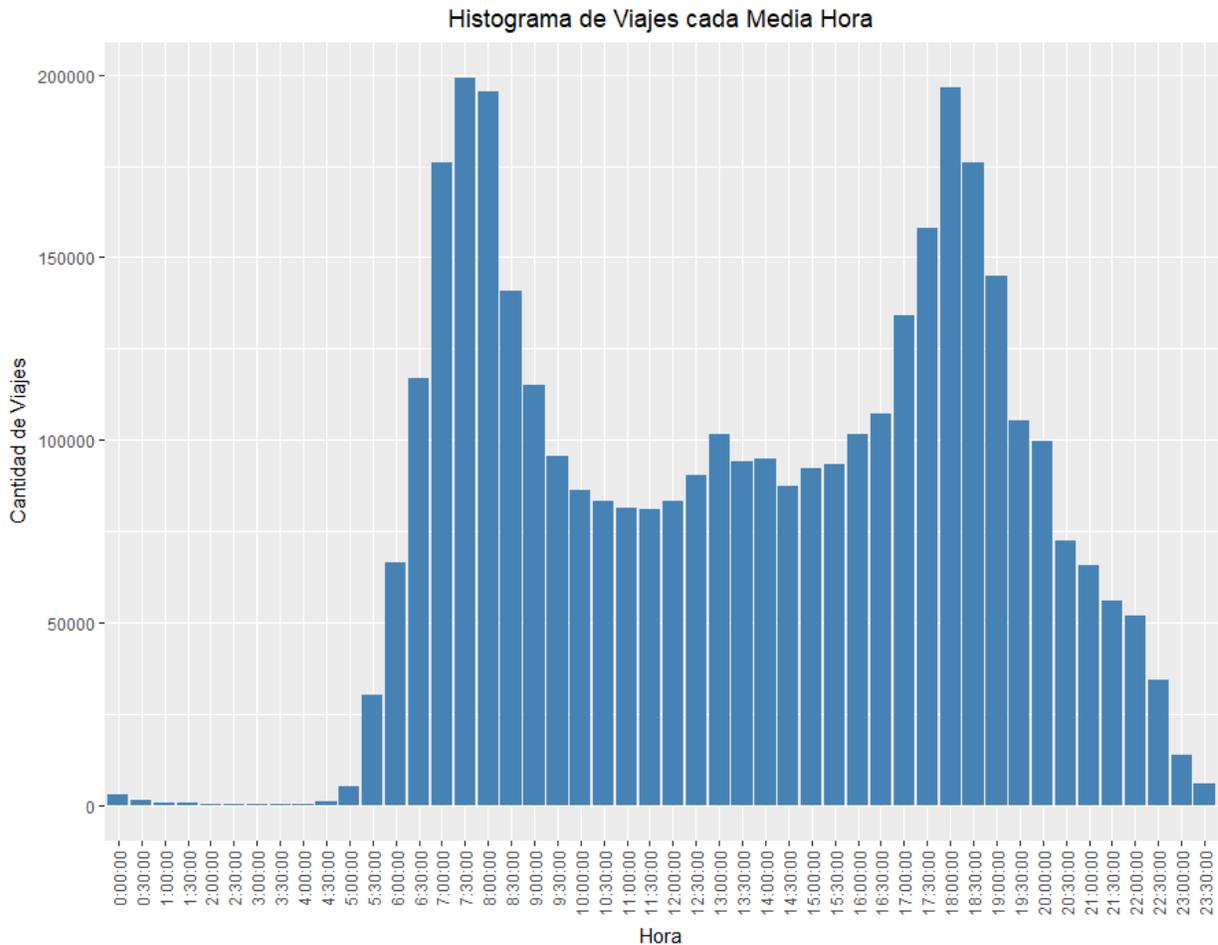


Figura 3.12: Histograma de viajes cada media hora, día laboral normal

(Fuente: Matriz OD basada en datos bip! + GPS de buses)

Ahora bien, es posible afirmar que los viajes en punta mañana son de mayor distancia promedio y con un volumen de más de dos veces mayor en comparación a fuera de punta. Es por esto que, para enfatizar la diferencia entre los dos periodos, para punta mañana se considera la longitud de 3 horas, pero con el volumen de viajes de la hora más cargada (de 07:30 a 08:30 hrs.). De esta manera se mantiene la estructura de los viajes, pero con la carga de la hora de mayor demanda.

En la Tabla 3.5 y en la Tabla 3.6 se muestran las matrices de viajes, en pasajeros por hora entre macrozonas para punta mañana y fuera de punta, respectivamente. La simbología de las tablas se muestra en colores, donde el color verde representa menor cantidad de viajes y el color rojo mayor cantidad de viajes. Siguiendo esto, se puede notar que la macrozona más relevante, luego del CBD, es la Nor-Oriente. Además, la mayor afluencia de viajes se da entre la zona Sur-Oriente al CBD en punta mañana. Mientras que, en fuera de punta, el par origen-destino con mayor relevancia es CBD-CBD, que como ya se sabe no es considerado en la visión estratégica.

Tabla 3.5: Matriz de viajes entre macrozonas, punta mañana (pax/hr)

Origen\Destino	CBD	Nor-Oriente	Oriente	Sur-Oriente	Sur	Sur-Poniente	Poniente	Nor-Poniente	Norte	Total
CBD	21,252	13,390	3,799	3,659	2,520	702	2,893	2,905	3,929	55,050
Nor-Oriente	9,849	8,710	910	1,862	610	115	745	523	515	23,839
Oriente	11,567	6,909	6,436	3,443	958	181	858	581	730	31,663
Sur-Oriente	25,097	13,898	7,993	17,587	3,189	491	1,777	1,475	1,703	73,209
Sur	17,392	7,835	3,181	4,118	9,312	1,460	1,635	1,259	2,744	48,937
Sur-Poniente	6,916	2,850	1,104	977	2,542	2,500	1,445	657	952	19,942
Poniente	22,819	8,736	2,399	2,051	1,349	1,174	9,346	2,628	1,987	52,489
Nor-Poniente	23,228	8,995	3,049	2,353	1,715	597	4,444	11,808	4,028	60,216
Norte	10,279	3,225	1,223	1,124	1,114	284	1,079	1,974	8,613	28,914
Total	148,400	74,547	30,094	37,173	23,311	7,503	24,222	23,809	25,200	394,258

- viajes  + viajes

(Fuente: Matriz OD basada en datos bip! + GPS de buses y Elaboración Propia)

Tabla 3.6: Matriz de viajes entre macrozonas, fuera de punta (pax/hr)

Origen\Destino	CBD	Nor-Oriente	Oriente	Sur-Oriente	Sur	Sur-Poniente	Poniente	Nor-Poniente	Norte	Total
CBD	18,513	6,232	2,888	2,980	2,203	660	3,814	3,246	2,569	43,103
Nor-Oriente	6,350	6,347	704	870	269	50	529	270	344	15,732
Oriente	4,722	1,588	4,388	1,490	301	58	419	173	212	13,349
Sur-Oriente	6,678	2,156	2,294	8,433	1,073	136	701	237	379	22,086
Sur	5,455	1,043	703	1,590	4,569	776	697	220	509	15,559
Sur-Poniente	1,916	319	214	296	942	1,284	759	109	142	5,979
Poniente	7,822	1,431	655	670	456	530	6,549	1,087	508	19,707
Nor-Poniente	7,582	1,158	492	491	262	116	1,931	5,459	1,097	18,586
Norte	4,334	689	305	347	295	71	484	850	4,488	11,861
Total	63,371	20,962	12,641	17,165	10,368	3,680	15,880	11,650	10,245	165,960

- viajes  + viajes

(Fuente: Matriz OD basada en datos bip! + GPS de buses y Elaboración Propia)

Luego, para tener una idea de la homogeneidad de los viajes en cada periodo, se calcula el coeficiente de variación a ambas matrices, el cual corresponde a la división entre la desviación estándar y la media de los viajes para cada par origen destino. De este cálculo se obtiene que los viajes en punta mañana son más homogéneos, ya que presentan un menor coeficiente calculado (1.19 versus un 1.39 en fuera de punta), lo que se puede deber al alto valor que presentan los viajes CBD – CBD en fuera de punta, los que son muy superiores a los demás valores.

Por otro lado, es posible calcular el coeficiente de variación de la atracción total de viajes por zona de cada matriz, donde en punta mañana se tiene un coeficiente de 0.93, mientras que en fuera de punta ese valor es de 0.9. En este caso resulta que en fuera de punta las zonas son más homogéneas en cuanto a la atracción de viajes en comparación con punta mañana.

Un mayor nivel de desagregación de viajes se muestra en la Tabla 3.8 y en Tabla 3.9 para los dos periodos. En estas tablas se muestran los viajes entre las distintas divisiones de las macrozonas y el CBD, en pasajeros por hora. Se puede notar que, en general, los subcentros atraen mayor cantidad de viajes, algunas excepciones se dan cuando existe una fuerte componente de viajes periferia-periferia de una misma macrozona, como en el caso del Sur-Oriente.

Un supuesto importante realizado para enfatizar la diferencia entre periodos es que se considera que las periferias no atraen viajes en punta mañana, mientras que en fuera de punta se quiere representar de la mejor manera los viajes realizados, por lo que existen viajes entre todos los nodos.

Así, si un viaje es realizado a cierta macrozona, en punta mañana, éste se considerará que se hace hacia el subcentro de esta independiente del sector de destino dentro de la macrozona, a excepción de los viajes subcentro-periferia de una misma zona, los cuales se omiten por ser de menor magnitud e ir en sentido contrario a los viajes periferia-subcentro. Dicho esto, en la Tabla 3.7 se muestra la comparación de viajes entre punta mañana y fuera de punta. En la columna “Cambio” se muestra la dirección en que se mueve el porcentaje del tipo de viaje respectivo, así — representa que el porcentaje no cambia, ▼ que el porcentaje disminuye y ▲ que el porcentaje aumenta. Vale la pena destacar que, los últimos tres tipos de viaje no son considerados en la modelación, ya que no afectan desde una mirada estratégica del sistema de transporte público, donde se puede notar que existe un aumento de viajes intra-zonales en fuera de punta.

Tabla 3.7: Viajes punta mañana y fuera de punta. Comparación por tipo de viaje

Tipo viaje	Punta Mañana		Fuera de Punta		Cambio
	Viajes/hora	%	Viajes/hora	%	
periferia - subcentro propio	18,952	5%	8,394	5%	—
periferia - otro subcentro	74,983	19%	11,509	7%	▼
periferia - CBD	61,052	15%	17,092	10%	▼
subcentro - CBD	66,094	17%	27,763	17%	—
CBD - subcentros	33,798	9%	18,068	11%	▲
CBD - periferias	-	-	6,522	4%	
subcentro - otro subcentro	62,762	16%	15,107	9%	▼
periferia - otra periferia	-	-	4,786	3%	
subcentro - periferia propia	8,038	2%	5,902	4%	▲
subcentro - otra periferia	-	-	5,079	3%	
CBD - CBD	21,252	5%	18,513	11%	▲
periferia - periferia	27,172	7%	13,500	8%	▲
subcentro - subcentro	20,149	5%	13,718	8%	▲
Total	394,252	100%	165,956	100%	

(Fuente: Matriz OD basada en datos bip! + GPS de buses y Elaboración Propia)

Finalmente, las matrices de viajes utilizadas en la modelación se muestran en la Tabla 3.10 para el periodo punta mañana, donde las periferias no atraen viajes, y en la Tabla 3.11 para fuera de punta, donde se omiten únicamente los viajes no estratégicos.

Tabla 3.8: Matriz de viajes entre divisiones de macrozonas, punta mañana (pax/hr)

Origen/Destino	CBD	Nor-Oriente		Nor-Poniente		Norte		Oriente		Poniente		Sur		Sur-Oriente		Sur-Poniente		Total	
		periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro		
CBD	21,252	2,045	11,345	1,388	1,517	1,219	2,710	1,203	2,597	399	2,494	406	2,113	1,181	2,478	459	244	55,049	
Nor-Oriente	periferia	1,953	1,827	1,419	75	103	53	132	116	133	34	162	47	115	156	294	21	14	6,653
	subcentro	7,896	1,641	3,824	121	224	66	265	292	369	69	480	95	354	506	907	53	27	17,188
Nor-Poniente	periferia	12,083	903	3,417	5,532	2,552	1,127	1,854	385	1,305	328	1,598	110	902	281	969	276	110	33,734
	subcentro	11,145	652	4,023	1,505	2,218	196	851	307	1,052	428	2,090	43	658	255	849	140	71	26,482
Norte	periferia	4,430	277	1,050	858	157	1,701	2,343	113	428	41	309	50	380	88	311	71	36	12,644
	subcentro	5,848	405	1,493	618	341	1,270	3,299	179	502	77	652	76	607	194	531	122	54	16,267
Oriente	periferia	5,583	939	3,841	103	190	101	294	2,531	1,898	30	383	91	488	706	1,359	77	36	18,650
	subcentro	5,984	233	1,896	111	177	65	270	564	1,443	44	400	79	300	404	974	48	20	13,012
Poniente	periferia	8,524	288	2,490	371	601	152	623	135	739	2,180	2,970	84	454	125	645	503	220	21,103
	subcentro	14,295	736	5,221	618	1,038	229	983	346	1,179	802	3,394	73	738	265	1,016	313	139	31,386
Sur	periferia	6,078	410	2,621	180	294	200	724	564	858	57	549	2,178	2,665	921	877	663	87	19,924
	subcentro	11,314	481	4,322	329	457	316	1,504	638	1,122	93	935	885	3,585	841	1,480	488	223	29,012
Sur-Oriente	periferia	17,134	924	9,730	237	734	185	959	2,125	3,638	59	1,192	550	2,019	9,485	4,869	201	146	54,188
	subcentro	7,963	379	2,863	194	310	106	453	723	1,507	56	470	108	511	1,116	2,117	77	66	19,020
Sur-Poniente	periferia	5,266	270	1,951	232	261	166	528	286	581	217	947	528	1,372	176	507	1,739	236	15,263
	subcentro	1,649	103	525	96	68	56	200	66	170	82	199	77	566	77	217	255	269	4,676
Total	148,397	12,513	62,032	12,569	11,240	7,207	17,992	10,574	19,519	4,996	19,226	5,481	17,827	16,777	20,399	5,505	1,998	394,252	

- viajes  + viajes

(Fuente: Matriz OD basada en datos bip! + GPS de buses y Elaboración Propia)

Tabla 3.9: Matriz de viajes entre divisiones de macrozonas, fuera de punta (pax/hr)

Origen/Destino	CBD	Nor-Oriente		Nor-Poniente		Norte		Oriente		Poniente		Sur		Sur-Oriente		Sur-Poniente		Total	
		periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro		
CBD	18,513	793	5,439	1,480	1,766	783	1,786	880	2,008	614	3,200	427	1,775	1,146	1,834	399	261	43,104	
Nor-Oriente	periferia	1,099	1,090	925	30	33	23	73	57	80	13	98	15	38	67	139	8	3	3,793
	subcentro	5,250	1,108	3,224	70	137	44	204	211	355	42	375	44	171	248	416	27	12	11,938
Nor-Poniente	periferia	3,934	109	465	2,566	967	404	491	48	204	89	671	21	118	58	187	35	22	10,393
	subcentro	3,647	75	508	798	1,127	36	166	42	197	165	1,005	11	112	61	183	39	19	8,192
Norte	periferia	1,654	47	182	315	39	1,002	970	23	78	13	132	12	69	31	72	14	7	4,662
	subcentro	2,679	70	390	370	126	818	1,697	47	157	36	303	33	179	88	156	35	16	7,200
Oriente	periferia	1,867	186	728	22	29	17	64	1,346	941	11	136	28	94	222	473	14	7	6,188
	subcentro	2,855	97	577	48	73	26	105	626	1,474	30	241	48	130	228	568	23	13	7,161
Poniente	periferia	1,879	43	262	64	108	19	96	22	138	1,563	1,587	21	91	28	136	255	39	6,349
	subcentro	5,943	148	978	284	630	65	327	111	384	873	2,525	57	287	150	356	167	68	13,356
Sur	periferia	1,581	70	322	32	32	25	125	95	195	13	197	1,129	837	296	361	297	18	5,626
	subcentro	3,873	81	570	61	94	56	302	126	287	45	441	533	2,070	337	595	303	158	9,931
Sur-Oriente	periferia	3,822	203	1,252	38	71	27	180	454	806	19	387	238	434	3,926	2,081	39	28	14,005
	subcentro	2,856	99	603	45	82	30	143	342	692	30	264	76	325	1,033	1,394	36	34	8,082
Sur-Poniente	periferia	1,256	36	200	43	36	21	76	41	112	135	488	224	441	54	139	878	85	4,267
	subcentro	660	12	72	15	13	8	35	15	45	29	106	29	248	29	73	114	207	1,710
Total	63,369	4,265	16,697	6,282	5,367	3,404	6,840	4,486	8,155	3,722	12,157	2,946	7,421	8,001	9,163	2,684	996	165,956	

- viajes  + viajes

(Fuente: Matriz OD basada en datos bip! + GPS de buses y Elaboración Propia)

Tabla 3.10: Matriz de viajes utilizada en la modelación, punta mañana (pax/hr)

Origen/Destino	CBD	Nor-Oriente subcentro	Nor-Poniente subcentro	Norte subcentro	Oriente subcentro	Poniente subcentro	Sur subcentro	Sur-Oriente subcentro	Sur-Poniente subcentro	Total	
CBD		13,390	2,905	3,929	3,799	2,893	2,519	3,659	702	33,798	
Nor-Oriente	periferia	1,953	1,419	177	185	249	197	161	450	35	4,826
	subcentro	7,896		345	331	661	549	449	1,412	80	11,723
Nor-Poniente	periferia	12,083	4,320	2,552	2,981	1,690	1,927	1,013	1,251	386	28,202
	subcentro	11,145	4,675		1,047	1,359	2,518	702	1,103	211	22,759
Norte	periferia	4,430	1,327	1,015	2,343	541	350	430	399	108	10,943
	subcentro	5,848	1,897	959		681	730	683	725	176	11,698
Oriente	periferia	5,583	4,780	293	395	1,898	414	578	2,065	113	16,120
	subcentro	5,984	2,128	288	335		444	379	1,378	68	11,004
Poniente	periferia	8,524	2,778	972	775	874	2,970	538	769	722	18,922
	subcentro	14,295	5,957	1,655	1,212	1,524		812	1,281	452	27,190
Sur	periferia	6,078	3,031	474	923	1,421	606	2,665	1,797	749	17,746
	subcentro	11,314	4,803	786	1,820	1,760	1,028		2,321	711	24,542
Sur-Oriente	periferia	17,134	10,655	971	1,144	5,764	1,251	2,569	4,869	347	44,703
	subcentro	7,963	3,243	504	559	2,229	526	619		143	15,786
Sur-Poniente	periferia	5,266	2,222	492	695	866	1,164	1,900	683	236	13,524
	subcentro	1,649	628	164	256	236	281	643	294		4,152
Total	127,146	67,254	14,554	18,930	25,554	17,845	16,661	24,457	5,240	317,640	

- viajes  + viajes

(Fuente: Matriz OD basada en datos bip! + GPS de buses y Elaboración Propia)

Tabla 3.11: Matriz de viajes utilizada en la modelación, fuera de punta (pax/hr)

Origen/Destino	CBD	Nor-Oriente		Nor-Poniente		Norte		Oriente		Poniente		Sur		Sur-Oriente		Sur-Poniente		Total	
		periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro	periferia	subcentro		
CBD		793	5,439	1,480	1,766	783	1,786	880	2,008	614	3,200	427	1,775	1,146	1,834	399	261	24,590	
Nor-Oriente	periferia	1,099		925	30	33	23	73	57	80	13	98	15	38	67	139	8	3	2,703
	subcentro	5,250	1,108		70	137	44	204	211	355	42	375	44	171	248	416	27	12	8,714
Nor-Poniente	periferia	3,934	109	465		967	404	491	48	204	89	671	21	118	58	187	35	22	7,827
	subcentro	3,647	75	508	798		36	166	42	197	165	1,005	11	112	61	183	39	19	7,065
Norte	periferia	1,654	47	182	315	39		970	23	78	13	132	12	69	31	72	14	7	3,659
	subcentro	2,679	70	390	370	126	818		47	157	36	303	33	179	88	156	35	16	5,502
Oriente	periferia	1,867	186	728	22	29	17	64		941	11	136	28	94	222	473	14	7	4,841
	subcentro	2,855	97	577	48	73	26	105	626		30	241	48	130	228	568	23	13	5,687
Poniente	periferia	1,879	43	262	64	108	19	96	22	138		1,587	21	91	28	136	255	39	4,786
	subcentro	5,943	148	978	284	630	65	327	111	384	873		57	287	150	356	167	68	10,830
Sur	periferia	1,581	70	322	32	32	25	125	95	195	13	197		837	296	361	297	18	4,497
	subcentro	3,873	81	570	61	94	56	302	126	287	45	441	533		337	595	303	158	7,861
Sur-Oriente	periferia	3,822	203	1,252	38	71	27	180	454	806	19	387	238	434		2,081	39	28	10,079
	subcentro	2,856	99	603	45	82	30	143	342	692	30	264	76	325	1,033		36	34	6,688
Sur-Poniente	periferia	1,256	36	200	43	36	21	76	41	112	135	488	224	441	54	139		85	3,389
	subcentro	660	12	72	15	13	8	35	15	45	29	106	29	248	29	73	114		1,503
Total	44,855	3,175	13,474	3,716	4,240	2,402	5,143	3,140	6,681	2,159	9,632	1,817	5,351	4,076	7,769	1,806	789	120,224	

- viajes  + viajes

(Fuente: Matriz OD basada en datos bip! + GPS de buses y Elaboración Propia)

3.4. Síntesis

En este capítulo se presenta el primer paso necesario para optimizar el sistema de transporte público en Santiago dada una estructura de líneas, es decir, se establece la representación geométrica de la ciudad y la demanda entre los nodos establecidos a partir de datos reales. Además, como se menciona anteriormente el diseño estratégico de sistemas de transporte público depende de la estructura de la ciudad y de la demanda, por lo que representar Santiago de la forma más fiel posible es fundamental, por lo que ambas estructuras se establecen asimétricas.

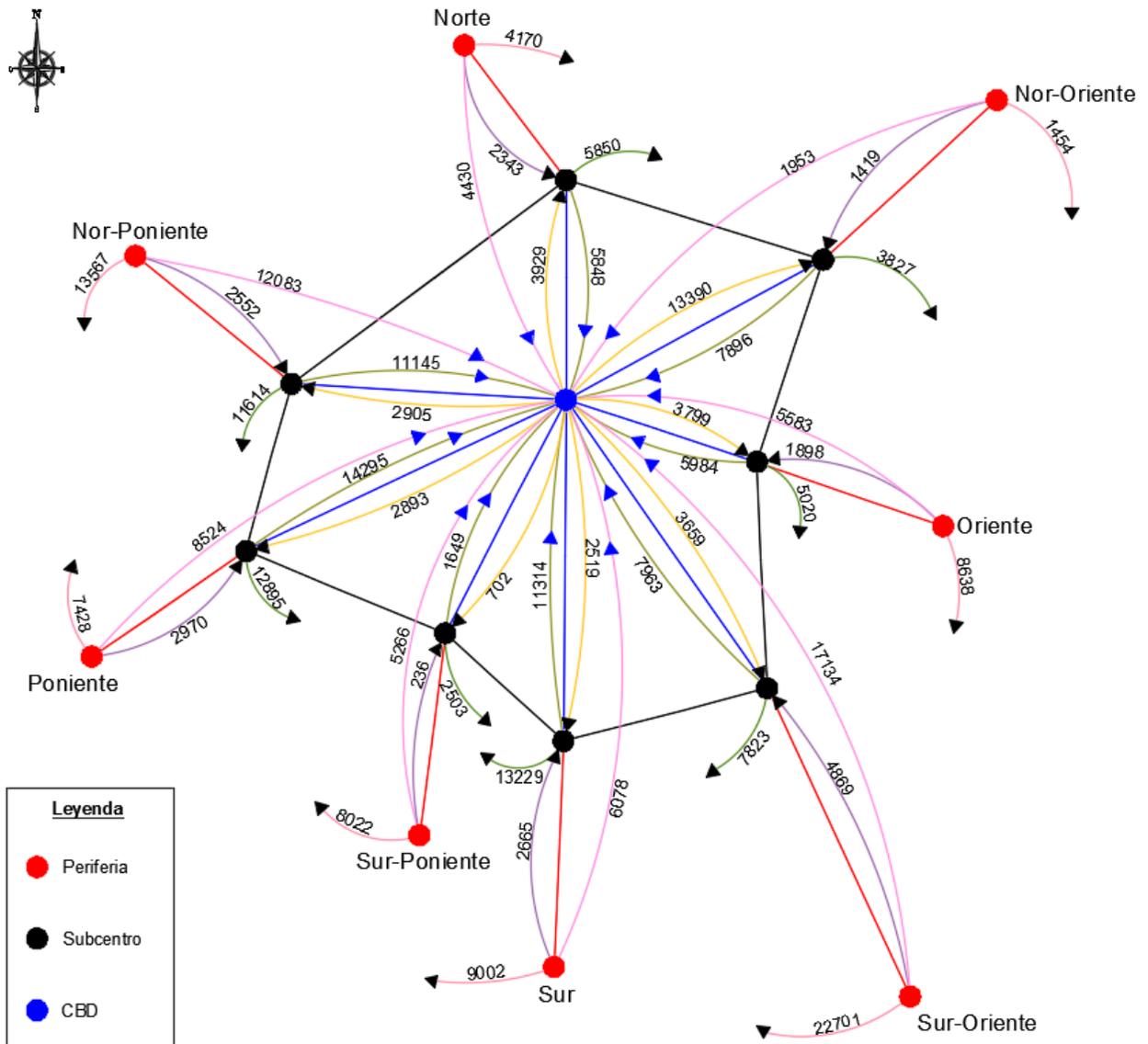


Figura 3.13: Estructura de demanda punta mañana

(Fuente: Elaboración Propia)

En primer lugar, se tiene que a partir del modelo basado en centros se representa Santiago con 8 zonas, cada una compuesta por un subcentro y periferia, más el centro de trabajo. El CBD queda establecido como una extensión del centro histórico, incluyendo a las comunas de Santiago y Providencia, debido a que poseen la mayor cantidad de viajes atraídos en punta mañana, por lo que concentran la mayor cantidad de trabajos. Por otro lado, de las 8 macrozonas establecidas la más

relevante en cuanto a atracción de viajes es el sector Nor-Oriente, el cual ha tenido un fuerte crecimiento concentrando gran cantidad de trabajos. Una vez establecidas las zonas, se calcula la distancia entre los nodos (periferias, subcentros y CBD) del grafo mediante las distancias medias de viaje entre las distintas zonas.

Con lo anterior, se establece la estructura de demanda para ambos periodos, considerando que en punta mañana las periferias no atraen viajes. Esto se puede ver de manera gráfica en la Figura 3.13, donde existen flujos representados por flechas cuyo color de la punta indica la zona de destino, en el caso de las flechas que no llegan a ningún nodo (que tienen como origen periferias y subcentros), éstas indican, para punta mañana, que el flujo se reparte en los demás subcentros de acuerdo con las matrices. Mientras que la estructura de fuera de punta se muestra en la Figura 3.14, donde se nota una mayor cantidad de pares origen destino, agregando nuevos flujos sin nodo de destino, los cuales son viajes que se reparten en las distintas periferias.

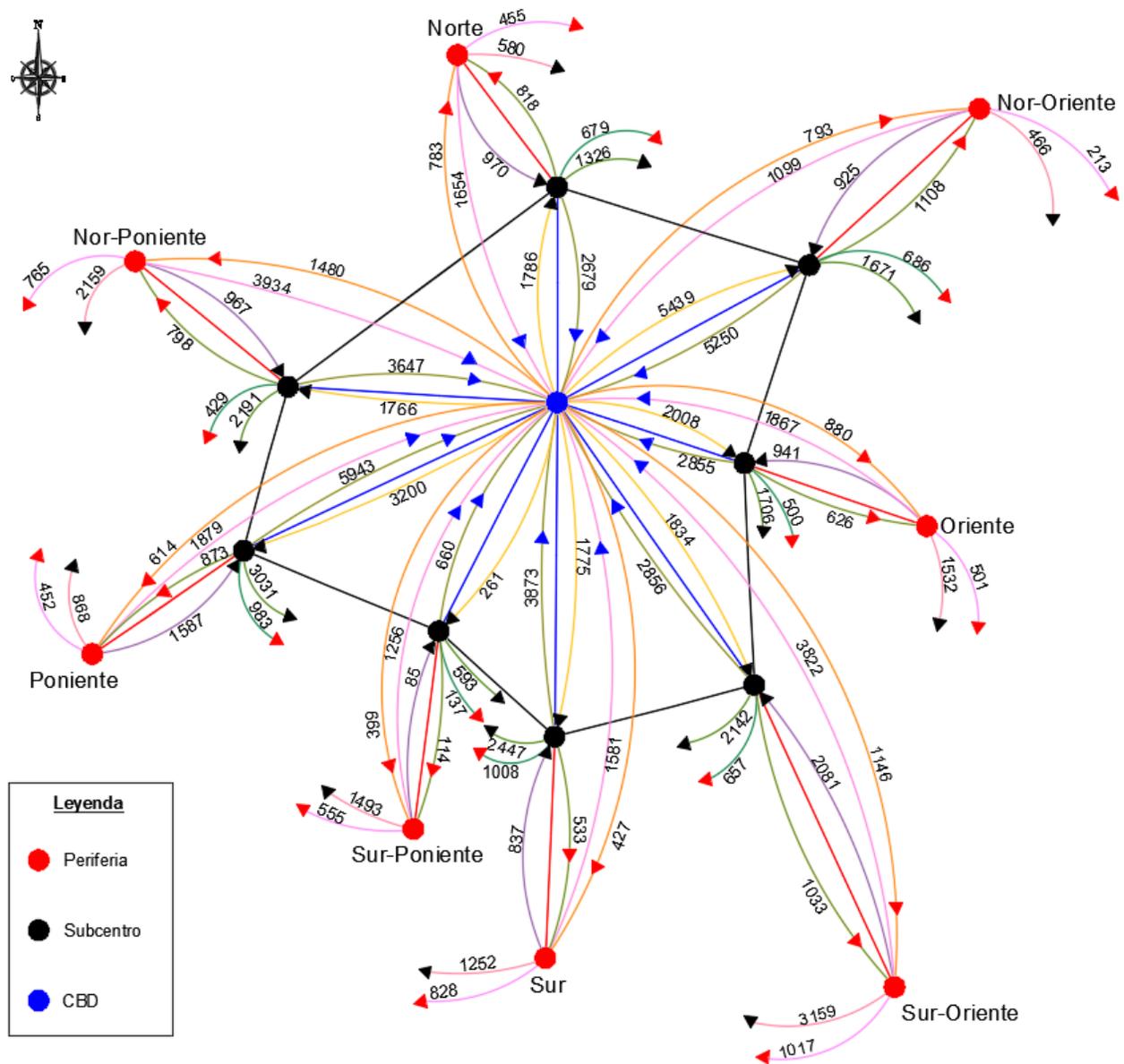


Figura 3.14: Estructura de demanda fuera de punta

(Fuente: Elaboración Propia)

Respecto al cambio en la estructura de demanda por periodo se tiene que en fuera de punta hay un aumento considerable de viajes inter-nodo, es decir, aumentan los viajes periferia-periferia y subcentro-subcentro de la misma zona además de los viajes CBD-CBD, esto se da debido a que la distancia media de viajes en fuera de punta es menor, teniéndose a la vez una disminución de los viajes más largos.

Una vez establecidas la estructura topológica y de demanda para Santiago, el siguiente paso es plantear el problema de optimización que se quiere resolver, con los datos y supuestos necesarios. Además, describir las estructuras de líneas en la zonificación compuesta de 8 macrozonas y el CBD. De esta manera se podrá optimizar el sistema para diferentes estructuras de líneas considerando dos periodos por separado y así lograr adaptar las frecuencias y tamaños de bus para el otro periodo, es decir, lograr el objetivo de este trabajo.

Capítulo 4 : Estructuras de Líneas Estratégicas

Las estructuras de líneas estratégicas se pueden definir como el conjunto de líneas de transporte público que permite movilizar a todos los pasajeros. Existen diferentes estructuras de líneas, algunas basadas en transbordos, como hub&spoke y troncal-alimentador, y otras del tipo directas, en las cuales ningún pasajero requiere transbordar, como las directas y exclusivas (sin paradas intermedias), las cuales se explican en detalle en la sección 4.2. Una vez definida la estructura de líneas que se quiere analizar, se plantea un problema de optimización, el cual minimiza los costos totales (operadores y usuarios), determinando los mejores valores de frecuencias y tamaños de buses para cada línea de la estructura.

En este capítulo se describe el problema de optimización necesario para encontrar las mejores frecuencias de cada estructura de líneas. En primer lugar, se presenta la función de costos (función objetivo a optimizar), los valores de los parámetros utilizados y los supuestos realizados. Luego, se describen las estructuras de líneas consideradas para el análisis, junto con la distribución de pasajeros que se tendrá.

El proceso de optimización de la función de costos se programó en el software de código abierto *R*, con la ayuda de la librería *optim*, donde se realiza la asignación de pasajeros a líneas correspondiente a cada estructura de líneas dependiendo de la matriz de demanda para cada periodo.

4.1. Función de Costos, Supuestos y Parámetros

Para encontrar las mejores frecuencias y tamaños de buses para cada estructura de líneas es necesario establecer el problema de optimización que se quiere resolver, el cual en este caso es minimizar el costo de los usuarios más el de los operadores. Por un lado, el costo de los operadores incluye los costos de operación de los buses a lo largo de la duración de cada periodo además de la compra de los buses, los cuales se determinan mediante una función lineal respecto al tamaño de bus. Por otro lado, se tiene que el costo de los usuarios viene dado por el tiempo de espera, el tiempo de viaje en vehículo y el costo por transbordo. De esta manera al incluir a los dos participantes del transporte público la tarifa no juega un rol en el problema de optimización, ya que es una transferencia entre los agentes.

En la presente sección se muestra la función del valor de los recursos consumidos (VRC) que se minimiza para encontrar las frecuencias óptimas de cada estructura de líneas, así como también los parámetros utilizados y supuestos planteados necesarios para calcular flota, tiempos de ciclo, tiempos de subida y bajada, etc.

En base a las ecuaciones mostradas en el Capítulo 2 (en especial las propuestas por Jara-Díaz et al. (2017)), se tiene la Ecuación 4.1 que muestra el valor de VRC de un periodo del día con duración de E horas, donde la primera suma corresponde al costo de los operadores, B_l es la flota asociada a la línea l , K_l es el tamaño de embarque. Luego, asumiendo una función de costo de los buses lineal respecto a la carga, se tiene que $c_0 + c_1 K_l$ son los costos de operación y $c_0^A + c_1^A K_l$ corresponden a los costos de capital asociados a la compra de buses. La segunda suma corresponde a los costos de los usuarios, donde Y es el total de pasajeros, p_v es el valor del tiempo de viaje, t_v

es el tiempo de viaje en vehículo del pasajero y , p_w es el valor del tiempo de espera, t_{w_y} es el tiempo de espera total que experimenta el usuario y , p_r es la penalidad asociada a un transbordo y R_y es la cantidad de transbordos que hace el pasajero y .

$$VRC = \sum_{l \in L} (B_l(c_0 + c_1 K_l) \cdot E + B_l \cdot (c_0^A + c_1^A K_l)) + \sum_{y \in Y} (p_v t_{v_y} + p_w t_{w_y} + p_r R_y) \cdot E \quad (4.1)$$

$$K_l = \frac{\text{Carga máxima}_l}{f_l} \quad (4.2)$$

$$B_l = f_l \cdot t_{c_l} \quad (4.3)$$

$$t_{c_l} = \frac{d}{v} + \sum_{\text{paradero } i} t_{\text{subida}_i} + t_{\text{bajada}_i} \quad (4.4)$$

Luego, en la Ecuación 4.2 se muestra el cálculo del tamaño de embarque, donde la carga máxima de la línea corresponde al arco más cargado y f_l es la frecuencia asociada a la línea l . Además, en la Ecuación 4.3 se muestra el cálculo de la flota de la línea l , donde t_{c_l} es el tiempo de ciclo de la línea, cuyo cálculo se muestra en la Ecuación 4.4, siendo d la distancia a recorrer ida y vuelta, v la velocidad de circulación, y el tercer término corresponde a la suma de los tiempos de subida y bajada de pasajeros en el ciclo completo.

Además, es necesario notar que las expresiones de tiempo de viaje y tiempo de espera de cada usuario dependen de la frecuencia de la línea o las líneas que sirvan el par origen destino. Por lo tanto, la ecuación de VRC depende solamente de la frecuencia de cada línea, siendo este parámetro las variables de decisión para minimizar el costo total del sistema.

Luego, se presenta una lista con los supuestos realizados para el cálculo de algunas componentes de la función de costos. Estos supuestos son necesarios tenerlos en cuenta al momento de establecer las reglas de asignación de pasajeros a líneas para cada una de las estructuras de líneas, además de ser útiles en el cálculo de tiempos de espera de cada usuario, de viaje de los buses, etc.

- El tiempo de espera será considerado como un medio del inverso de la frecuencia asociada a la línea que será tomada, o de las líneas en caso de existir líneas comunes que cubran el par origen destino. Esto, considerando que los buses operan a intervalos regulares, por lo que no existe retraso en los tiempos de llegada. En la operación de Transantiago esto no sucede; en mediciones realizadas por el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM) se tiene que el tiempo de espera es un 40% más que un medio del inverso de la frecuencia, por lo que el multiplicador debiese ser 0.7 en vez de 0.5 que se utiliza para modelar. Se decide utilizar 0.5 para el cálculo del tiempo de espera debido a que se supone un sistema sin irregularidades inducidas por factores externos que no son controlables en la modelación.
- Además, si se considera que cada arco representa una gran calle donde circulan los buses se tiene que el tiempo de espera experimentado por los usuarios será de la mitad del intervalo del bus o de los buses que pasen por la calle donde se encuentran y sirvan su par

origen destino. Por lo tanto, se considera el parámetro v que es la cantidad de calles por arco, quedando el cálculo del tiempo de espera como $\frac{1}{2 \cdot f} \cdot v$ con lo que a medida que v crece el tiempo de espera se hace más fuerte. Para la modelación se utilizará $v = 1$, debido a que esta memoria continúa lo realizado por Jara-Díaz et al. (2017), quienes no consideran este parámetro. Sin embargo, se realizará un análisis de sensibilidad respecto a este parámetro.

- Debido a que la tarifa es igual para todos los viajes, no considerándose en el modelo, para la asignación los pasajeros elegirán la ruta con menor costo generalizado, en caso de líneas comunes que sirvan un mismo par origen destino la asignación se realiza proporcional a la frecuencia de cada línea. Por ejemplo, si la línea A es común para una demanda Y con la línea B , la cantidad de pasajeros que utiliza la línea A será $\frac{f(A) \cdot Y}{f(A) + f(B)}$.
- No se considera la disconformidad por buses con alta tasa de ocupación. Es por esto que la capacidad de los buses será igual a la máxima cantidad de pasajeros que quepan.
- No se consideran efectos de congestión entre buses ni con otros modos de transporte.
- La percepción de los usuarios y operadores del sistema de transporte público es completamente determinística, por lo que no hay efectos aleatorios.
- Las velocidades utilizadas son promedio, es decir, incluyen variaciones por desaceleraciones y aceleraciones cuando se llega o se sale de algún paradero.
- El proceso de subida y bajada de pasajeros se modela de manera secuencial, donde los pasajeros primero bajan del bus y luego abordan. Además, se considera que cuando el paradero es el nodo inicial del viaje de una persona, el tiempo que demora en subir al bus ya está incorporado en el tiempo de espera (Jara-Díaz y Gschwender, 2003b) y por lo tanto no se considera en el tiempo de viaje. En el caso del nodo final, el tiempo de subida de pasajeros no se considera, pues es posterior a la bajada del usuario en cuestión, mientras que para la bajada se considera que los pasajeros en promedio bajan después de que desciende la mitad de los pasajeros que llegaron a destino (Fielbaum, 2014).

A continuación, se muestran los valores de los parámetros que componen la función del valor de los recursos consumidos. Estos valores se obtienen de diversas fuentes que serán detalladas a medida que se especifica cada uno de ellos. Luego, se muestra una tabla resumen con todos los valores a tener en cuenta para optimizar las frecuencias de las estructuras de líneas analizadas.

En primer lugar, los tiempos de subida y bajada por pasajero se obtienen del artículo de Tirachini, Camus y Cruz (2016), donde para un bus de dos puertas en un paradero normal en Santiago se obtiene un tiempo de 0.99 segundos por pasajero bajando y 2.35 segundos por pasajero subiendo.

Luego, los valores del tiempo de viaje y de espera son obtenidos de los Precios Sociales Vigentes al año 2017 (Ministerio de Desarrollo Social, 2017), donde al convertir los valores a dólares se tiene un valor de 2.53 [US\$/h] para el tiempo de viaje y 5.06 [US\$/h] para el tiempo de espera.

El costo de penalidad por transbordo se decide dejar en un valor intermedio a lo visto en la literatura, utilizando un valor igual a 12 veces un minuto equivalente de tiempo de viaje en el vehículo. Este valor es el menor de los presentados en Currie (2005), donde el valor promedio es de 22 minutos equivalentes en tiempo de viaje. Otro valor utilizado es de 35.5 minutos de tiempo de viaje, el cual corresponde a 22 por molestia de transbordo más 4.5 minutos de caminata Gschwender et al. (2016). En Fielbaum et al. (2016) utilizan para su análisis un valor intermedio entre el mínimo y el máximo valor reportado, es decir, 24 minutos de tiempo de viaje en el vehículo. Además, en Garcia-Martínez et al. (2018) obtienen que la molestia pura por transbordar es entre

15.2 a 17.7 minutos equivalentes en el vehículo. Debido a que este valor presenta mucha variación en la literatura, se realizará un análisis de sensibilidad respecto a este parámetro.

En cuanto a las velocidades de cada periodo, éstas se calculan a partir del Consolidado de Frecuencias – Capacidades – Distancias – Velocidades de Transantiago (DTPM, 2017), donde se obtiene la velocidad por periodo como el promedio ponderado con las frecuencias de cada servicio. Las velocidades resultantes son 18.5 [km/h] en punta mañana y 20.4 [km/h] para fuera de punta.

Ahora bien, los costos de operación fueron calculados con una regresión lineal realizada a partir de datos de costos de operación según el tamaño de bus de los utilizados en Transantiago, obtenidos de Espinoza (2017). Como los costos se presentan por kilómetro se hace la conversión a hora mediante la velocidad de circulación de cada periodo. De esta manera, para punta mañana se tiene que c_0 vale 1.41 [US\$/h] y c_1 0.10 [US\$/h-asiento], mientras que para el periodo fuera de punta c_0 tiene un valor de 1.55 [US\$/h] y c_1 0.12 [US\$/h-asiento]. Como se puede ver, los costos por hora en fuera de punta son mayores, esto se debe a la velocidad de circulación, ya que los valores por kilómetro son independientes del periodo.

Finalmente, los costos de capital son obtenidos de Jara-Díaz et al. (2017) al igual que la duración de cada periodo del día. Así, c_0^A tiene un valor de 4.14 [US\$] y c_1^A de 0.45 [US\$/asiento]. Mientras que el periodo punta mañana tiene una duración de 5 horas (considerando punta mañana y punta tarde) y el periodo fuera de punta tiene una duración total de 13 horas, sumando un total de 18 horas de operación en un día.

En la Tabla 4.1 se muestra un resumen con todos los valores de los parámetros descritos anteriormente, los cuales se utilizan al momento de optimizar las frecuencias para cada estructura de líneas.

Tabla 4.1: Resumen de los valores de los parámetros utilizados

Parámetro	Periodo	Valor	Unidades
t_{subida}	----	2.35	[s]
t_{bajada}	----	0.99	[s]
p_v	----	2.53	[US\$/h]
p_w	----	5.06	[US\$/h]
p_r	----	$12 \cdot \frac{p_v}{60}$	[US\$]
v	Punta Mañana	18.5	[km/h]
v	Fura de Punta	20.4	[km/h]
c_0	Punta Mañana	1.41	[US\$/h]
c_1	Punta Mañana	0.10	[US\$/h-asiento]
c_0	Fuera de Punta	1.55	[US\$/h]
c_1	Fuera de Punta	0.12	[US\$/h-asiento]
c_0^A	----	4.14	[US\$]
c_1^A	----	0.45	[US\$/asiento]
E	Punta Mañana	5	[h]
E	Fuera de Punta	13	[h]

(Fuente: Diversas fuentes/Elaboración Propia)

4.2. Estructuras de Líneas

En esta sección se describen las cuatro estructuras de líneas consideradas en el análisis, detallando la distribución de pasajeros a líneas comunes, la cantidad y los tipos de líneas, etc. Las estructuras de líneas se describen brevemente a continuación:

- **Líneas Directas:** Para cada par origen-destino hay al menos una línea que los conecta, por lo que no hay necesidad de transbordar. Esta estructura es determinada según la heurística de construcción de líneas planteada en Ceder y Wilson (1986).
- **Líneas Exclusivas:** Unen a todos los pares origen-destino sin realizar paradas en nodos intermedios, por lo que ningún pasajero requiere transbordar, existiendo un servicio para cada par de nodos.
- **Troncal-Alimentador:** Los pasajeros de la periferia toman buses alimentadores hasta el subcentro de la misma zona. Desde allí hay líneas directas (troncales) para todos los subcentros, realizando paradas en el CBD. Además, se añaden líneas circulares que unen a los subcentros.
- **Hub&Spoke:** El CBD se convierte en el punto más relevante de transbordo, ya que la mayoría de los viajes van hacia el CBD y luego transbordan para llegar a su destino. No se trata de una estructura “pura” de hub&spoke, debido a que se añaden líneas circulares que unen a los subcentros, generándose transbordos en los subcentros cuando sea conveniente para los usuarios.

4.2.1. Líneas Directas

Como se menciona anteriormente, la estructura de líneas directas conecta todos los pares origen-destino sin transbordos. En este caso existen líneas comunes, por lo que de todas las líneas consideradas en un comienzo puede haber algunas que se les asigne frecuencia cero, es decir, probablemente la estructura final tendrá menos servicios, lo cual no tiene efecto en el mínimo valor de VRC el cual se alcanza independiente de la cantidad de líneas propuestas inicialmente.

La estructura de líneas directas es construida a partir de una heurística propuesta por Ceder y Wilson (1986), la cual está basada en líneas directas, pero la modifica permitiendo desviaciones para recoger una mayor cantidad de pasajeros. Esta heurística se elige debido a que en Fielbaum et al. (2017b) se aplican 4 heurísticas al modelo basado en centros, resultando que la que presenta el mínimo costo promedio es la de Ceder y Wilson. Además, para niveles de demanda altos tiene el menor costo de todas las heurísticas presentadas.

Basándose en lo descrito en Ceder y Wilson (1986) y en Fielbaum et al. (2017b), se llega a un pseudo-código de construcción de líneas. Este algoritmo construye rutas que salen de un terminal (el primer origen), buscando árboles en el grafo. Para esto, se debe seleccionar cualquier terminal como el primero y seguir el pseudo-código detallado a continuación:

- 1- Buscar todos los nodos que se pueden alcanzar desde el origen actual:
 - Si no se alcanza ningún nodo, ir al paso 2.
 - Para cada nodo alcanzable, si no está conectado y la longitud total del camino no excede la longitud de la ruta mínima por un porcentaje σ (definido a priori), se añade al árbol. Si no existe tal nodo, ir al paso 2.

- Si no, seleccionar cualquiera de los esos nodos como el nuevo origen para el mismo terminal y repetir paso 1.
- 2- Seleccionar como nuevo origen el último nodo añadido al árbol que no haya sido un origen. Si no existe dicho nodo, ir al paso 3.
- 3- Si no hay más terminales, terminar el algoritmo. Si no, seleccionar un nuevo terminal, definir como nuevo origen e ir al paso 1.

En el modelo basado en centros, las rutas parten desde una periferia (terminales) y necesariamente van al subcentro propio. Luego, es posible ir al subcentro vecino o al CBD. Se comienza explorando rutas en dirección al CBD que, dependiendo de σ , alcanzan 3, 4 o 5 subcentros. Una vez exploradas las rutas a través del centro, el resto de las rutas recorren el anillo de subcentros hasta que el grafo es cubierto. Luego, es imposible extender cualquier ruta sin alcanzar una ruta cubierta previamente que parta desde el mismo terminal.

Una vez aplicada la heurística anterior se llega a la estructura de líneas directas que se utiliza en la modelación, donde la cantidad de nodos alcanzados a través del CBD depende de la periferia de origen. La estructura se determina utilizando $\sigma = 0.25$ para privilegiar las rutas cortas que, según el artículo de Fielbaum et al. (2017b), son mejores para el caso de alta demanda, como es este caso. El resultado de la heurística para cada nodo se muestra en la Figura 4.1.

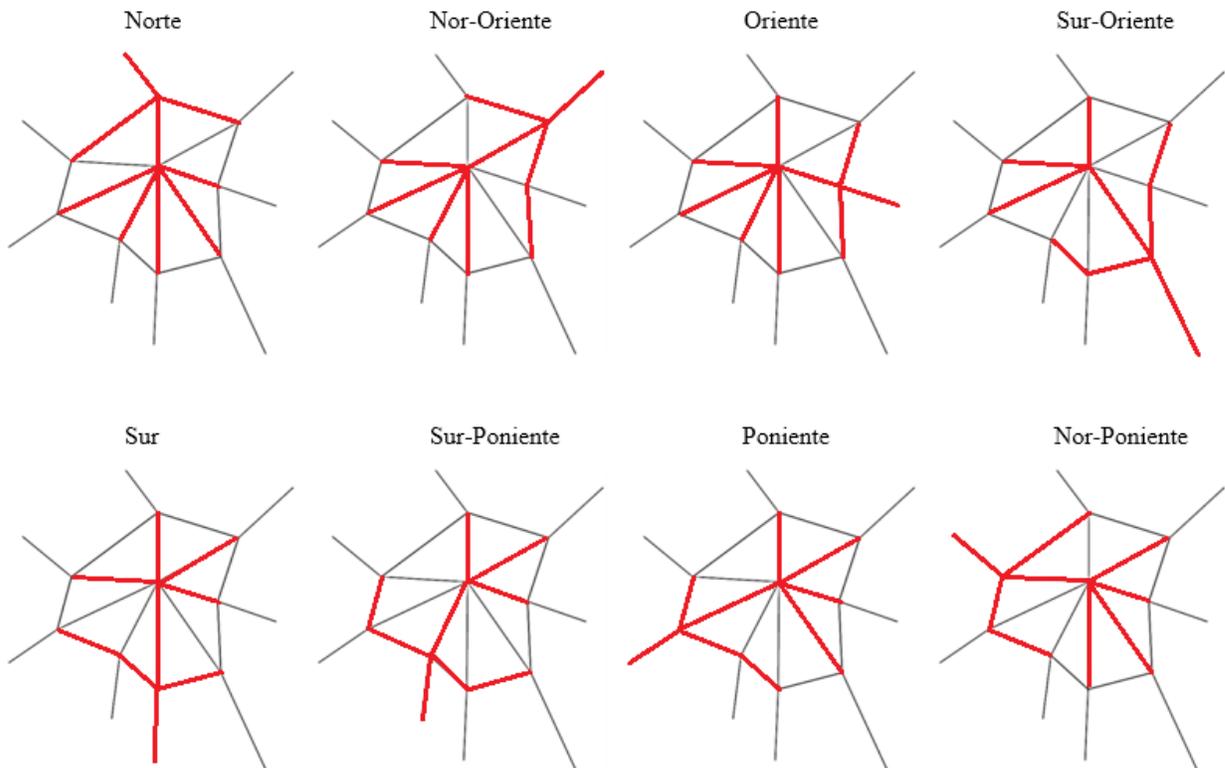


Figura 4.1: Heurística líneas directas 8 nodos

(Fuente: Elaboración Propia)

En este caso existe inicialmente una línea por cada par origen destino (108 en punta y 136 en fuera de punta), siguiendo las rutas mostradas en la figura anterior, en el óptimo puede haber líneas con frecuencia cero, las cuales no existirán en la estructura final. Luego, de modo de establecer la

notación a utilizar, se tiene que los tipos de líneas existentes son los que se muestran en la siguiente lista:

- Periferia – subcentro propio (P_iSC_i).
- Periferia – CBD (P_iCBD).
- Periferia – otro subcentro (P_iSC_j).
- Subcentro – CBD (SC_iCBD).
- Subcentro – otro subcentro (SC_iSC_j).
- Periferia – otra periferia (P_iP_j), viajes existentes solo en fuera de punta.

Además, existen líneas que se les adicionará una letra al final dependiendo si alcanzan un subcentro vecino a través del CBD o mediante la circunvalación. En el caso que se llegue a otro subcentro atravesando el CBD se le adiciona la letra *H* al final, mientras que si se alcanza a través del anillo de subcentros se le agrega la letra *F* al final. Así, si la línea que une la periferia con otro subcentro y atraviesa el CBD se llamará P_iSC_jH , en el otro caso será P_iSC_jF .

Luego, debido a que las periferias no atraen viajes en punta mañana se tiene un diagrama con todos los tipos de líneas existentes diferenciados por periodos del día. En la Figura 4.2 se muestra la estructura para punta mañana vista desde el nodo sur. Mientras que en la Figura 4.3 se muestra para fuera de punta, donde se crean las líneas hacia las periferias, teniendo que omitir las líneas originadas desde el subcentro por temas de espacio en la figura.

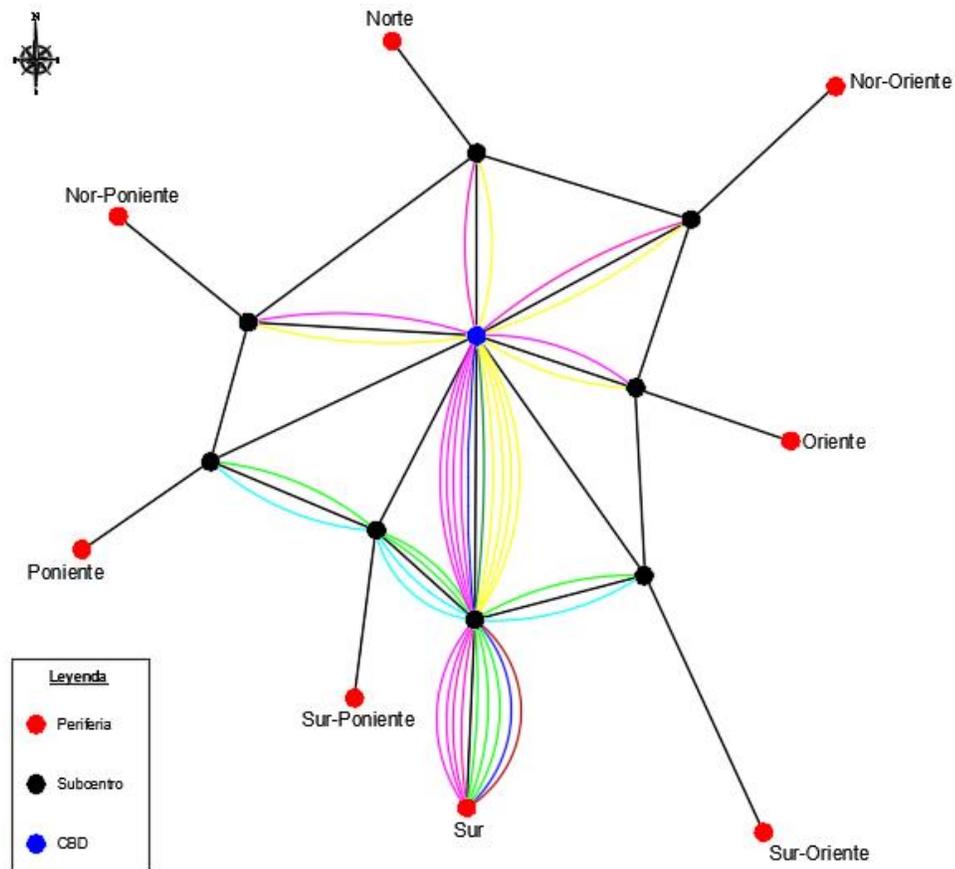


Figura 4.2: Estructura líneas directas, punta mañana, vista desde el nodo Sur

(Fuente: Elaboración Propia)

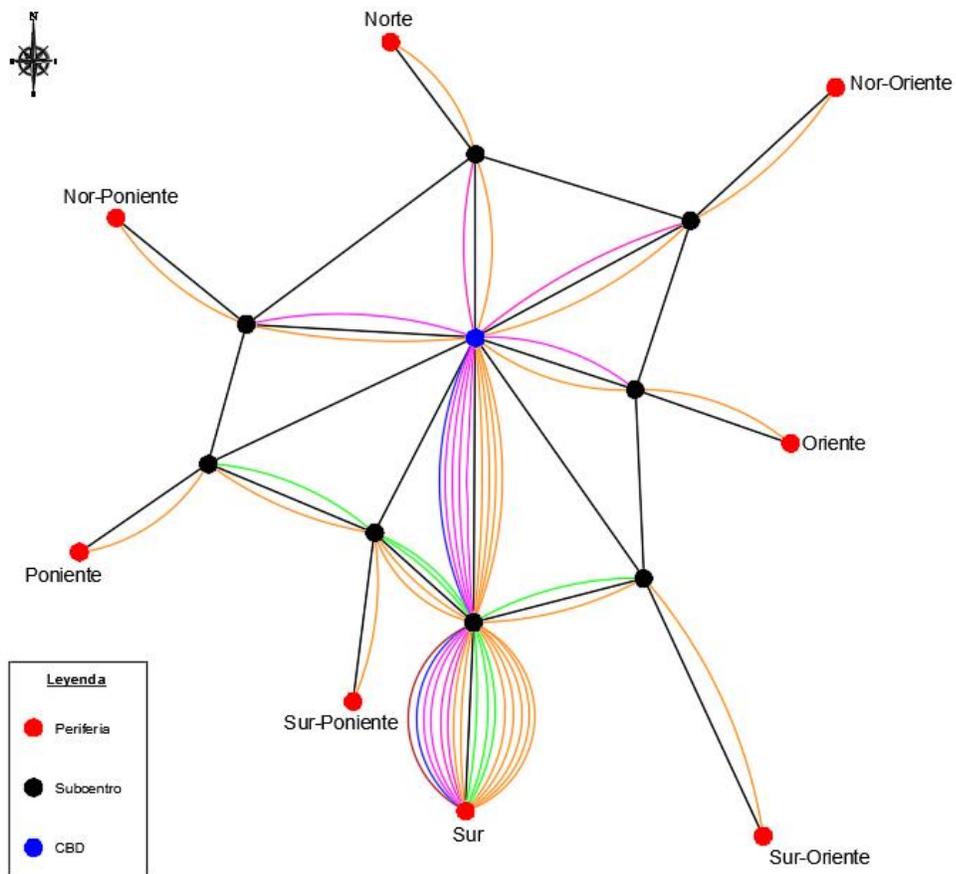


Figura 4.3: Estructura líneas directas, fuera de punta, vista desde el nodo Sur

(Fuente: Elaboración Propia)

Ahora bien, como existen pares origen-destino que son servidos por más de una línea se requiere de asignación de pasajeros a líneas comunes. Además, es necesario recordar que los pasajeros escogen de acuerdo con el menor costo generalizado, por lo que la asignación de viajes a las diferentes líneas queda de la forma mostrada en la Tabla 4.2. Otro aspecto importante de notar es que las líneas sirven el par origen destino ida y vuelta, pero en la siguiente tabla se muestran las líneas a utilizar en un solo sentido.

Definido todo lo anterior es posible realizar la asignación de pasajeros a líneas, dependiendo de la frecuencia de cada línea. Con esto, ya es posible minimizar los costos de cada periodo por separado para esta estructura, considerando todos los supuestos y parámetros descritos anteriormente.

Tabla 4.2: Asignación de pasajeros a líneas, estructura directa

Tipo de viaje	Línea a utilizar
Periferia – subcentro propio	$P_iSC_i, P_iCBD, P_iSC_jH, P_iSC_jF, P_iP_jH, P_iP_jF$
Subcentro – periferia propia (*)	$P_iSC_i, P_iCBD, P_iSC_jH, P_iSC_jF, P_iP_jH, P_iP_jF$
Periferia – subcentro H	P_iSC_jH, P_iP_jH
Periferia – subcentro F	P_iSC_jF, P_iP_jF
Subcentro – periferia H (*)	P_iSC_jH, P_iP_jH
Subcentro – periferia F (*)	P_iSC_jF, P_iP_jF
Periferia – CBD	$P_iCBD, P_iSC_jH, P_iSC_jF, P_iP_jH, P_iP_jF$
CBD – Periferia (*)	$P_iCBD, P_iSC_jH, P_iSC_jF, P_iP_jH, P_iP_jF$
Subcentro – CBD	$SC_iCBD, SC_iSC_jH, P_iCBD, P_iSC_jH, P_iP_jH, P_jSC_iH$
CBD – subcentro	$SC_iCBD, SC_iSC_jH, P_iCBD, P_iSC_jH, P_iP_jH, P_jSC_iH$
Subcentro – subcentro H	$SC_iSC_jH, P_iSC_jH, P_iP_jH, P_jSC_iH$
Subcentro – subcentro F	$SC_iSC_jF, P_iSC_jF, P_iP_jF, P_jSC_iF$
Periferia – periferia H (*)	P_iP_jH
Periferia – periferia F (*)	P_iP_jF

(*) Son viajes asignables solo en el periodo fuera de punta.

(Fuente: Elaboración Propia)

4.2.2. Líneas Exclusivas

Las líneas exclusivas tienen como principal característica unir a todos los pares origen destino sin realizar paradas en nodos intermedios, es decir, se aborda en el origen y no se detiene hasta llegar a destino. Evidentemente esta estructura no requiere de transbordos.

En este caso la asignación de pasajeros se realiza de manera directa, ya que a cada par origen destino le corresponde la línea que une específicamente a ese par. En cuanto al cálculo de carga, y tiempos de espera, esto se puede calcular con lo explicado en la sección anterior, donde el tamaño de embarque es igual a la carga máxima (máxima cantidad de pasajeros entre ida y vuelta) dividido por la frecuencia y el tiempo de espera es un medio del inverso de la frecuencia. Finalmente, debido a la naturaleza de las líneas exclusivas, éstas se pueden optimizar cada una por separado y alcanzar el óptimo global.

Al igual que en el caso de las directas, en punta mañana se tienen 108 líneas y en fuera de punta 136 líneas equivalentes a los pares origen destino existentes. Pero en este caso no existirán líneas que se les asigne frecuencia cero, debido a que en todos los pares origen destino existe demanda. Luego, en la Figura 4.4 se muestra la estructura para punta mañana y en la Figura 4.5 para fuera de punta, las cuales son análogas al caso anterior.

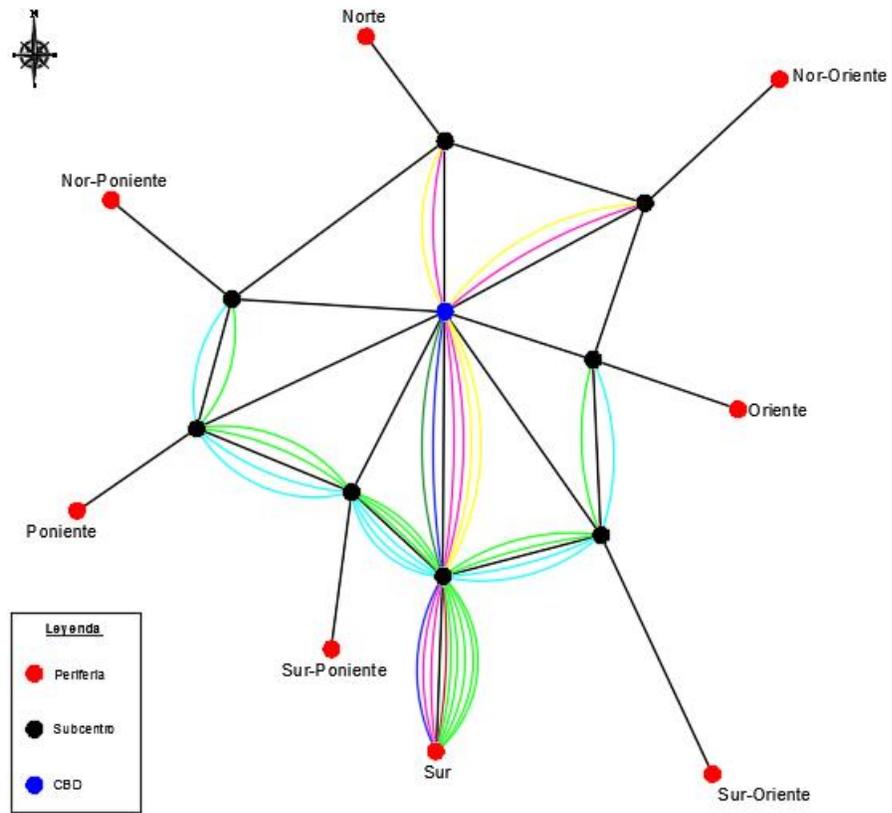


Figura 4.4: Estructura líneas exclusivas, punta mañana, vista desde el nodo Sur

(Fuente: Elaboración Propia)

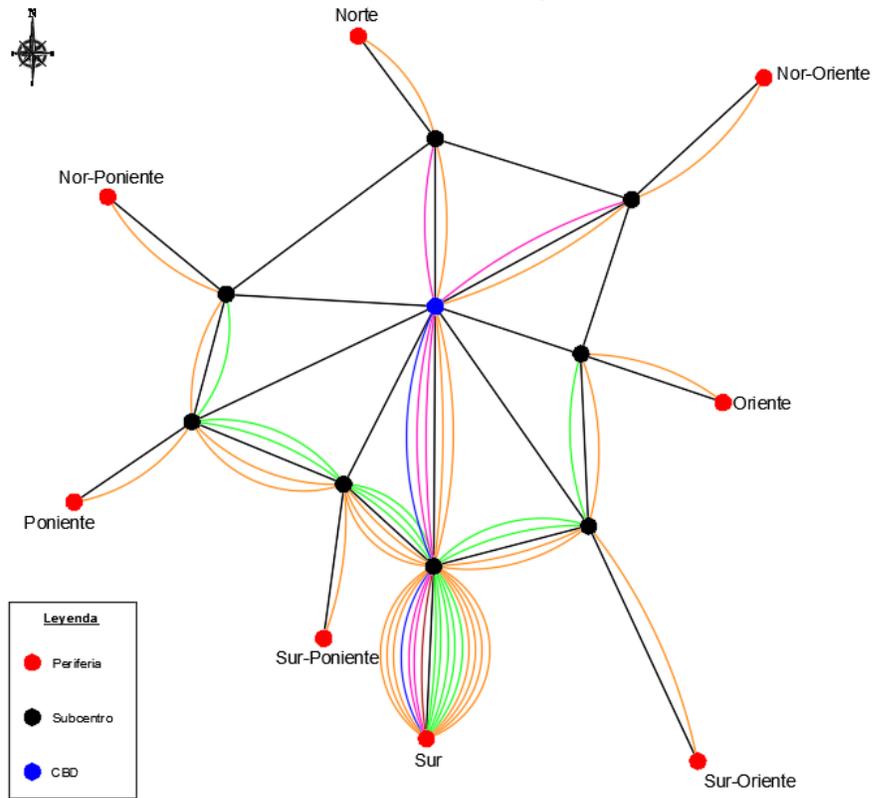


Figura 4.5: Estructura líneas exclusivas, fuera de punta, vista desde el nodo Sur

(Fuente: Elaboración Propia)

4.2.3. Troncal-Alimentador

En esta estructura, los pasajeros de la periferia toman buses alimentadores hasta el subcentro de la misma zona, desde allí hay líneas directas para todos los posibles destinos mediante buses troncales. De esta manera, siguiendo la misma notación de las estructuras anteriores, se tiene un total de 22 líneas:

- 2 que realizan la circunvalación de subcentros (*Circ*). De manera de establecer direcciones, *Circ_{ida}* corresponde a la línea que realiza su recorrido a favor de las manecillas del reloj, mientras que *Circ_{vuelta}* lo hace en sentido contrario.
- 8 líneas que conectan la periferia con el subcentro de cada zona (P_iSC_i).
- 12 que unen los subcentros a través del CBD (SC_iSC_jH). Éstas fueron determinadas con rutas mínimas, es decir, son las que unen los subcentros con menor distancia a través del CBD que a través de la circunvalación. El resultado del proceso de rutas mínimas se encuentra en la Figura 4.6 para cada una de las zonas.

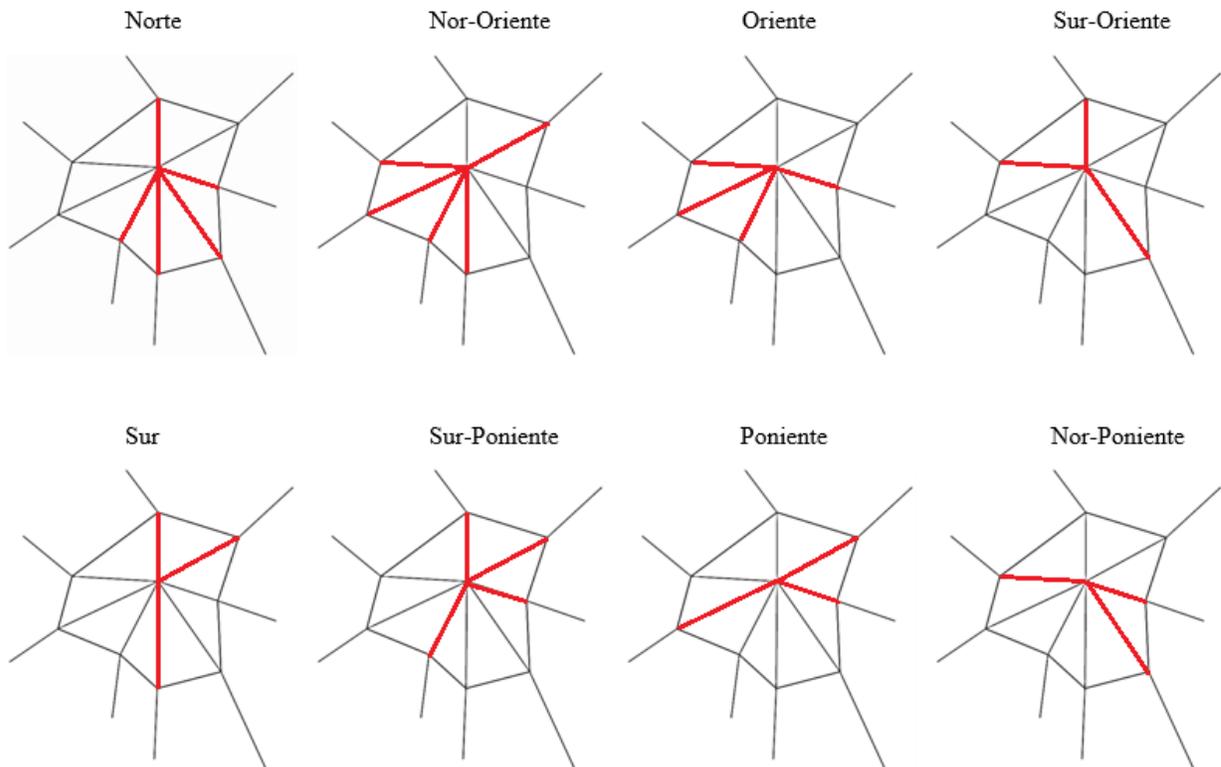


Figura 4.6: Líneas que unen subcentros a través del CBD, 8 nodos

(Fuente: Elaboración Propia)

En la Figura 4.7 se muestra la estructura de troncal alimentador, vista desde el nodo sur, por lo que de las líneas directas que conectan los subcentros a través del CBD, se muestran solo las que salen del nodo sur. Luego, en la Tabla 4.3 se muestra la asignación de pasajeros a líneas, donde el símbolo + indica que el usuario requiere transbordar para tomar otra línea. En cuanto al cálculo del número de transbordos, éste se puede obtener directamente de la demanda y con la tabla de asignación de pasajeros, sumando la cantidad de pasajeros que realiza cada tipo de viaje multiplicado por el número de transbordos en cada caso. Definido esto, ya es posible optimizar las frecuencias de esta estructura para cada periodo.

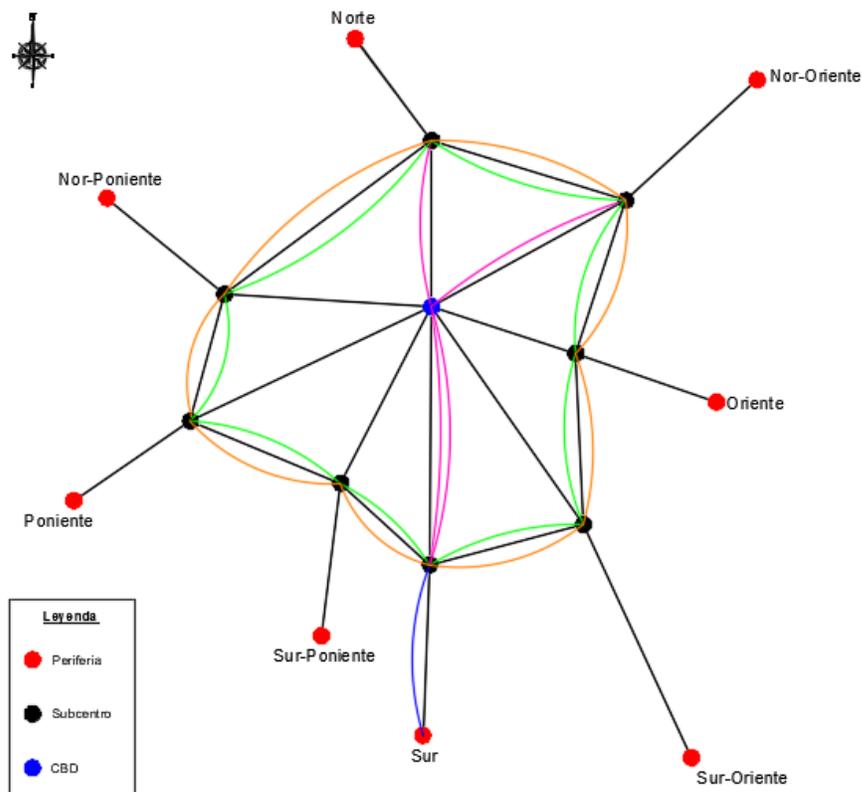


Figura 4.7: Estructura troncal-alimentador, vista desde el nodo Sur

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 4.3: Asignación de pasajeros a líneas, troncal – alimentador

Tipo de viaje	Línea a utilizar
Periferia – subcentro propio	P_iSC_i
Subcentro – periferia propia (*)	P_iSC_i
Periferia – subcentro H	$P_iSC_i + SC_iSC_jH$
Periferia – subcentro F	$P_iSC_i + Circ$
Subcentro – periferia H (*)	$SC_iSC_jH + P_iSC_i$
Subcentro – periferia F (*)	$Circ + P_iSC_i$
Periferia – CBD	$P_iSC_i + SC_iSC_jH (**)$
CBD – Periferia (*)	$SC_iSC_jH (**)+ P_iSC_i$
Subcentro – CBD	$SC_iSC_jH (**)$
CBD – subcentro	$SC_iSC_jH (**)$
Subcentro – subcentro H	SC_iSC_jH
Subcentro – subcentro F	$Circ$
Periferia – periferia H (*)	$P_iSC_i + SC_iSC_jH + P_jSC_j$
Periferia – periferia F (*)	$P_iSC_i + Circ + P_jSC_j$

(*) Son viajes asignables solo en el periodo fuera de punta.

(**) Requiere asignación utilizando líneas comunes, lo que afecta el tiempo de espera.

(Fuente: Elaboración Propia)

4.2.4. Hub&Spoke

En esta estructura, basada en transbordos al igual que la anterior, el CBD se convierte en el punto más relevante de transbordo, debido a que la mayoría de los viajes transbordan en el CBD para abordar una segunda línea y llegar a destino. No es un hub&spoke puro, ya que existen las líneas circulares que recorren el anillo de subcentros, por lo que van a existir transbordos en los subcentros cuando sea conveniente.

En este caso hay un total de 18 líneas inicialmente, de las cuales al momento de optimizar las frecuencias pueden quedar algunas de ellas con frecuencia cero, quitándose de la estructura final de hub&spoke. A continuación, se describen los tres tipos de líneas:

- 2 que realizan la circunvalación de subcentros (*Circ*). De manera de establecer direcciones, *Circ_{ida}* corresponde a la línea que realiza su recorrido a favor de las manecillas del reloj, mientras que *Circ_{vuelta}* lo hace en sentido contrario.
- 8 que conectan el CBD con cada uno de los subcentros (*CBDSC_i*).
- 8 que conectan la periferia con el subcentro opuesto (*P_iSC_{-i}*). El subcentro opuesto es aquel que necesita recorrer 3 subcentros por la circunvalación para llegar a él.

En la Figura 4.8 se muestra la estructura inicial desde el nodo sur, donde tanto para punta mañana como para fuera de punta cuenta con 18 líneas, pero al momento de optimizar las frecuencias pueden resultar distintos números de líneas para cada periodo.

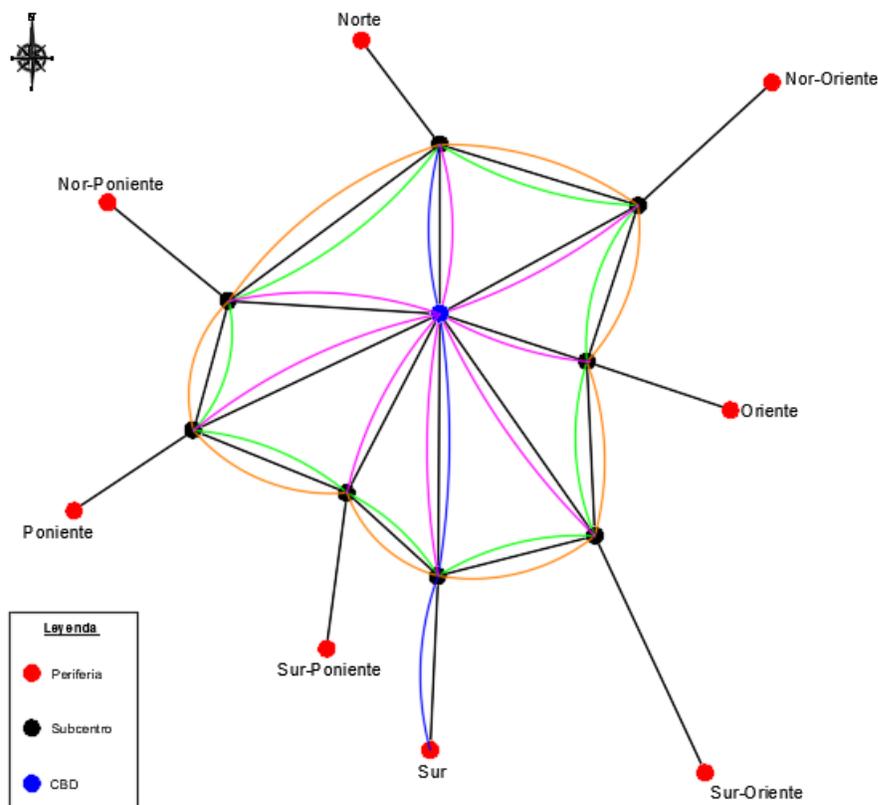


Figura 4.8: Estructura hub&spoke, vista desde el nodo Sur

(Fuente: Elaboración Propia)

Luego, en la Tabla 4.4 se muestra la asignación de pasajeros a líneas, donde el símbolo + representa un transbordo. El número total de transbordos se calcula de la misma manera que en el caso anterior. Con esto es posible optimizar las frecuencias, teniendo en cuenta las ecuaciones, parámetros y supuestos presentados en la sección anterior.

Tabla 4.4: Asignación de pasajeros a líneas, hub&spoke

Tipo de viaje	Línea a utilizar
Periferia – subcentro propio	P_iSC_{-i}
Periferia – subcentro opuesto	P_iSC_{-i}
Subcentro – periferia propia (*)	P_iSC_{-i}
Periferia – subcentro H	$P_iSC_{-i} + (CB DSC_j, P_jSC_{-j}, P_hSC_{-h}) (**)$
Periferia – subcentro F	$P_iSC_{-i} + Circ$
Subcentro – periferia opuesta (*)	P_iSC_{-i}
Subcentro – periferia H (*)	$(CB DSC_j, P_iSC_{-i}, P_jSC_{-j}) (**)+ P_hSC_{-h}$
Subcentro – periferia F (*)	$Circ + P_iSC_{-i}$
Periferia – CBD	P_iSC_{-i}
CBD – Periferia (*)	P_iSC_{-i}
Subcentro – CBD	$(CB DSC_j, P_iSC_{-i}, P_jSC_{-j}) (**)$
CBD – subcentro	$(CB DSC_j, P_iSC_{-i}, P_jSC_{-j}) (**)$
Subcentro – subcentro opuesto	$(P_iSC_{-i}, P_jSC_{-j}) (**)$
Subcentro – subcentro H	$(CB DSC_j, P_iSC_{-i}, P_jSC_{-j}) (**)+ (CB DSC_j, P_jSC_{-j}, P_hSC_{-h}) (**)$
Subcentro – subcentro F	$Circ$
Periferia – periferia opuesta (*)	$P_iSC_{-i} + P_jSC_{-j}$
Periferia – periferia H (*)	$P_iSC_{-i} + P_jSC_{-j}$
Periferia – periferia F (*)	$P_iSC_{-i} + Circ + P_jSC_{-j}$

(*) Son viajes asignables solo en el periodo fuera de punta.

(**) Requiere asignación utilizando líneas comunes, lo que afecta el tiempo de espera.

(Fuente: Elaboración Propia)

4.3. Síntesis

En el presente capítulo se describen los elementos necesarios para poder optimizar el sistema de transporte público, es decir, se establece el problema de optimización con los supuestos y datos utilizados, además de describir las estructuras de líneas con la tipología de líneas que tiene cada una, así como también la asignación de pasajeros a servicios, donde en algunos casos se tienen líneas comunes.

En primer lugar, se define la función objetivo que se busca minimizar, la cual está compuesta por los costos de operación y de compra de los buses, además de los tiempos de espera, de viaje y costos por transbordo. Uno de los supuestos más relevantes es que se asume que los buses operan a intervalos regulares, por lo que el tiempo promedio por pasajero es igual a un medio del intervalo que tenga el bus que va a tomar o los buses en caso de las líneas comunes. Además, se definen los valores de los parámetros como los tiempos de subida y bajada, los valores del tiempo de espera, de viaje, el costo por transbordo y los costos asociados a las funciones de costo de los buses.

Luego, se describen las cuatro estructuras de líneas que se utilizan en el análisis: directas, exclusivas, troncal-alimentador y hub&spoke. Para cada una de las estructuras se presentan las líneas que las componen inicialmente, así como también las líneas que toman los pasajeros de cada tipo de viaje. Además, para algunos casos algunas de las líneas que se proponen inicialmente tendrán frecuencia cero al optimizar las frecuencias, por lo que la cantidad de líneas resultantes siempre es menor o igual que las líneas iniciales.

Con lo anterior, se tienen todos los recursos para optimizar el sistema de transporte público dada una de las cuatro estructuras de líneas y la demanda de alguno de los dos periodos, ya que se tiene la geometría y demanda de la ciudad, así como también planteado el problema de optimización y las estructuras de líneas definidas. El paso siguiente es encontrar las frecuencias óptimas para ambos periodos utilizando cada una de las estructuras de líneas, de esta manera se logra saber cuál estructura es mejor para cada periodo y así poder adaptar las líneas para el otro periodo.

Capítulo 5 : Resultados Dos Periodos

Una vez definidas las estructuras topológicas y de demanda para la ciudad de Santiago, junto con la descripción del problema de optimización, los supuestos, valores de parámetros y las cuatro estructuras de líneas que se utilizan en este trabajo, es posible optimizar el sistema de transporte público. En este capítulo se presentan los resultados de optimizar las frecuencias de las cuatro estructuras de líneas descritas anteriormente, para cada periodo por separado. Esto, considerando las estructuras topológicas y de demanda mostradas en el Capítulo 3 y las estructuras de líneas mostradas en el Capítulo 4.

Además, debido a que en Gschwender et al. (2016) y en Fielbaum et al. (2016) se muestra que el valor de la penalidad por transbordo juega un rol importante a la hora de saber qué estructura de línea posee un menor costo, se muestra un análisis de sensibilidad del costo por transbordo para cada periodo.

Por otro lado, debido a los supuestos realizados para el cálculo del tiempo de espera promedio, se realizan análisis de sensibilidad levantando el supuesto de que cada arco representa una sola calle, considerando el número representativo para Santiago, además de levantar el supuesto de que el tiempo de espera corresponde a la mitad del intervalo de llegada de los buses, lo cual no ocurre en Santiago, generando otro análisis de sensibilidad del modelo.

5.1. Resultados Punta Mañana

De acuerdo a la estructura de demanda presentada anteriormente para el periodo punta mañana, se optimiza el valor de los recursos consumidos (VRC), el cual corresponde a la suma del costo de los usuarios y de los operadores, con el fin de encontrar las frecuencias óptimas de cada estructura de líneas. En esta sección se presentan los resultados para cada estructura de líneas, donde se puede ver el tiempo de espera y de viaje promedio, los costos de los operadores, costo total, etc.

5.1.1. Líneas Directas

Con lo presentado en la sección 4.1, respecto a las ecuaciones necesarias para optimizar las frecuencias y la asignación de pasajeros a líneas en la estructura directa, se tienen los resultados del proceso de minimización de VRC. En la Tabla 5.1 se muestran los resultados generales del proceso de optimización, donde se tiene el total de pasajeros transportados en el periodo, la cantidad de líneas iniciales y resultantes, la cantidad de buses necesarios para operar, el costo de operadores (costos de operación más costos de capital) y el costo de los usuarios. Además, el tiempo de espera y de viaje promedio, la carga promedio, que corresponde al tamaño de embarque calculado como el promedio ponderado por la frecuencia, la frecuencia promedio, la cantidad de plazas (calculado como la sumatoria del producto entre la flota y el tamaño de embarque) y el costo total, que corresponde a la suma del costo de operadores más el de los usuarios.

Luego, en la Tabla 5.2 se tienen indicadores resumen por línea, es decir, se tiene el promedio simple, el mínimo y el máximo entre todas las líneas resultantes. De izquierda a derecha, se muestra la flota, el tamaño de embarque, la frecuencia y la cantidad de pasajeros que abordan el servicio en una hora (afluencia). En la Tabla A.1, en el anexo A, se muestra el detalle por línea de estos

valores, donde se puede ver que el máximo tamaño de embarque en punta mañana es de 127 pasajeros aproximadamente.

Tabla 5.1: Resultados generales líneas directas, punta mañana

Parámetro	Valor
Pasajeros [pax/h]	317,635
Líneas iniciales	108
Líneas resultantes	79
Flota [buses]	8,458
Costo operadores [US\$/periodo]	452,599
Costo pasajeros [US\$/periodo]	2,455,936
Tiempo de espera promedio [s]	12
Tiempo de viaje promedio [min]	36
Carga máxima promedio [pax/bus]	40
Frecuencia promedio [bus/h]	67
Plazas [asientos]	376,752
Costo operadores y usuarios [US\$/periodo]	2,908,535

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 5.2: Indicadores resumen por línea, líneas directas, punta mañana

Indicador	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
Promedio	107.0	44.5	66.7	4,020
Mínimo	10.0	7.3	6.4	175
Máximo	568.0	126.9	317.0	20,776

(Fuente: Elaboración Propia)

Respecto a las líneas resultantes de la modelación, se tiene que las líneas que obtienen frecuencias nulas en el proceso de optimización son las que se muestran en la Tabla 5.3. Donde se puede ver que las líneas que realizan servicios dentro de una misma macrozona no resultan óptimas en el proceso de modelación.

Tabla 5.3: Líneas con frecuencia cero, líneas directas, punta mañana

Tipo de Línea	Abreviatura	Origen	Destino
Periferia – subcentro propio	P_iSC_i	Todas las zonas	Todas las zonas
Periferia – otro subcentro	P_iSC_j	Nor-Oriente Poniente	Oriente Sur-Poniente
Periferia - CBD	P_iCBD	Nor-Oriente	CBD
Subcentro - CBD	SC_iCBD	Nor-Oriente Nor-Poniente Sur Sur-Poniente	CBD

Tipo de Línea	Abreviatura	Origen	Destino
Subcentro – otro subcentro	SC_iSC_j	Nor-Oriente	Oriente
		Nor-Oriente	Sur-Poniente
		Nor-Poniente	Norte
		Nor-Poniente	Oriente
		Nor-Poniente	Sur-Poniente
		Norte	Poniente
		Norte	Sur
		Oriente	Poniente
		Oriente	Sur
		Oriente	Sur-Oriente
		Poniente	Sur-Poniente
		Sur	Sur-Oriente
		Sur	Sur-Poniente
Sur-Oriente	Sur-Poniente		

(Fuente: Elaboración Propia)

5.1.2. Líneas Exclusivas

Con respecto a las líneas exclusivas, en la Tabla 5.4 se muestran los valores de los mismos parámetros que para la estructura anterior. Se puede ver que la flota necesaria es menor que en el caso de las líneas directas, mientras que la carga promedio ponderada por la frecuencia son similares.

Tabla 5.4: Resultados generales líneas exclusivas, punta mañana

Parámetro	Valor
Pasajeros [pax/h]	317,635
Líneas iniciales	108
Líneas resultantes	108
Flota [buses]	7,975
Costo operadores [US\$/periodo]	420,541
Costo pasajeros [US\$/periodo]	2,431,828
Tiempo de espera promedio [s]	22
Tiempo de viaje promedio [min]	36
Carga máxima promedio [pax/bus]	40
Frecuencia promedio [bus/h]	63
Plazas [asientos]	348,736
Costo operadores y usuarios [US\$/periodo]	2,852,369

(Fuente: Elaboración Propia)

En la Tabla 5.5, se tienen los indicadores resumen de cada una de las líneas exclusivas, cuyo detalle se muestra en la Tabla A.2 en los anexos. Se puede ver que el par origen destino con mayor demanda es entre la periferia del Sur-Oriente y el CBD.

Tabla 5.5: Indicadores resumen por línea, líneas exclusivas, punta mañana

Indicador	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
Promedio	73.8	33.0	63.2	2,941
Mínimo	9.1	7.9	4.4	35
Máximo	414.1	77.4	332.1	21,286

(Fuente: Elaboración Propia)

5.1.3. Troncal – Alimentador

Para el caso del troncal – alimentador, se tiene que la Tabla 5.6 contiene los resultados generales para esta estructura, donde se le añade el valor del total de transbordos que se realizan en una hora además de los parámetros ya explicados. De aquí se puede notar que existen 0.43 transbordos por pasajero.

Tabla 5.6: Resultados generales troncal-alimentador, punta mañana

Parámetro	Valor
Pasajeros [pax/h]	317,635
Líneas iniciales	22
Líneas resultantes	22
Flota [buses]	8,482
Costo operadores [US\$/periodo]	525,087
Costo pasajeros [US\$/periodo]	2,771,618
Tiempo de espera promedio [s]	8
Tiempo de viaje promedio [min]	36
Total transbordos	136,033
Carga máxima promedio [pax/bus]	48
Frecuencia promedio [bus/h]	289
Plazas [asientos]	452,814
Costo operadores y usuarios [US\$/periodo]	3,296,705

(Fuente: Elaboración Propia)

Luego, en la Tabla 5.7 se muestra el resumen de indicadores de todas las líneas que componen la estructura de troncal-alimentador, cuyo detalle se encuentra en la Tabla A.3. Además, en la Tabla 5.8 se muestran los mismos indicadores, pero considerando sólo las líneas de buses alimentadores, es decir los que realizan el recorrido desde la periferia hasta el subcentro de la misma zona. Mientras que en la Tabla 5.9 se muestran los indicadores de las líneas troncales, es decir, las que conectan los subcentros a través del CBD más las líneas que recorren el anillo de subcentros. De estas tablas se puede notar que las frecuencias de los buses alimentadores son mayores, llevando menos pasajeros por bus. Además, la flota es mayor para los buses troncales, que llevan mayor cantidad de pasajeros por hora en promedio.

Tabla 5.7: Indicadores resumen por línea, troncal-alimentador, punta mañana

Indicador	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
Promedio	385.5	51.8	288.8	20,621
Mínimo	42.6	34.2	35.6	3,920
Máximo	1586.1	122.8	766.2	54,519

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 5.8: Indicadores resumen por línea, buses alimentadores, punta mañana

Indicador	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
Promedio	276.4	42.7	429.5	19,373
Mínimo	86.3	36.1	133.4	4,826
Máximo	718.6	58.3	766.2	44,704

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 5.9: Indicadores resumen por línea, buses troncales, punta mañana

Indicador	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
Promedio	447.9	57.0	208.4	21,335
Mínimo	42.6	34.2	35.6	3,920
Máximo	1586.1	122.8	625.0	54,519

(Fuente: Elaboración Propia)

5.1.4. Hub&Spoke

Finalmente, en la Tabla 5.10 se muestran los resultados correspondientes a la optimización de frecuencias de la estructura hub&spoke. De esta tabla se puede ver que la cantidad de transbordos que se realizan en una hora es menor que para la estructura de troncal-alimentador, teniendo una cantidad de 0.28 transbordos por pasajero.

Tabla 5.10: Resultados generales hub&spoke, punta mañana

Parámetro	Valor
Pasajeros [pax/h]	317,635
Líneas iniciales	18
Líneas resultantes	12
Flota [buses]	8,714
Costo operadores [US\$/periodo]	595,915
Costo pasajeros [US\$/periodo]	2,656,416
Tiempo de espera promedio [s]	6
Tiempo de viaje promedio [min]	36
Total transbordos	89,323
Carga máxima promedio [pax/bus]	57
Frecuencia promedio [bus/h]	305
Plazas [asientos]	524,639
Costo operadores y usuarios [US\$/periodo]	3,252,331

(Fuente: Elaboración Propia)

Con respecto a los indicadores por línea, se tienen en la Tabla 5.11, cuyo detalle por línea se encuentra en el anexo A en la Tabla A.4, donde se puede ver cuál línea es la que tiene mayor frecuencia de buses o cuál necesita una mayor cantidad de buses para operar.

Tabla 5.11: Indicadores resumen por línea, hub&spoke, punta mañana

Indicador	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
Promedio	726.2	52.8	305.1	33,913
Mínimo	14.0	11.7	23.7	552
Máximo	1657.4	79.5	562.5	65,415

(Fuente: Elaboración Propia)

Las líneas que durante el proceso de optimización obtuvieron frecuencia nula se muestran en la Tabla 5.12, donde se puede ver que todas las líneas que no forman parte de la estructura de líneas resultante son del tipo CBD – subcentro.

Tabla 5.12: Líneas con frecuencia cero, hub&spoke, punta mañana

Tipo de Línea	Abreviatura	Origen	Destino
CBD - Subcentro	$CBDSC_i$	CBD	Nor-Poniente
			Oriente
			Poniente
			Sur
			Sur-Oriente
			Sur-Poniente

(Fuente: Elaboración Propia)

Finalmente, en punta mañana la estructura que presenta menor costo de operadores y usuarios son las líneas exclusivas.

5.2. Resultados Fuera de Punta

En esta sección se presentan los resultados de optimizar las frecuencias de las cuatro estructuras de líneas, utilizando la estructura topológica de Santiago y la demanda para el periodo fuera de punta. Los resultados se presentan de manera análoga a lo realizado anteriormente con el periodo punta mañana.

5.2.1. Líneas Directas

En la Tabla 5.13 se muestran los resultados generales para la estructura de líneas directas, donde se encuentran los mismos parámetros que en las tablas presentadas para el periodo punta mañana. Se puede apreciar que, con respecto al otro periodo, las frecuencias y tamaños de embarque promedio son menores.

Tabla 5.13: Resultados generales líneas directas, fuera de punta

Parámetro	Valor
Pasajeros [pax/h]	120,214
Líneas iniciales	136
Líneas resultantes	74
Flota [buses]	3,395
Costo operadores [US\$/periodo]	281,333
Costo pasajeros [US\$/periodo]	2,187,617
Tiempo de espera promedio [s]	19
Tiempo de viaje promedio [min]	33
Carga máxima promedio [pax/bus]	25
Frecuencia promedio [bus/h]	26
Plazas [asientos]	98,666
Costo operadores y usuarios [US\$/periodo]	2,468,950

(Fuente: Elaboración Propia)

Por otro lado, en la Tabla 5.14 se muestran los indicadores resumen de las líneas resultantes para esta estructura. El detalle de la flota, tamaño de embarque, frecuencia y pasajeros transportados por línea se presentan en la Tabla A.5, donde se puede ver que existen líneas con buses llevando a 4 pasajeros aproximadamente.

Tabla 5.14: Indicadores resumen por línea, líneas directas, fuera de punta

Indicador	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
Promedio	45.8	26.3	26.2	1620.1
Mínimo	0.9	3.9	0.8	18.7
Máximo	208.9	61.0	108.1	6901.7

(Fuente: Elaboración Propia)

Con respecto a las líneas que no son consideradas en la estructura final, se tienen que las líneas presentadas en la Tabla 5.15 obtuvieron frecuencia cero en el proceso de optimización.

Tabla 5.15: Líneas con frecuencia cero, líneas directas, fuera de punta

Tipo de Línea	Abreviatura	Origen	Destino
Periferia – subcentro propio	P_iSC_i	Todas las zonas	Todas las zonas
		Nor-Oriente	Oriente
		Nor-Oriente	Sur-Poniente
		Nor-Poniente	Norte
Subcentro – otro subcentro	SC_iSC_j	Nor-Poniente	Sur-Poniente
		Norte	Sur-Poniente
		Poniente	Sur-Poniente
		Sur	Sur-Poniente
		Sur-Oriente	Sur-Poniente

Tipo de Línea	Abreviatura	Origen	Destino
Periferia – otro subcentro	P_iSC_j	Nor-Oriente	Nor-Poniente
		Nor-Oriente	Norte
		Nor-Oriente	Oriente
		Nor-Oriente	Poniente
		Nor-Oriente	Sur
		Nor-Oriente	Sur-Poniente
		Nor-Poniente	Norte
		Nor-Poniente	Sur
		Nor-Poniente	Sur-Oriente
		Nor-Poniente	Sur-Poniente
		Norte	Oriente
		Norte	Poniente
		Norte	Sur
		Norte	Sur-Oriente
		Norte	Sur-Poniente
		Oriente	Nor-Poniente
		Oriente	Norte
		Oriente	Poniente
		Oriente	Sur
		Oriente	Sur-Oriente
		Oriente	Sur-Poniente
		Poniente	Norte
		Poniente	Oriente
		Poniente	Sur-Oriente
		Poniente	Sur-Poniente
		Sur	Nor-Poniente
		Sur	Norte
		Sur	Sur-Poniente
		Sur-Oriente	Nor-Poniente
		Sur-Oriente	Norte
		Sur-Oriente	Oriente
		Sur-Oriente	Poniente
Sur-Oriente	Sur		
Sur-Oriente	Sur-Poniente		
Sur-Poniente	Nor-Poniente		
Sur-Poniente	Norte		
Sur-Poniente	Oriente		
Sur-Poniente	Poniente		
Sur-Poniente	Sur		
Periferia - CBD	P_iCBD	Nor-Oriente	CBD
		Norte	
		Oriente	
		Poniente	
Subcentro - CBD	SC_iCBD	Sur	CBD
		Norte	
		Oriente	

(Fuente: Elaboración Propia)

5.2.2. Líneas Exclusivas

En cuanto a las líneas exclusivas, los resultados generales se muestran en la Tabla 5.16, donde se puede ver que la flota necesaria para operar este periodo es aproximadamente la mitad de la necesaria para operar en punta mañana.

Tabla 5.16: Resultados generales líneas exclusivas, fuera de punta

Parámetro	Valor
Pasajeros [pax/h]	120,214
Líneas iniciales	136
Líneas resultantes	136
Flota [buses]	4,279
Costo operadores [US\$/periodo]	267,743
Costo pasajeros [US\$/periodo]	1,998,834
Tiempo de espera promedio [s]	39
Tiempo de viaje promedio [min]	29
Carga máxima promedio [pax/bus]	19
Frecuencia promedio [bus/h]	31
Plazas [asientos]	81,500
Costo operadores y usuarios [US\$/periodo]	2,266,577

(Fuente: Elaboración Propia)

Ahora bien, los indicadores resumen por línea de esta estructura se muestran en la Tabla 5.17, cuyo detalle se encuentra en la Tabla A.6, donde se puede ver, por ejemplo, que la línea que conecta el subcentro del Nor-Poniente con el subcentro del Sur-Poniente opera con menos de 3 pasajeros por bus en promedio.

Tabla 5.17: Indicadores resumen por línea, líneas exclusivas, fuera de punta

Indicador	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
Promedio	31.8	13.1	31.3	911
Mínimo	6.3	2.8	4.5	30
Máximo	153.0	46.2	207.1	10,689

(Fuente: Elaboración Propia)

5.2.3. Troncal – Alimentador

Con respecto a la estructura troncal-alimentador, se presentan los resultados generales en la Tabla 5.18, donde se puede ver que la frecuencia promedio es mucho más elevada que la de las dos estructuras anteriores para este periodo.

En la Tabla 5.19 se muestran los indicadores resumen por línea, tanto para troncales como para alimentadores. Luego, en la Tabla 5.20 se muestran los resultados para las líneas de buses alimentadores y en la Tabla 5.21 para las líneas troncales. El detalle de cada línea se puede ver en

el anexo A, en la Tabla A.7, donde se puede ver que los buses alimentadores llevan mayor cantidad de pasajeros en promedio comparado con los troncales, al contrario de lo sucedido en el periodo punta mañana. Respecto a los transbordos se tienen 0.41 transbordos por persona, un valor similar a lo encontrado en punta mañana, debido que en este periodo hay pasajeros que realizan dos transbordos por viaje.

Tabla 5.18: Resultados generales troncal-alimentador, fuera de punta

Parámetro	Valor
Pasajeros [pax/h]	120,214
Líneas iniciales	22
Líneas resultantes	22
Flota [buses]	3,291
Costo operadores [US\$/periodo]	310,828
Costo pasajeros [US\$/periodo]	2,491,913
Tiempo de espera promedio [s]	16
Tiempo de viaje promedio [min]	32
Total transbordos	49,764
Carga máxima promedio [pax/bus]	31
Frecuencia promedio [bus/h]	119
Plazas [asientos]	114,873
Costo operadores y usuarios [US\$/periodo]	2,802,741

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 5.19: Indicadores resumen por línea, troncal-alimentador, fuera de punta

Indicador	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
Promedio	149.6	33.1	118.7	7,726
Mínimo	23.8	20.8	20.2	1,821
Máximo	493.3	51.6	242.2	17,419

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 5.20: Indicadores resumen por línea, buses alimentadores, fuera de punta

Indicador	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
Promedio	116.3	27.3	186.9	8,008
Mínimo	78.7	20.8	140.4	4,699
Máximo	225.1	41.9	242.2	13,672

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 5.21: Indicadores resumen por línea, buses troncales, fuera de punta

Indicador	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
Promedio	168.6	36.3	79.6	7,566
Mínimo	23.8	27.5	20.2	1,821
Máximo	493.3	51.6	224.1	17,419

(Fuente: Elaboración Propia)

5.2.4. Hub&Spoke

En la Tabla 5.22 se muestran los resultados generales para la estructura de hub&spoke, donde se puede ver que, de las 18 líneas consideradas en el diseño inicial, solo 11 obtuvieron frecuencias positivas. Además, presenta los tiempos de espera más bajos entre todas las estructuras en fuera de punta. En cuanto a los transbordos, se tiene un valor de 0.16 transbordos por pasajero lo cual es menor a lo obtenido en punta mañana.

Tabla 5.22: Resultados generales hub&spoke, fuera de punta

Parámetro	Valor
Pasajeros [pax/h]	120,214
Líneas iniciales	18
Líneas resultantes	11
Flota [buses]	3,385
Costo operadores [US\$/periodo]	354,069
Costo pasajeros [US\$/periodo]	2,295,416
Tiempo de espera promedio [s]	14
Tiempo de viaje promedio [min]	32
Total transbordos	19,705
Carga máxima promedio [pax/bus]	38
Frecuencia promedio [bus/h]	128
Plazas [asientos]	135,245
Costo operadores y usuarios [US\$/periodo]	2,649,485

(Fuente: Elaboración Propia)

Luego, en la Tabla 5.23 se presentan los indicadores resumen por línea, cuyo detalle se encuentra en la Tabla A.8, en anexos. En el detalle por servicio se puede notar que la línea que requiere menor cantidad de buses para operar es la que conecta el CBD con el subcentro del Nor-Oriente, cuya frecuencia es de 125 buses por hora aproximadamente.

Tabla 5.23: Indicadores resumen por línea, hub&spoke, fuera de punta

Indicador	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
Promedio	307.7	38.0	127.8	13,454
Mínimo	100.2	24.8	77.1	5,726
Máximo	496.8	56.9	194.9	19,857

(Fuente: Elaboración Propia)

En la Tabla 5.24 se tienen las 7 líneas que presentan frecuencia nula luego del proceso de optimización de VRC, las cuales corresponden al tipo CBD – subcentro.

Tabla 5.24: Líneas con frecuencia cero, hub&spoke, fuera de punta

Tipo de Línea	Abreviatura	Origen	Destino
CBD - Subcentro	$CBDSC_i$	CBD	Nor-Poniente
			Norte
			Oriente
			Poniente
			Sur
			Sur-Oriente
			Sur-Poniente

(Fuente: Elaboración Propia)

Finalmente, la estructura que presenta menor costo de operadores y usuarios son las líneas exclusivas, al igual que para el periodo punta mañana.

5.3. Análisis de Sensibilidad Costo por Transbordo

En esta sección se realiza un análisis de sensibilidad del parámetro asociado a la penalidad por transbordo, teniendo en cuenta que no se ha llegado a un consenso claro respecto al valor que debiese tener este parámetro al incluirlo en la función de costo de los usuarios.

De acuerdo con Currie (2005) el promedio de la penalidad por transbordo asociado únicamente a la molestia que éste genera, es decir, sin considerar tiempo de caminata ni de espera, es de 22 minutos de tiempo de viaje en el vehículo, siendo el menor valor reportado igual a 2 minutos de tiempo de viaje. Basándose en esto, Gschwender et al. (2016) utilizan un valor de 35.5 minutos de tiempo de viaje en el vehículo, lo que equivale 22 minutos asociados a la molestia más 4.5 minutos de caminata, cada cual se contabiliza como 3 veces el tiempo de viaje en el vehículo. Tomando en cuenta los dos valores anteriores Fielbaum et al. (2016) utilizan para su análisis un valor intermedio entre el mínimo y el máximo valor reportado, es decir, 24 minutos de tiempo de viaje en el vehículo. Un valor intermedio a los mencionados anteriormente es el que obtienen Garcia-Martínez et al. (2018), donde la penalidad por transbordo asociado a la molestia generada es entre 15.2 y 17.7 minutos equivalentes en vehículo.

Es por lo anterior que se optimizan las frecuencias de las cuatro estructuras de líneas para 4 valores distintos de penalidad por transbordo: 0, 12, 24 y 35.5. Los resultados para punta mañana se presentan en la Figura 5.1, mientras que para el periodo fuera de punta se encuentra en la Figura 5.2.

Costo de operadores y usuarios vs valor del transbordo Punta Mañana

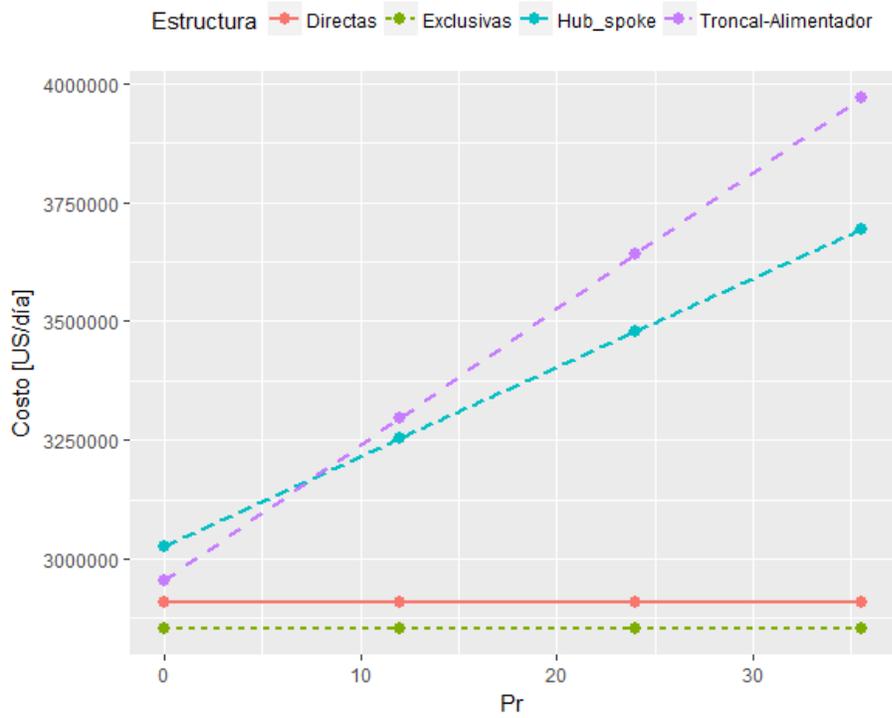


Figura 5.1: Análisis de sensibilidad costo por transbordo, punta mañana

(Fuente: Elaboración Propia)

Costo de operadores y usuarios vs valor del transbordo Fuera de Punta

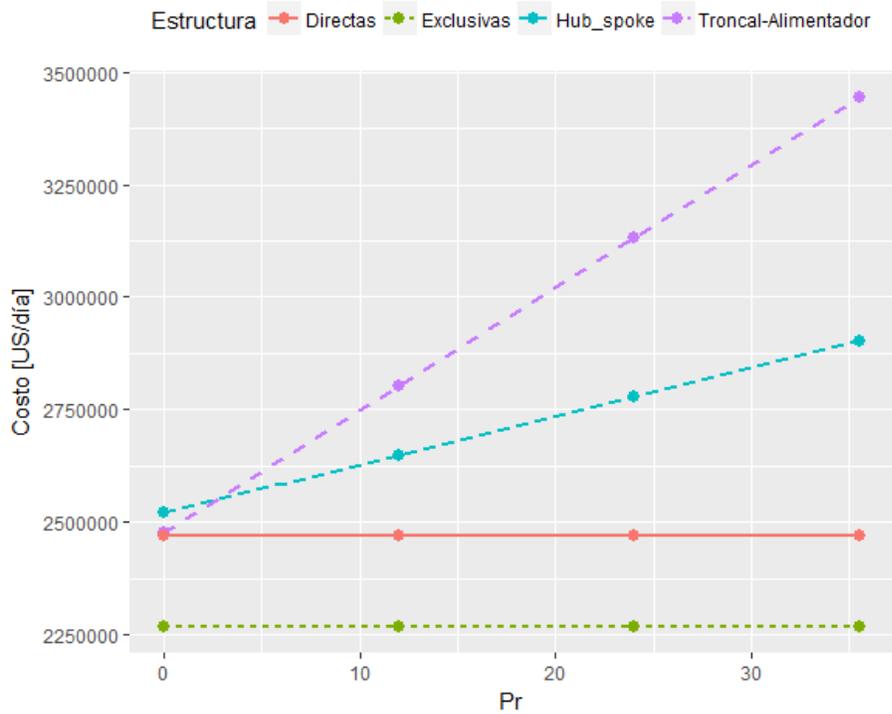


Figura 5.2: Análisis de sensibilidad costo por transbordo, fuera de punta

(Fuente: Elaboración Propia)

De los gráficos anteriores es posible notar que la mejor estructura para cada valor de costo por transbordo son las líneas exclusivas, seguidas por las líneas directas. En cuanto a las estructuras basadas en transbordos, se tiene que cuando el valor de la penalidad por transbordo es 0 el sistema troncal-alimentador es menos costoso que el hub&spoke, mientras que cuando el costo del transbordo es mayor a 12 minutos equivalentes en vehículo, el troncal-alimentador se convierte en la peor estructura tanto para punta mañana como para fuera de punta. Lo anterior se debe a que la estructura de troncal-alimentador presenta una mayor cantidad de transbordos.

Además, de lo anterior se puede notar que, para ambos periodos existe un punto de inflexión donde es indiferente utilizar una estructura hub&spoke o troncal-alimentador. En el caso de punta mañana este punto de inflexión corresponde a $p_r = 8$ minutos equivalentes en vehículo, mientras que, para fuera de punta, el punto de inflexión se tiene cuando la penalidad por transbordo vale 3 minutos equivalentes en vehículo.

5.4. Análisis de Sensibilidad Tiempo de Espera

En la presente sección se muestran los resultados de dos análisis de sensibilidad realizados al levantar supuestos respecto al cálculo del tiempo de espera de los usuarios. Por un lado, se levanta el supuesto de que cada arco representa una gran calle para considerar la cantidad promedio de calles por arco para la representación de Santiago adoptada, es decir, 4 avenidas por arco, según se estimó en la sección 3.3.2. Luego, en adición al supuesto anterior, se levanta el supuesto respecto a la fracción del intervalo de llegada que se considera como tiempo de espera promedio, utilizando el valor real el cual corresponde al 70% del intervalo de llegada en contraste con el 50% supuesto que resulta de considerar que los buses operan de forma regular.

5.4.1. Incluyendo Número de Calles por Arco

Para el siguiente análisis de sensibilidad, se levanta el supuesto de que cada arco representa una gran calle donde circulan los buses y se considera que cada arco representa cuatro avenidas principales en promedio, como se menciona en el Capítulo 3. Con lo anterior, el tiempo de espera se ve modificado debido a que los pasajeros percibirán un cuarto de los buses que recorren cada arco, de esta manera el tiempo de espera es calculado como se muestra en la Ecuación 5.1, donde v es el número de calles por arco.

$$t_e = \frac{1}{2 \cdot \frac{f}{v}} \quad (5.1)$$

Cabe destacar que considerar de la manera anterior el tiempo de espera en la función del valor de recursos consumidos afecta en la relevancia de este costo de usuarios, lo cual es diferente a considerarlo de la manera original y luego las frecuencias resultantes dividir las por la cantidad de calles que representa cada arco, debido a que la frecuencia observada por cada usuario es distinta lo que afecta los tiempos de espera.

Con la modificación anterior, se realiza la optimización del valor de los recursos consumidos (VRC), obteniendo resultados del costo total de cada periodo para las cuatro estructuras de líneas consideradas. En la Tabla 5.25 se muestran los resultados para punta mañana, donde se puede ver que las líneas exclusivas presentan un menor costo total, sin embargo, la diferencia es muy leve

con respecto al costo de las líneas directas. Es notable destacar que el costo de usuarios es mayor para las líneas exclusivas, pero el costo de operadores es menor respecto a las directas.

Tabla 5.25: Resultados tiempo de espera incluyendo número de calles por arco, punta mañana

Parámetro	Directas	Exclusivas	Troncal- Alimentador	Hub&Spoke
Pasajeros [pax/h]	317,635	317,635	317,635	317,635
Líneas iniciales	108	108	22	18
Líneas resultantes	68	108	22	12
Flota [buses]	10,617	12,931	10,346	10,385
Costo operadores [US\$/periodo]	485,412	471,792	544,345	611,306
Costo pasajeros [US\$/periodo]	2,483,175	2,491,667	2,796,430	2,676,555
Tiempo de espera promedio [s]	29	53	23	19
Tiempo de viaje promedio [min]	36	35	36	36
Total transbordos	-	-	136,033	89,323
Carga máxima promedio [pax/bus]	34	24	39	48
Frecuencia promedio [bus/h]	91	103	361	365
Plazas [asientos]	385,866	344,312	451,135	521,157
Costo operadores y usuarios [US\$/periodo]	2,968,587	2,963,459	3,340,775	3,287,861

(Fuente: Elaboración Propia)

Por otro lado, en la Tabla 5.26 se muestran los resultados para el periodo fuera de punta, donde se puede notar que las exclusivas nuevamente presentan el menor costo total, con menores costos de pasajeros y mayores costos de operadores en comparación con las líneas directas, caso contrario a lo sucedido en punta mañana.

Tabla 5.26: Resultados tiempo de espera incluyendo número de calles por arco, fuera de punta

Parámetro	Directas	Exclusivas	Troncal- Alimentador	Hub&Spoke
Pasajeros [pax/h]	120,214	120,214	120,214	120,214
Líneas iniciales	136	136	22	18
Líneas resultantes	73	136	22	11
Flota [buses]	5,048	7,912	4,960	4,895
Costo operadores [US\$/periodo]	327,709	353,792	350,042	387,371
Costo pasajeros [US\$/periodo]	2,231,224	2,089,452	2,535,889	2,338,118
Tiempo de espera promedio [s]	44	82	41	39
Tiempo de viaje promedio [min]	32	29	32	32
Total transbordos	-	-	49,764	19,705
Carga máxima promedio [pax/bus]	18	10	20	26
Frecuencia promedio [bus/h]	36	58	186	187
Plazas [asientos]	101,901	80,405	114,216	133,566
Costo operadores y usuarios [US\$/periodo]	2,558,933	2,443,244	2,885,931	2,725,489

(Fuente: Elaboración Propia)

Como se ve en las tablas anteriores, para todas las estructuras de líneas, las frecuencias promedio obtenidas en este caso son superiores al caso original y la carga máxima es menor, aumentando la flota necesaria para operar. Esto se debe al aumento considerable en el tiempo de espera, lo que lo hace más relevante en la función de VRC. Además, aumenta el valor de los recursos consumidos en todos los casos, debido al aumento en los tiempos de espera y en costos de operación.

Se puede notar también que la estructura que presenta menor costo total en ambos periodos son las líneas exclusivas, al igual que en el caso original. Sin embargo, ahora la diferencia de costos respecto a las líneas directas es mucho menor, debido a que las líneas directas presentan menores tiempos de espera gracias a las líneas comunes, por lo que se ven menos alteradas por el cambio en el cálculo del tiempo de espera.

Comparando las frecuencias de las líneas exclusivas en punta mañana para este caso y el caso original, se tiene que éstas aumentan de 63 a 103 buses por hora, lo que se traduce en 15 y 25 buses por hora-calle aproximadamente. Mientras que la carga máxima promedio disminuye considerablemente de 40 a 24 pasajeros por bus.

5.4.2. Incluyendo Fracción del Intervalo de Llegada Real de Santiago

Otro supuesto que se realiza en relación con el tiempo de espera de los usuarios es que este corresponde a la mitad del intervalo de llegada de los buses. Como se menciona anteriormente, el tiempo de espera en función del intervalo de llegada está medido por el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM), el cual corresponde al 70% del intervalo de llegada en promedio, debido a la irregularidad del servicio. Levantando el supuesto anterior y considerando que cada arco representa v calles en promedio, el tiempo de espera viene dado por la Ecuación 5.2.

$$t_e = \frac{0.7}{\frac{f}{v}} \quad (5.2)$$

Realizando la optimización del valor de los recursos consumidos (VRC), se obtienen resultados del costo total de cada periodo para las cuatro estructuras de líneas consideradas. En la Tabla 5.27 se muestran los resultados para punta mañana, donde se tiene que la estructura con menor costo total son las líneas directas, las cuales presentan menor costo de usuarios y mayores costos de operación en comparación con las exclusivas.

Tabla 5.27: Resultados tiempo de espera incluyendo fracción del intervalo de llegada real de Santiago, punta mañana

Parámetro	Directas	Exclusivas	Troncal- Alimentador	Hub&Spoke
Pasajeros [pax/h]	317,635	317,635	317,635	317,635
Líneas iniciales	108	108	22	18
Líneas resultantes	68	108	22	12
Flota [buses]	11,541	14,880	11,191	10,885
Costo operadores [US\$/periodo]	498,255	492,614	553,292	616,155
Costo pasajeros [US\$/periodo]	2,494,285	2,514,472	2,807,177	2,688,194
Tiempo de espera promedio [s]	35	64	29	25
Tiempo de viaje promedio [min]	36	35	36	36
Total transbordos	-	-	136,033	89,323
Carga máxima promedio [pax/bus]	31	21	36	46
Frecuencia promedio [bus/h]	99	119	393	384
Plazas [asientos]	388,499	343,271	450,595	520,372
Costo operadores y usuarios [US\$/periodo]	2,992,540	3,007,086	3,360,469	3,304,349

(Fuente: Elaboración Propia)

Por otro lado, en la Tabla 5.28 se tienen los resultados para fuera de punta, donde se da un caso diferente al periodo punta, resultando con menor costo las líneas exclusivas. Además, se tiene que el costo de operadores es mayor y el costo de pasajeros es menor en las líneas exclusivas respecto a las directas.

Tabla 5.28: Resultados tiempo de espera incluyendo fracción del intervalo de llegada real de Santiago, fuera de punta

Parámetro	Directas	Exclusivas	Troncal- Alimentador	Hub&Spoke
Pasajeros [pax/h]	120,214	120,214	120,214	120,214
Líneas iniciales	136	136	22	18
Líneas resultantes	73	136	22	11
Flota [buses]	5,794	9,276	5,644	5,625
Costo operadores [US\$/periodo]	347,641	386,496	366,442	404,101
Costo pasajeros [US\$/periodo]	2,246,285	2,122,998	2,553,093	2,352,904
Tiempo de espera promedio [s]	52	98	50	47
Tiempo de viaje promedio [min]	32	29	32	32
Total transbordos	-	-	49,764	19,705
Carga máxima promedio [pax/bus]	16	9	17	22
Frecuencia promedio [bus/h]	41	68	214	216
Plazas [asientos]	102,811	80,195	114,108	133,072
Costo operadores y usuarios [US\$/periodo]	2,593,926	2,509,494	2,919,535	2,757,005

(Fuente: Elaboración Propia)

Comparando los resultados del presente análisis de sensibilidad con los del caso anterior, en este caso se tienen mayores valores de VRC, mayores frecuencias y menores tamaños de embarque promedio. Esto se debe a las mismas razones explicadas anteriormente respecto al aumento en la relevancia del tiempo de espera.

Un caso particular que no se da con otras modelaciones es que la estructura de líneas que presenta menor costo total es distinta para cada periodo (directas para punta mañana y exclusivas para fuera de punta), sin embargo, la diferencia de costos es muy leve en punta mañana. Esto se puede deber a la gran cantidad de pasajeros que viajan en horario punta, resultando mucho más relevante un aumento en el tiempo de espera en la suma global del valor de los recursos consumidos.

El resultado anterior es contradictorio con resultados de investigaciones anteriores (Fielbaum et al. (2016)), donde para demandas mayores son menos costosas las líneas exclusivas. Sin embargo, estos resultados son manteniendo constante la estructura de la demanda, la cual es distinta entre los periodos punta y fuera de punta, donde se tiene que en punta los viajes son más centralizados que en fuera de punta donde se distribuyen más uniformes entre los destinos.

5.5. Síntesis

De acuerdo con lo presentado en secciones anteriores, es posible resumir los resultados para cada periodo. En la Tabla 5.29 se muestra la comparación de diversos parámetros para punta mañana. De esta tabla se puede ver que la estructura de líneas que presenta menor costo total, de los operadores más el de los usuarios son las líneas exclusivas, seguidas por las líneas directas, luego hub&spoke y troncal-alimentador. Además, como se pudo ver en la sección 5.3 la estructura con menor costo se mantiene a pesar del valor del costo por transbordo que se utilice.

Se puede apreciar en la Tabla 5.29 que las líneas exclusivas operan con la menor cantidad de buses en punta mañana, por lo que tienen los menores costos de operadores. Por otro lado, se puede ver que el tiempo de viaje promedio de todas las estructuras se mantiene constante, debido a que lo más relevante en el tiempo de viaje es la distancia recorrida, la cual no varía por estructura.

Luego, para el periodo fuera de punta, se tiene un resumen de los resultados en la Tabla 5.30, donde se puede ver que se repite el orden de las estructuras de líneas con respecto al costo total. Pero, al contrario de lo sucedido en punta mañana, en este periodo las líneas exclusivas son las que necesitan mayor cantidad de buses para operar este periodo. Con respecto a los tiempos de viaje, esta vez sí se diferencia de las demás estructuras, presentando un tiempo de viaje de 3 a 4 minutos menos que otras estructuras en promedio. Además, debido a la naturaleza de las estructuras presentadas, las líneas exclusivas son las que presentan mayores tiempos de espera, ya que no tienen líneas comunes para ningún par origen destino.

Tabla 5.29: Tabla resumen de resultados punta mañana

Parámetro	Directas	Exclusivas	Troncal-Alimentador	Hub&Spoke
Pasajeros [pax/h]	317,635	317,635	317,635	317,635
Líneas iniciales	108	108	22	18
Líneas resultantes	80	108	22	12
Flota [buses]	8,458	7,975	8,482	8,714
Costo operadores [US\$/periodo]	452,599	420,541	525,087	595,915
Costo pasajeros [US\$/periodo]	2,455,936	2,431,828	2,771,618	2,656,416
Tiempo de espera promedio [s]	12	22	8	6
Tiempo de viaje promedio [min]	36	36	36	36
Total transbordos	-	-	136,033	89,323
Carga máxima promedio [pax/bus]	40	40	48	57
Frecuencia promedio [bus/h]	65	63	289	305
Plazas [asientos]	376,752	348,736	452,814	524,639
Costo operadores y usuarios [US\$/periodo]	2,908,535	2,852,369	3,296,705	3,252,331

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 5.30: Tabla resumen de resultados fuera de punta

Parámetro	Directas	Exclusivas	Troncal-Alimentador	Hub&Spoke
Pasajeros [pax/h]	120,214	120,214	120,214	120,214
Líneas iniciales	136	136	22	18
Líneas resultantes	74	136	22	11
Flota [buses]	3,395	4,279	3,291	3,385
Costo operadores [US\$/periodo]	281,333	267,743	310,828	354,069
Costo pasajeros [US\$/periodo]	2,187,617	1,998,834	2,491,913	2,295,416
Tiempo de espera promedio [s]	19	39	16	14
Tiempo de viaje promedio [min]	33	29	32	32
Total transbordos	-	-	49,764	19,705
Carga máxima promedio [pax/bus]	25	19	31	38
Frecuencia promedio [bus/h]	26	31	119	128
Plazas [asientos]	98,680	81,500	114,873	135,245
Costo operadores y usuarios [US\$/periodo]	2,468,950	2,266,577	2,802,741	2,649,485

(Fuente: Elaboración Propia)

Un aspecto relevante para discutir es si los resultados presentados anteriormente son factibles en caso de implementar alguna de las estructuras de líneas en Santiago. En primer lugar, existe una capacidad de las vías y paraderos, la cual se podría superar en el caso de frecuencias cercanas a los 800 buses por hora como en el caso del troncal-alimentador, sin embargo, si se dividen esos 800

buses en las 4 calles por arco en promedio se obtienen frecuencias de 200 buses por hora, lo cual podría superar la capacidad de las vías o haría necesario pistas exclusivas de mayor capacidad. En el caso de la sensibilidad respecto al número de vías por arco, se tiene que las frecuencias aumentan por el hecho de hacer más relevante del tiempo de espera, obteniendo en el caso máximo un valor de 220 buses por hora por calle, lo cual es demasiado elevado para la capacidad de las vías. Por lo tanto, para acercar el resultado a la realidad se debiese establecer un máximo para la frecuencia, viéndose afectadas principalmente las estructuras de troncal-alimentador y hub&spoke.

Por otro lado, los resultados de la Tabla 5.29 muestran en algunos casos tiempos de espera extremadamente bajos, los cuales son imposibles de cumplir, debido a factores externos como los semáforos, que retrasan a los buses por tiempos cercanos a un minuto. Este caso se mejora en el análisis de sensibilidad respecto a las vías por arco, donde se ve aumentado el tiempo de espera promedio de las personas. Lo anterior tendría un impacto en el resultado de la optimización para el primer caso si se aplica una cota mínima para el tiempo de espera, donde las estructuras más afectadas serían las con menores valores de espera como es el caso de todas a excepción de las exclusivas.

Otro aspecto relevante son las frecuencias mínimas, en el caso de las líneas directas existen líneas que operan con frecuencias menores a un bus por hora, lo cual es muy bajo para un servicio de transporte público. Esto se soluciona imponiendo una cota inferior para la frecuencia, viéndose afectadas las líneas del tipo directas principalmente.

Por último, en caso de las líneas exclusivas en fuera de punta dan como resultado buses de tamaño muy pequeño (menor a 3 pasajeros por bus), situación que empeora en los análisis de sensibilidad incluyendo la cantidad de vías por arco, donde se obtienen valores cercanos a 1 pasajero por bus. Esto implica la necesidad de establecer una cota mínima a la carga máxima de los buses, lo que reduciría las frecuencias, viéndose más afectados los resultados de las estructuras directas y exclusivas.

Las restricciones anteriores, de ser aplicadas afectarían al resultado de la optimización influyendo en los resultados de todas las estructuras de líneas en distinta medida, por lo que no hay certeza de que el resultado de la mejor estructura de líneas para ambos períodos cambie.

Respecto a los resultados detallados por línea que se muestran en los anexos, existen líneas cuya carga máxima es grande y la frecuencia pequeña, mientras que hay otras (de la misma estructura) cuya carga máxima es pequeña con frecuencias más grandes. Estos casos tienen una relación con los tiempos de ciclo, donde cuando existen tiempos de ciclo mayores aumentan los tamaños de embarque, disminuyendo las frecuencias.

Finalmente, se tiene que para ambos periodos la estructura de líneas exclusivas presenta un menor costo total, por lo que esta estructura es la que se analiza para la siguiente sección, donde se adapta la flota óptima obtenida para cada periodo para utilizarla en el otro periodo.

Capítulo 6 : Adaptar Flota a Otro Periodo

Luego de haber encontrado las estructuras de líneas estratégicas que minimizan el costo total para ambos periodos por separado, es posible calcular el costo total de un periodo utilizando como base la flota que es óptima para el otro periodo, lo cual se logra adaptando las frecuencias de los recorridos y por tanto sus tamaños de buses. Con lo anterior se comparan los costos totales de ambas formas de diseñar, obteniendo como resultado cuál de las dos presenta menor costo, si diseñar para punta mañana y adaptar para fuera de punta o diseñar para fuera de punta y adaptar para hora punta.

En este capítulo se presenta y aplica la metodología utilizada para adaptar la flota desde un periodo donde es óptima, para utilizarla en el otro periodo. Luego, se realiza un análisis de sensibilidad cambiando las categorías de buses utilizados, la duración de los periodos y la restricción sobre la compra de nuevos buses.

6.1. Metodología para Adaptar Flota

En el capítulo anterior se observa el diseño estratégico de transporte público considerando cada periodo por separado, es decir, no se tiene en cuenta la existencia del otro periodo en el proceso de optimización. En esta sección se describe la metodología para utilizar los resultados anteriores y adaptar la frecuencia y tamaños de buses de un periodo a otro; de esta manera se calculan nuevos costos totales, pero esta vez los costos son diarios (suma de los costos de ambos periodos, uno óptimo y el otro adaptado).

En primer lugar, se define el proceso de adaptar la flota (número y tamaño de buses), el cual consiste en utilizar la flota óptima de un periodo, modificando las frecuencias y tamaños de embarque de las líneas del otro periodo de manera de utilizar los buses ya comprados. En este caso se mantiene la estructura de líneas en ambos periodos, debido a que la misma estructura posee el menor costo para punta mañana y fuera de punta¹.

Lo primero que se debe hacer para adaptar la flota es establecer la categoría de buses con las que se trabajará. En este caso, se utilizan los mismos tipos de bus con los que opera actualmente Transantiago, es decir se utilizan los siguientes buses:

- Buses chicos: hasta 50 pasajeros (buses de 9 metros).
- Buses medianos: hasta 90 pasajeros (buses de 12 metros).
- Buses grandes: hasta 160 pasajeros (buses articulados de 18 metros).

De acuerdo con los tipos de buses mostrados anteriormente, se debe clasificar la flota resultante del proceso de optimización de cada periodo por separado, con el fin de saber con cuántos buses de cada tipo se cuenta para adaptar la flota. En la Tabla 6.1 se muestra la cantidad de buses de cada tipo de la estructura de líneas exclusivas, para punta mañana y fuera de punta, la cual se obtuvo de clasificar la carga máxima de cada línea (mostrada en el Anexo A) en los tipos de buses

¹ En el caso de que hubiesen dado distintas estructuras, ésta no habría cambiado entre periodos con el objeto de evitar confusión de los usuarios.

mencionados anteriormente. Se puede notar que no se utilizan buses grandes en ningún periodo y que en fuera de punta solo se opera con buses chicos.

Tabla 6.1: Cantidad de buses de cada tipo obtenidos al optimizar cada periodo por separado, líneas exclusivas

Buses	Punta Mañana		Fuera de Punta	
	Cantidad	%	Cantidad	%
Chicos	5216	65%	4279	100%
Medianos	2761	35%	-	-
Grandes	-	-	-	-
Total	7977		4279	

(Fuente: Elaboración Propia)

Una consideración importante es que al adaptar la flota se mantiene la proporción de buses original, para que el desgaste de los buses sea homogéneo y por lo tanto la vida útil sea la misma para toda la flota. Así, lo que se busca al momento de adaptar la flota de un periodo a otro es el valor de un parámetro épsilon (ϵ), que entregará la porción de utilización de buses de la flota de un periodo a otro. Siguiendo este concepto, se tiene que el valor de épsilon al diseñar para punta mañana y adaptar para fuera de punta debiese ser menor que 1, ya que se necesita menos flota para operar fuera de punta. Del mismo modo, al diseñar para fuera de punta y adaptar para punta mañana, el valor de épsilon debiese ser mayor que 1.

Una vez clasificada la flota y establecidos los supuestos para adaptar, se tienen dos casos con ligeras diferencias: diseñar para punta mañana, adaptando la flota para fuera de punta y diseñar para fuera de punta y adaptar para punta mañana. A continuación, se detalla la metodología general para ambos casos, la cual corresponde a una heurística que se utilizará luego también en los análisis de sensibilidad.

Diseñar para punta mañana y adaptar para fuera de punta.

Se debe tener en cuenta que al optimizar independientemente los buses de punta mañana resultan de mayor tamaño que los buses requeridos en fuera de punta. Por lo tanto, los buses de fuera de punta debiesen resultar de mayor tamaño al momento de adaptar.

Así, para épsilon dado, se tendrá una cantidad fija de buses de cada tipo para operar fuera de punta. De este modo se debe modificar la carga o tamaño de embarque de los buses, cambiando por consiguiente la frecuencia para mantener la capacidad del servicio. Por ejemplo, si se quiere que una línea dada pase de usar buses chicos a medianos, se establece la carga en 51, de esta manera no se aleja demasiado de la carga óptima de la línea, de forma análoga se procede para pasar de utilizar un bus mediano a uno grande. Dicho esto, se presentan los pasos a seguir para adaptar los buses de punta mañana para utilizarlos en fuera de punta:

- En primer lugar, se ordena las líneas de acuerdo con el tamaño de embarque óptimo que resulta de minimizar el VRC considerando el periodo fuera de punta de manera aislada.
- Luego, considerando un épsilon fijo, se comienza cambiando el tipo de bus a uno de mayor capacidad de las líneas que presentan mayor tamaño de embarque en el óptimo; de esta manera se trata de dejar la mayor cantidad de líneas con su frecuencia y carga

- óptimas. Como en este caso se tienen solo buses chicos en fuera de punta se cambia el tamaño de embarque a las líneas con mayor carga y se obliga a llevar 51 pasajeros.
- Una vez que el número de buses medianos se acerca a la cantidad de buses medianos de punta mañana multiplicado por ϵ , se comienza a modificar levemente las cargas de los buses para utilizar más o menos buses según corresponda. Si se desea aumentar la cantidad de buses de un cierto tipo, se debe disminuir su carga, siempre y cuando no cambie su tipo de bus. Luego, si se desea disminuir la cantidad de cierto tipo de bus, se deben aumentar los tamaños de embarque.
 - Una vez que se tiene exactamente el número de buses de cada tipo igual a la cantidad de buses de punta mañana por ϵ , se debe calcular los costos de capital de los operadores. Como en este caso ϵ será menor que 1, los costos de capital asociados al periodo fuera de punta adaptados son cero, debido a que la compra de buses se hizo considerando el periodo de punta mañana.

Se realiza el proceso anterior para varios valores de ϵ factibles (que son capaces de llevar toda la demanda) y que no sean ineficientes (que no utilicen buses medianos con carga que cabe en un bus chico). Con esto, el valor de ϵ que minimice el VRC del periodo adaptado es el que se considera como el valor a tomar para comparar con el otro caso.

Diseñar para fuera de punta y adaptar para punta mañana.

Para este caso se debe tener en cuenta que los buses de fuera de punta son más pequeños que los buses obtenidos considerando únicamente el periodo punta mañana, por lo que se deben utilizar buses de menor capacidad.

Así, para ϵ dado, se tendrá una cantidad base de buses de cada tipo para operar punta mañana. De este modo se debe modificar la carga o tamaño de embarque de los buses, cambiando por consiguiente la frecuencia para mantener la capacidad. Por ejemplo, si se quiere que una línea dada pase de usar buses medianos a chicos, se establece la carga en 50, de esta manera no se aleja demasiado de la carga óptima de la línea. Dicho esto, se presentan los pasos a seguir para adaptar los buses de fuera de punta para utilizarlos en punta mañana:

- En primer lugar, se ordena las líneas de acuerdo con el tamaño de embarque óptimo que resulta de minimizar el VRC considerando el periodo punta mañana de manera aislada.
- Luego, considerando un ϵ fijo, se comienza cambiando el tipo de bus de las líneas que utilizan buses de tamaño mayor, de esta manera se trata de dejar la mayor cantidad de líneas con su frecuencia y carga óptimas. Como en este caso se tienen solo buses chicos en fuera de punta se cambia el tamaño de embarque a las líneas con mayor carga y se obliga a llevar 50 pasajeros, de esta manera se opera sólo con buses chicos en punta mañana.
- Ahora bien, se deben modificar levemente las cargas de los buses originalmente chicos para punta mañana de manera que el número de buses utilizados sea igual a los buses de fuera de punta multiplicado por ϵ . Si se desea aumentar la cantidad de buses de un cierto tipo, debe disminuir su carga, mientras no cambie su tipo de bus. Luego, si se desea disminuir la cantidad de cierto tipo de bus, deben aumentar los tamaños de embarque.
- Una vez que se tiene exactamente el número de buses de cada tipo igual a la cantidad de buses de punta mañana por ϵ , se debe calcular los costos de capital de los

operadores. Como en este caso ϵ será mayor que 1, el costo de capital asociado al periodo punta mañana adaptados es igual a los buses adicionales que se tengan que comprar. Este proceso se realiza restando la cantidad de buses que se utiliza en fuera de punta con los utilizados en el ahora adaptado periodo punta mañana; como las líneas se ordenan de mayor a menor según la carga, los primeros buses son los mismos que se utilizan en fuera de punta y los últimos son los comprados. Esto genera una aproximación importante, debido a que al optimizar las frecuencias de los buses se considera que los buses son del tamaño de la cantidad de pasajeros máxima que llevan en el ciclo. Por lo tanto, al clasificar los buses en distintos tamaños el tamaño original que tenían los buses no se considera, solo se toma en cuenta el tipo al cual pertenecen y la cantidad.

Al igual que en el caso anterior, este proceso se realiza para varios valores de ϵ que son factibles y no ineficientes. Con esto, el valor de ϵ que minimice el VRC del periodo adaptado es el que se considera como el valor a tomar para comparar con el otro caso.

Finalmente, para ambos casos, el procedimiento se realiza en *Excel*, siguiendo las consideraciones anteriores. De este modo, se resuelve para diferentes valores de ϵ y cuando el VRC es mínimo quiere decir que ϵ es el mejor que se puede usar para adaptar la flota a ese periodo. Luego, para calcular el costo total diario se suman los VRC de los dos periodos, para comparar la mejor forma de adaptar y dimensionar una flota de buses.

6.2. Resultados Adaptar Flota para Dos Periodos

En la presente sección se muestran los resultados de aplicar la metodología propuesta en la sección anterior. En primer lugar, se muestran el valor de ϵ que minimiza el VRC cuando se diseña para punta mañana y se adapta para fuera de punta. Luego se presenta el valor de ϵ que hace lo mismo cuando se diseña para fuera de punta y se adapta para punta mañana. Finalmente, se comparan los resultados con distintos indicadores y parámetros de las dos formas de diseñar y adaptar la flota de buses.

6.2.1. Diseñar para Punta Mañana y Adaptar para Fuera de Punta

En primer lugar, se tienen los resultados de adaptar la flota de punta mañana para operar en fuera de punta manteniendo las proporciones de uso de ésta. Como se menciona anteriormente, el valor de ϵ debe ser menor a uno debido a que en fuera de punta se necesitan menos buses para operar.

En la Tabla 6.2 y de manera gráfica en la Figura 6.1, se muestra el valor de los recursos consumidos para distintos valores de ϵ al adaptar la flota de punta mañana a fuera de punta. Se puede ver que el costo total del periodo es bastante sensible al valor del parámetro de utilización de la flota, donde el mínimo (destacado en la tabla) se da cuando para fuera de punta se utiliza el 40% de los buses de punta mañana. Además, se puede ver que el sistema no lleva toda la demanda para valores inferiores al 20% y por sobre el 50% se utilizan buses más grandes de manera innecesaria, cuando se puede utilizar un bus más pequeño.

Tabla 6.2: VRC para distintos valores de ϵ , adaptar para de punta

ϵ	VRC [US\$/periodo]
<0.2	No es factible
0.2	2,428,938
0.3	2,263,667
0.4	2,238,937
0.5	2,283,439
>0.5	Ineficiente

(Fuente: Elaboración Propia)

Costo de operadores y usuarios vs valor de ϵ
Adaptar para fuera de punta

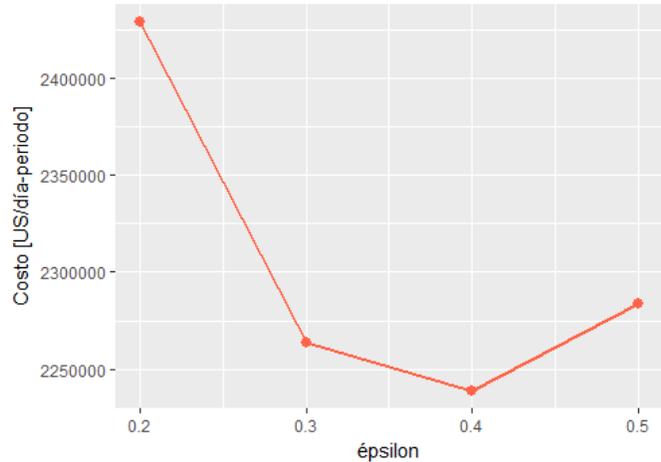


Figura 6.1: VRC para distintos valores de ϵ , adaptar fuera de punta

(Fuente: Elaboración Propia)

6.2.2. Diseñar para Fuera de Punta y Adaptar para Punta Mañana

Luego, se muestran los resultados de VRC para punta mañana para distintos valores de ϵ al utilizar como base las proporciones y cantidad de buses obtenidos al optimizar el periodo fuera de punta por sí solo. Además, como se menciona anteriormente este valor debe ser superior a 1, debido a que la demanda de punta mañana es más del doble que en fuera de punta.

En la Tabla 6.3 y en la Figura 6.2 se muestran los valores del valor de los recursos consumidos para valores de ϵ entre 1.65 y 2.3. Se puede ver que con menos del 165% de la flota de fuera de punta el sistema no es capaz de satisfacer la demanda de viajes. Además, como se destaca en la tabla, el menor valor de VRC se da cuando se ocupa exactamente el doble de la flota que la que se utiliza en fuera de punta, cuando se diseña para este periodo.

Tabla 6.3: VRC para distintos valores de ϵ , adaptar para punta mañana

ϵ	VRC [US\$/periodo]
<1.65	No es factible
1.65	2,759,581
1.7	2,749,526
1.8	2,743,778
1.9	2,741,448
2	2,740,899
2.1	2,745,963
2.2	2,750,431
2.3	2,754,128

(Fuente: Elaboración Propia)

Costo de operadores y usuarios vs valor de ϵ
Adaptar para punta mañana

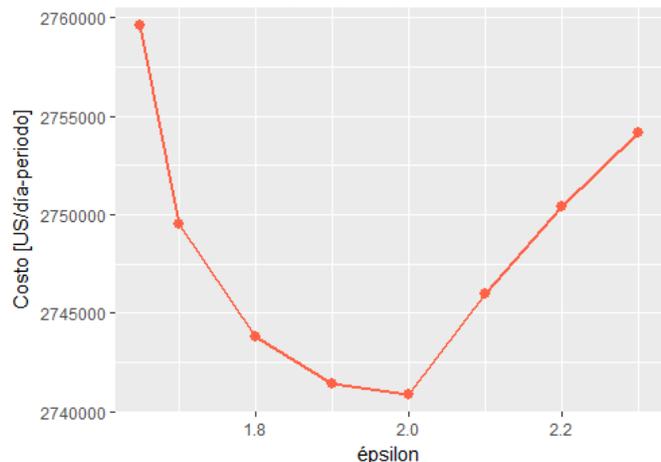


Figura 6.2: VRC para distintos valores de ϵ , adaptar punta mañana

(Fuente: Elaboración Propia)

6.2.3. Comparación de Resultados

En la Tabla 6.4 se muestran los resultados de las dos formas de diseñar y adaptar la flota de buses, considerando los valores de ϵ encontrados anteriormente. En primer lugar, se tienen los resultados de diseñar para punta mañana y adaptar para fuera de punta, luego, a la derecha se muestran distintos indicadores de diseñar para fuera de punta y adaptar la flota para utilizarla en punta mañana.

Dentro de los indicadores se tiene el valor de ϵ utilizado para adaptar la flota y la cantidad de buses de cada tipo definidos en la sección anterior, junto con la flota total. Además, se muestra el costo del periodo, costo de pasajeros promedio, el costo operacional y de capital asociado a la compra de buses. Luego, se tiene la cantidad de plazas, el tamaño de embarque promedio de los buses, los tiempos de espera y de viaje promedio, así como la frecuencia de buses promedio. Finalmente, se tiene el costo total de los usuarios al día, el costo de los operadores total diario, el costo medio de operadores por pasajero y el costo total del sistema en un día.

Tabla 6.4: Comparación de indicadores para dos maneras de diseñar y adaptar la flota

Parámetros	Periodo óptimo	Periodo adaptado	Periodo óptimo	Periodo adaptado
	PM	FP	FP	PM
Épsilon	0.4		2	
Buses chicos	5216	2087	4279	8558
Buses medianos	2761	1105	-	-
Buses grandes	-	-	-	-
Flota total	7977	3192	4279	8558
Costo [US\$/periodo]	2,852,369	2,238,937	2,266,577	2,740,899
Costo pasajeros promedio [US\$/h-pax]	1.531	1.308	1.279	1.529
Costo operacional [US\$/h]	46,119	14,940	16,412	46,835
Costo capital [US\$/día]	189,949	-	54,388	78,290
Cantidad de Plazas	348,736	83,276	81,500	347,689
Tamaño embarque promedio [pax]	40.0	26.7	19.1	38.4
Tiempo de espera Promedio [s]	22.5	56.2	38.7	21.8
Tiempo de viaje Promedio [min]	35.6	29.2	29.0	35.5
Frecuencia promedio [bus/h]	63	22	31	66
Horas periodo	5	13	13	5
Costo pasajeros diario [US\$]	4,476,543		4,427,270	
Costo Tiempo de Espera Diario [US\$]	173,550		133,788	
Costo Tiempo de Viaje Diario [US\$]	4,302,995		4,293,480	
Costo operadores diario [US\$]	614,763		580,206	
Costo medio operadores [US\$/pax]	0.20		0.18	
Costo día [US\$]	5,091,306		5,007,476	

(Fuente: Elaboración Propia)

De la tabla anterior, se puede notar en primer lugar que la forma de diseñar que presenta un menor costo del sistema al día es diseñar considerando fuera de punta y adaptar para punta mañana utilizando el doble de la flota. De otros indicadores, se muestra que el tamaño de embarque

promedio es menor al diseñar para fuera de punta, además, los tiempos de espera y de viaje son menores, mientras que la frecuencia promedio es mayor para ambos periodos al diseñar de esta forma.

Luego, con respecto a los costos totales diarios, se tiene que tanto para los pasajeros como para los operadores el costo total diario es menor al adaptar la flota de fuera de punta en vez de diseñar para punta mañana, que es lo que habitualmente se hace teniendo en cuenta que presenta la mayor demanda de pasajeros por hora. Además, se tiene que la diferencia entre costos diarios de ambas formas de diseñar se explica por la disminución en los costos asociados a los tiempos de espera principalmente mientras que el costo del tiempo de viaje tiene una variación muy menor.

6.3. Análisis de Sensibilidad

En esta sección se realizan algunos análisis de sensibilidad respecto de ciertas variables que juegan un papel relevante en el proceso de adaptar la flota óptima desde un periodo a otro. En primer lugar, se analiza la sensibilidad sobre las categorías de buses utilizadas, es decir, se realiza un cambio en los tipos de buses utilizados con el fin de verificar la robustez del método. Luego, se realiza un cambio en la duración de ambos periodos, con el fin de encontrar la dirección de cambio de los costos diarios. Finalmente, se realiza un cambio respecto de la compra de nuevos buses al diseñar para fuera de punta y adaptar la flota para punta mañana, dejando libre el tipo de buses a comprar.

6.3.1. Sobre las Categorías de Buses

Como se detalla anteriormente, los tipos de buses considerados en el análisis son los mismos que se utilizan en el Transantiago. Debido a que no se utilizan buses grandes en ninguno de los periodos y que en fuera de punta solo se utilizan buses pequeños, se decide aumentar la cantidad de tipos de buses. Esto, con el fin de evaluar si se mantiene la conclusión de que tiene un menor costo diario diseñar para fuera de punta y adaptar para punta mañana.

Se decide incorporar nuevas alternativas, incorporando un bus más pequeño que el bus de 9 metros y un bus cuya capacidad sea intermedia al bus de 9 y el de 12 metros. Con esto, los tipos de buses considerados, junto con la cantidad de cada tipo de bus para cada uno de los periodos se muestran en la Tabla 6.5, la cual se obtuvo de clasificar la carga máxima de cada línea (mostrada en el Anexo A) en los tipos de buses considerados. De esta tabla se puede notar que para el periodo punta mañana los buses más utilizados son los buses de 9 metros, es decir, cuya capacidad máxima es de 50 pasajeros, mientras que en fuera de punta la mayor parte de los buses son de capacidad máxima de 30 pasajeros.

Tabla 6.5: Cantidad de buses de cada tipo obtenidos de optimizar cada periodo por separado, 4 categorías de buses

Capacidad máxima [pax]	Punta Mañana		Fuera de Punta	
	Cantidad	%	Cantidad	%
30	2095	26%	3545	83%
50	3121	39%	735	17%
70	2057	26%	-	-
90	704	9%	-	-
Total	7977		4280	

(Fuente: Elaboración Propia)

Al categorizar los buses de la manera que se muestra anteriormente, se debe extrapolar la función de costos que se muestra en las primeras secciones, ya que ésta fue obtenida con los costos de los buses que utiliza Transantiago actualmente. Por lo tanto, para obtener los costos de los buses de 30 pasajeros, se asume que la función de costos se extrapola de forma lineal.

En la Tabla 6.6 se muestra la comparación de las dos maneras de diseñar, donde se puede apreciar la variación de los valores de ϵ para ambos casos en comparación al caso original. Se tiene que ahora al diseñar para punta mañana y adaptar para fuera de punta se necesita solo el 31% de la flota, lo cual es menor al valor presentado en el caso anterior. Mientras que, al diseñar para fuera de punta y adaptar para punta mañana se necesita el 2.5 veces la flota requerida para operar fuera de punta de manera óptima. Con esto, se puede ver que se mantienen parecidas las proporciones relativas entre la flota total de fuera de punta y de punta mañana para ambas formas de diseñar.

Tabla 6.6: Comparación de indicadores para dos maneras de diseñar y adaptar la flota, 4 categorías de buses

Parámetros	Periodo óptimo	Periodo adaptado	Periodo óptimo	Periodo adaptado
	PM	FP	FP	PM
Épsilon	0.31		2.5	
Buses de 30	2095	650	3545	8863
Buses de 50	3121	968	735	1838
Buses de 70	2057	638	-	-
Buses de 90	704	219	-	-
Flota total	7977	2475	4280	10701
Costo [US\$/periodo]	2,852,369	2,270,503	2,266,577	2,782,449
Costo pasajeros promedio [US\$/h-pax]	1.531	1.337	1.279	1.522
Costo operacional [US\$/h]	46,119	13,897	16,412	49,589
Costo capital [US\$/día]	189,949	-	54,388	117,615
Cantidad de Plazas	348,736	83,859	81,500	345,019
Tamaño embarque promedio [pax]	40.0	34.8	19.1	30.9
Tiempo de espera Promedio [s]	22.5	75.6	38.7	18.7
Tiempo de viaje Promedio [min]	35.6	29.2	29.0	35.5
Frecuencia promedio [bus/h]	63	17	31	82
Horas periodo	5	13	13	5
Costo pasajeros diario [US\$]	4,521,668		4,415,728	
Costo Tiempo de Espera Diario [US\$]	216,222		126,862	
Costo Tiempo de Viaje Diario [US\$]	4,305,448		4,288,863	
Costo operadores diario [US\$]	601,204		633,298	
Costo medio operadores [US\$/pax]	0.19		0.20	
Costo día [US\$]	5,122,872		5,049,026	

(Fuente: Elaboración Propia)

Ahora bien, se puede ver que sigue siendo más conveniente diseñar para fuera de punta y adaptar la flota para punta mañana, debido a que el costo total del día es menor que al diseñar de la otra

forma. Una diferencia con respecto al caso anterior es que ahora los usuarios disminuyen el costo total, pero los operadores aumentan el costo al diseñar para fuera de punta, debido al uso de buses más pequeños.

Otro aspecto a considerar es que las frecuencias promedio aumentan considerablemente al diseñar para fuera de punta con respecto a considerar punta mañana en el diseño. Por lo que los tiempos de espera son menores y los tamaños de embarque promedio también.

6.3.2. Sobre la Duración de los Periodos

Luego, con el fin de determinar la dirección de movimiento de los costos diarios al cambiar la duración de los periodos punta mañana y fuera de punta, se prueba realizar el análisis anterior solamente para las líneas exclusivas considerando ahora que el periodo punta mañana tiene una duración de 6 horas y fuera de punta 12 horas. Es decir, el periodo punta mañana se vuelve más relevante con respecto al total diario.

Tabla 6.7: Comparación de indicadores para dos maneras de diseñar y adaptar la flota, duración de periodos modificada

Parámetros	Periodo óptimo	Periodo adaptado	Periodo óptimo	Periodo adaptado
	PM	FP	FP	PM
Épsilon	0.4		2	
Buses chicos	5355	2142	4252	8504
Buses medianos	2824	1130	-	-
Buses grandes	-	-	-	-
Flota total	8179	3272	4252	8504
Costo [US\$/periodo]	3,384,784	2,066,977	2,096,405	3,274,528
Costo pasajeros promedio [US\$/h-pax]	1.530	1.308	1.279	1.530
Costo operacional [US\$/h]	46,373	15,060	16,371	46,759
Costo capital [US\$/día]	190,645	-	54,282	79,024
Cantidad de Plazas	348,420	83,251	81,516	347,685
Tamaño embarque promedio [pax]	39.0	25.6	19.2	38.7
Tiempo de espera Promedio [s]	21.9	55.6	39.0	22.1
Tiempo de viaje Promedio [min]	35.6	29.2	29.0	35.5
Frecuencia promedio [bus/h]	65	23	30	65
Horas periodo	6	12	12	6
Costo pasajeros diario [US\$]	4,802,157		4,760,618	
Costo Tiempo de Espera Diario [US\$]	171,394		138,355	
Costo Tiempo de Viaje Diario [US\$]	4,630,763		4,622,263	
Costo operadores diario [US\$]	649,605		610,314	
Costo medio operadores [US\$/pax]	0.19		0.18	
Costo día [US\$]	5,451,761		5,370,932	

(Fuente: Elaboración Propia)

En primer lugar, se debe volver a optimizar las frecuencias de las líneas exclusivas considerando las nuevas duraciones de los periodos, debido a que éstas influyen en el valor de los recursos consumidos. Luego, se sigue el mismo procedimiento explicado en la sección 6.1, para ambas maneras de diseñar. Con esto, se obtienen los valores de ϵ que minimizan el VRC para cada periodo adaptado, los cuales son los mismos que en el caso original, lo que demuestra que el cambio de la duración de los periodos en una hora no impacta de manera significativa en los tamaños de los buses.

Por otro lado, en la Tabla 6.7 se muestra el costo total diario del sistema, el cual sigue siendo menor cuando se diseña para fuera de punta y se adapta para punta que a la inversa. Sin embargo, se puede notar que la diferencia de estos costos es de 1.48%, menor que en el caso original (1.65%). Lo anterior indica que al aumentar la importancia de punta mañana en el día la diferencia del costo diario entre las dos formas de diseñar disminuye. Esto indica que existe un punto de la duración de los periodos en que, cuando punta mañana se hace muy relevante, es más conveniente diseñar para punta mañana y adaptar la flota para fuera de punta.

6.3.3. Sobre la Compra de Buses Nuevos

Un último análisis de sensibilidad se realiza con respecto a la compra de nuevos buses. Como se explica anteriormente, la compra de nuevos buses al adaptar de un periodo a otro se realiza en la misma proporción que la del periodo óptimo, para que el desgaste de los buses sea homogéneo y toda la flota tenga la misma vida útil. En esta sección se levanta este supuesto y se deja libre la compra de nuevos buses, cuando se diseña para fuera de punta y se adapta para punta mañana, que es donde es necesario comprar nuevos buses.

El proceso que se realiza es similar al explicado en la sección de metodología, pero al no existir el valor de ϵ , lo que se hace es optimizar nuevamente las frecuencias de punta mañana considerando que el periodo fuera de punta ya tiene incluido la compra de cierta cantidad de buses de un tamaño dado. Por lo tanto, se considera en el costo de capital de fuera de punta solo el costo de adquisición de nuevos buses, esta vez de manera libre (cualquier tamaño).

En la Tabla 6.8 se muestra la comparación entre diseñar para punta mañana y adaptar para fuera de punta con ϵ igual al 40%, como se tiene en el caso original, y diseñar para fuera de punta y adaptar para punta mañana considerando que se tiene cierta cantidad de buses comprados y que se puede comprar nuevos buses de manera libre. Se puede ver que sigue siendo conveniente diseñar para fuera de punta y adaptar para punta mañana, pero el costo diario es mayor a cuando se tiene la restricción de mantener la proporción de los distintos tipos de buses de un periodo a otro, lo cual es contraintuitivo, debido a que si se levanta una restricción el valor diario debería disminuir aún más a lo mostrado en el caso original. Esto se debe a la simplificación que se hace al categorizar los buses en distintos tipos, donde no se conserva la información del tamaño real que tenían los buses en el periodo óptimo, sino que sólo se tiene la información sobre la cantidad de buses de cada tipo.

Además, de la Tabla 6.8 se puede ver que la flota para operar punta mañana es menor en el segundo caso. Este cambio se puede deber a que ahora el costo de operación tiene mayor relevancia en la función de VRC debido a que ya existe una cantidad de buses adquiridos, cantidad dada por el óptimo de fuera de punta.

Tabla 6.8: Comparación de indicadores para dos maneras de diseñar y adaptar la flota, compra de nuevos buses libre

Parámetros	Periodo óptimo	Periodo adaptado	Periodo óptimo	Periodo adaptado
	PM	FP	FP	PM
Épsilon	0.4		-	
Buses chicos	5216	2087	4279	5098
Buses medianos	2761	1105	-	2761
Buses grandes	-	-	-	-
Flota total	7977	3192	4279	7859
Costo [US\$/periodo]	2,852,369	2,238,937	2,266,577	2,762,623
Costo pasajeros promedio [US\$/h-pax]	1.531	1.308	1.279	1.532
Costo operacional [US\$/h]	46,119	14,940	16,412	45,962
Costo capital [US\$/día]	189,949	-	54,388	99,676
Cantidad de Plazas	348,736	83,276	81,500	348,834
Tamaño embarque promedio [pax]	40.0	26.7	19.1	40.5
Tiempo de espera Promedio [s]	22.5	56.2	38.7	23.0
Tiempo de viaje Promedio [min]	35.6	29.2	29.0	35.6
Frecuencia promedio [bus/h]	63	22	31	63
Horas periodo	5	13	13	5
Costo pasajeros diario [US\$]	4,476,543		4,431,973	
Costo Tiempo de Espera Diario [US\$]	176,550		136,323	
Costo Tiempo de Viaje Diario [US\$]	4,302,995		4,295,646	
Costo operadores diario [US\$]	614,763		597,228	
Costo medio operadores [US\$/pax]	0.20		0.19	
Costo día [US\$]	5,091,306		5,029,201	

(Fuente: Elaboración Propia)

6.4. Síntesis

Una primera observación que se puede hacer es que, al considerar los tipos de buses que actualmente se utilizan en Transantiago, se tiene que en ninguno de los dos periodos se deberían usar buses articulados, mientras que en fuera de punta se utilizan únicamente buses pequeños con capacidad de 50 pasajeros. Luego, al adaptar la flota se tiene como resultado que los tiempos de espera y tamaños de embarque son menores para ambos periodos al diseñar para fuera de punta y adaptar para punta mañana, donde las frecuencias son mayores. Esto se traduce en menores costos de operadores y de usuarios, lo que da como resultado un menor costo diario al diseñar de esta manera.

Respecto al hecho de que se tengan menores costos para los usuarios y para los operadores al diseñar para fuera de punta y adaptar, es necesario realizar una observación relevante. En el caso de los costos de operadores, se tiene que los costos operacionales aumentan, pero los costos de

capital disminuyen considerablemente. Esta disminución de los costos de capital se debe a la simplificación hecha al adaptar la flota, donde al clasificar los buses en distintos tipos se pierde la información anterior respecto al tamaño de embarque que se tenía al optimizar para fuera de punta. Sin embargo, los costos de capital no debiesen aumentar demasiado como para afectar la conclusión mostrada en la Tabla 6.8, al comparar el valor con los costos de capital al optimizar para punta mañana.

Una razón de que sea conveniente diseñar para fuera de punta es que los usuarios de punta mañana se ven beneficiados con menores tiempos de espera, ya que pasan buses pequeños con mayor frecuencia, traduciéndose en mayores costos de operación. Por otro lado, cuando se diseña para punta mañana, los usuarios de fuera de punta ven aumentado considerablemente sus tiempos de espera, siendo esta pérdida mayor a la que se tiene en costos de operación al diseñar de la otra manera, debido a que son más horas en el día.

Por otro lado, con respecto a los análisis de sensibilidad realizados, se tiene que la conclusión de que es conveniente diseñar para fuera de punta y adaptar para punta mañana se mantiene al cambiar las categorías de los buses, cambiar la duración de los periodos y liberar la restricción asociada a la compra de nuevos buses.

Al cambiar las categorías de los buses y aumentar la cantidad de tipos diferentes, se tiene que la flota aumenta con respecto al caso original cuando se diseña para fuera de punta, debido a que resulta óptimo utilizar buses muy pequeños con capacidad de solo 30 pasajeros. En este caso se tiene un aumento de más de 2000 buses, ya que los buses de 30 pasajeros son el porcentaje mayoritario cuando fuera de punta es óptimo.

Con respecto al cambio en la duración de los periodos, se comprueba lo que propone Walker (2012), donde dice que si el periodo fuera de punta es más relevante en cuanto a la cantidad total de viajes en el día, se debe diseñar para ese periodo y tener buses adicionales para operar en punta mañana, mientras que si el periodo punta mañana tiene más relevancia, se debe diseñar para ese periodo y disminuir la flota en fuera de punta. La relevancia de cada periodo se puede interpretar como la demanda por hora por la duración del periodo en el día, por lo que al aumentar la cantidad de horas de un periodo y disminuir las del otro se hace más relevante. Por lo tanto, al hacer crecer la cantidad de horas que dura el periodo punta mañana disminuye la diferencia de costos y existirá un punto donde se vuelva tan relevante punta mañana que sea conveniente diseñar para este periodo y adaptar para fuera de punta.

Finalmente, cuando se deja libre la compra de nuevos buses al adaptar a punta mañana, se tiene que los costos aumentan respecto al caso original, pero siguen siendo menores al caso en que se diseña para punta mañana. Esto deja en evidencia lo que se dijo en la metodología de adaptar la flota, donde se genera una aproximación en los costos de capital al categorizar los buses en diferentes tipos según su capacidad.

Con todo lo anterior, se cumple el objetivo de encontrar la mejor forma de diseñar el sistema de transporte público en Santiago, utilizando la representación simplificada del modelo basado en centros. La mejor forma corresponde a optimizar las frecuencias de las líneas exclusivas para el periodo fuera de punta y adaptar la frecuencia y tamaño de buses de cada servicio para punta mañana. De esta manera, en el próximo capítulo se compara esta forma de diseñar con la forma de operación actual del transporte público en Santiago.

Capítulo 7 : Análisis Comparativo

En los capítulos previos se logra encontrar la mejor forma de diseñar el sistema de transporte público en Santiago, la cual se obtiene optimizando el costo total para fuera de punta, adaptando las frecuencias y tamaños de bus, y agregando nuevos buses para operar punta mañana. Para llegar a este resultado, el cual es el más relevante del trabajo, se tuvo que realizar una serie de pasos previos como lo fue encontrar las estructuras topológica y de demanda para describir Santiago, definir el problema de optimización y las estructuras de líneas, además de optimizar las frecuencias de cuatro estructuras de líneas para punta mañana y fuera de punta por separado.

Este capítulo tiene como objetivo analizar los resultados presentados anteriormente, de manera de resumir los principales hallazgos de esta memoria. Además, se muestran características de la forma de operación actual del sistema de transporte público de Santiago, identificando a qué estructura de líneas de las descritas anteriormente se parece más. Finalmente, se compara la forma de operación actual con la mejor forma de operación encontrada considerando tanto costos de operadores como de los usuarios.

7.1. Análisis de Resultados

En el Capítulo 5 se presentan los resultados de optimizar las frecuencias de cuatro estructuras de líneas para dos periodos del día, dos del tipo directas y dos basadas en transbordos. Para ambos periodos se tiene que las estructuras directas presentan menor costo en comparación a las basadas en transbordos; esto se debe a la demanda, la cual es relativamente alta, tal y como se muestra en Fielbaum et al. (2016), donde las estructuras basadas en transbordos son convenientes sólo cuando la demanda es baja. Lo anterior se puede ver en que las frecuencias de las líneas de las estructuras troncal-alimentador y hub&spoke son demasiadas altas (llegando a casi 800 buses por hora), lo que se traduce en costos muy elevados para los operadores y que incluso puede no ser factible en términos físicos (buses en las calles), lo que considerando que cada arco representa 4 calles se traducen en 200 buses por hora-calle.

Por otro lado, se tiene que la cantidad de transbordos de la estructura troncal-alimentador es significativamente mayor que en hub&spoke. Esta diferencia es relevante, ya que solo en el caso en que no se considera penalidad por transbordo es más conveniente la estructura de troncal-alimentador en comparación con hub&spoke, pero sigue siendo más costosa que las estructuras directas. Esto se debe la estructura de troncal-alimentador presenta significativamente menores costos de operación que hub&spoke.

Además, al comparar los tiempos de viaje de los periodos punta y fuera de punta, se tiene que los tiempos de viaje en vehículo para fuera de punta son menores, para todas las estructuras analizadas. Esta diferencia se debe principalmente a que en punta mañana la velocidad de circulación es menor y los viajes son más largos en promedio, sin embargo, los tiempos de subida y bajada tienen un impacto, debido a que al haber mayor demanda se tienen mayores tiempos de subida y bajada en total, aumentando los tiempos de viaje.

Una vez optimizadas las frecuencias de las estructuras de líneas para ambos periodos, se tiene que en ambos casos el menor costo total se tiene cuando se opera con líneas exclusivas. Este tipo de estructura, que tiene una línea de buses por cada par origen destino y no realiza paradas en nodos

intermedios, es la que presenta un menor tamaño de embarque en ambos periodos. Mientras que en cuanto a la flota, utiliza la menor cantidad de buses para operar en punta mañana y la mayor cantidad de buses en fuera de punta en comparación a las otras estructuras. Esto se debe a que las estructuras exclusivas no operan con capacidad ociosa en el sentido más cargado, circulando con la menor cantidad de buses posibles en punta mañana, mientras que en fuera de punta deben operar con buses muy pequeños para cubrir la baja demanda de algunos pares origen destino.

Los buses articulados no son utilizados en ningún periodo, mientras que en fuera de punta se utilizan sólo buses de 9 metros, con capacidad máxima de 50 pasajeros. Es decir, si se implementara un sistema con estas características en Santiago se debiera sacar de circulación los buses articulados y operar con una baja cantidad de buses de 90 pasajeros, e incluso llegando a utilizar buses de menor capacidad aún (como se ve en el análisis de sensibilidad sobre las categorías de buses, sección 6.3.1, donde se utiliza un 83% de buses de esta capacidad).

Además, cuando se adapta la flota de un periodo a otro, la mejor manera de hacerlo (que tiene menor costo diario) es cuando se diseña para fuera de punta, utilizando buses de menor tamaño que la flota obtenida al optimizar punta mañana de manera aislada. Lo anterior se verifica con diversos análisis de sensibilidad, donde para cambios en algunas componentes se mantiene la conclusión anterior. Solo en el caso en que el periodo punta mañana se volviera mucho más relevante, es decir, que aumentara la cantidad de horas en el día manteniendo la demanda promedio, sería más conveniente diseñar para punta mañana y adaptar para fuera de punta en la ciudad de Santiago.

Otro aspecto relevante es que cuando se diseña para punta mañana y se adapta para fuera de punta, las frecuencias de buses en fuera de punta disminuyen notablemente, por lo tanto, los tiempos de espera aumentan significativamente. Esto se debe a que se tiene que usar un tipo de bus de mayor tamaño de embarque en algunas líneas, lo que empeora la calidad de servicio para estos pasajeros. En cambio, cuando se diseña para fuera de punta los pasajeros de punta mañana ven mejorado el servicio con mayores frecuencias de buses por hora, lo cual se traduce en menores tiempos de espera, aunque las diferencias en este caso no son muy marcadas.

7.2. Operación Actual de Santiago

Esta sección presenta características de la forma de operación actual de Transantiago, relacionadas con la cobertura del sistema, capacidad, flota, etc. Además, se muestra un análisis a las líneas actuales de buses en Santiago de acuerdo con la zonificación adoptada para el modelo basado en centros, con el objetivo de saber a qué estructura de líneas de las presentadas se parece más la operación actual del sistema de transporte público en Santiago. Para esto, es necesario notar que Transantiago está compuesto por Metro de Santiago y buses de distintas empresas operadoras.

En primer lugar, con respecto al metro se tiene que de acuerdo con el Informe de Gestión 2015-2016 (DTPM, 2017) éste cuenta con las siguientes características:

- 104 km en 5 líneas.
- 108 estaciones.
- 186 trenes, de los cuales opera un 98,9% en hora punta, según lo presentado en la Memoria Anual 2012 de Metro (Metro de Santiago, 2013).
- Cubre 21 comunas.

- Transporta 2.3 millones de personas a diario.
- Alrededor de 195 mil plazas, lo que dividido por la cantidad de trenes se tiene la capacidad promedio de los trenes equivalente a 1.045 [pax/tren].

En la Figura 7.1 se muestran las líneas de metro y estaciones junto con la zonificación adoptada en la descripción topológica de Santiago. En esta figura se puede notar que la zona Sur-Poniente no posee acceso al metro al momento de la recopilación de datos, la cual es previa a la inauguración de la línea 6 que conecta el subcentro del Sur-Poniente con el CBD pasando por la zona Oriente, y previo a la inauguración del Metro-tren que se integra al sistema de Transantiago junto con la línea 6 a fines del año 2017. Además, se puede notar que en general las periferias de las zonas no se encuentran cubiertas por la red de metro, a excepción de la zona Sur-Oriente, donde cubre gran parte de la periferia llegando hasta Plaza Puente Alto.

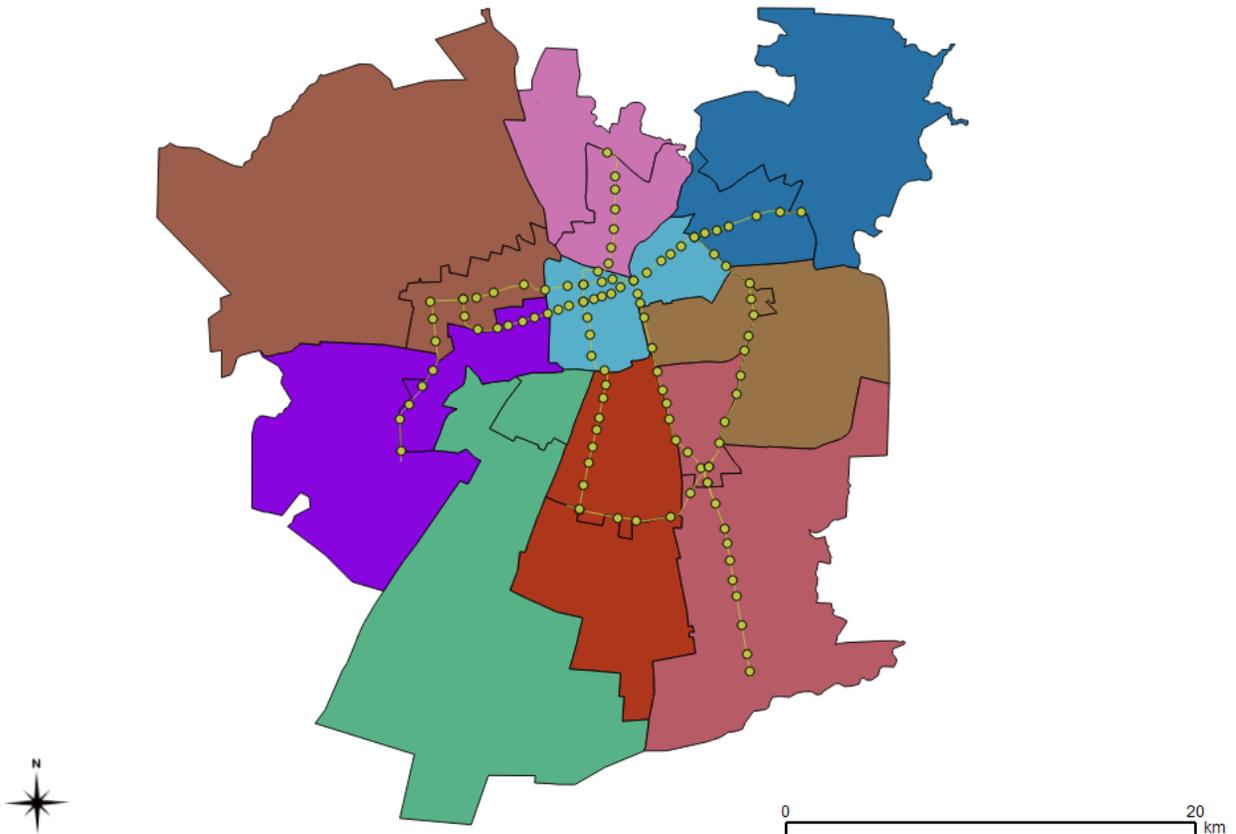


Figura 7.1: Líneas y estaciones de metro, 2017

(Fuente: Elaboración Propia)

Luego, con respecto a los buses, los cuales son operados por 7 unidades de negocio distintas, se tiene información extraída del Informe de Gestión 2015-2016 (DTPM, 2017), donde se muestra que el sistema de buses cuenta con las siguientes características:

- Cubre un total de 2,821 km de red vial.
- 11,339 paraderos.
- 378 servicios.
- 6,646 buses, de los cuales 6154 operan a diario (92,6% de flota operacional).
- Cubre 34 comunas.

- Tiene 2.9 millones de transacciones en un día laboral promedio.
- Alrededor de 682 mil plazas lo que dividido por la cantidad de buses se tiene la capacidad promedio de los buses equivalente a 102.7 [pax/bus].

En la Figura 7.2 se muestran las líneas de buses que operan las distintas unidades de servicio, obtenido del Consolidado de Archivos Geográficos de Rutas (DTPM, 2017), estas líneas son obtenidas luego de filtrar los servicios de inyección y no comerciales, los cuales no llevan pasajeros. De la figura se puede notar que el sistema de buses de Transantiago cubre la mayor parte de las comunas llegando a los lugares más alejados de las periferias, a diferencia de Metro, pero con mayor concentración de servicios en los subcentros y CBD.

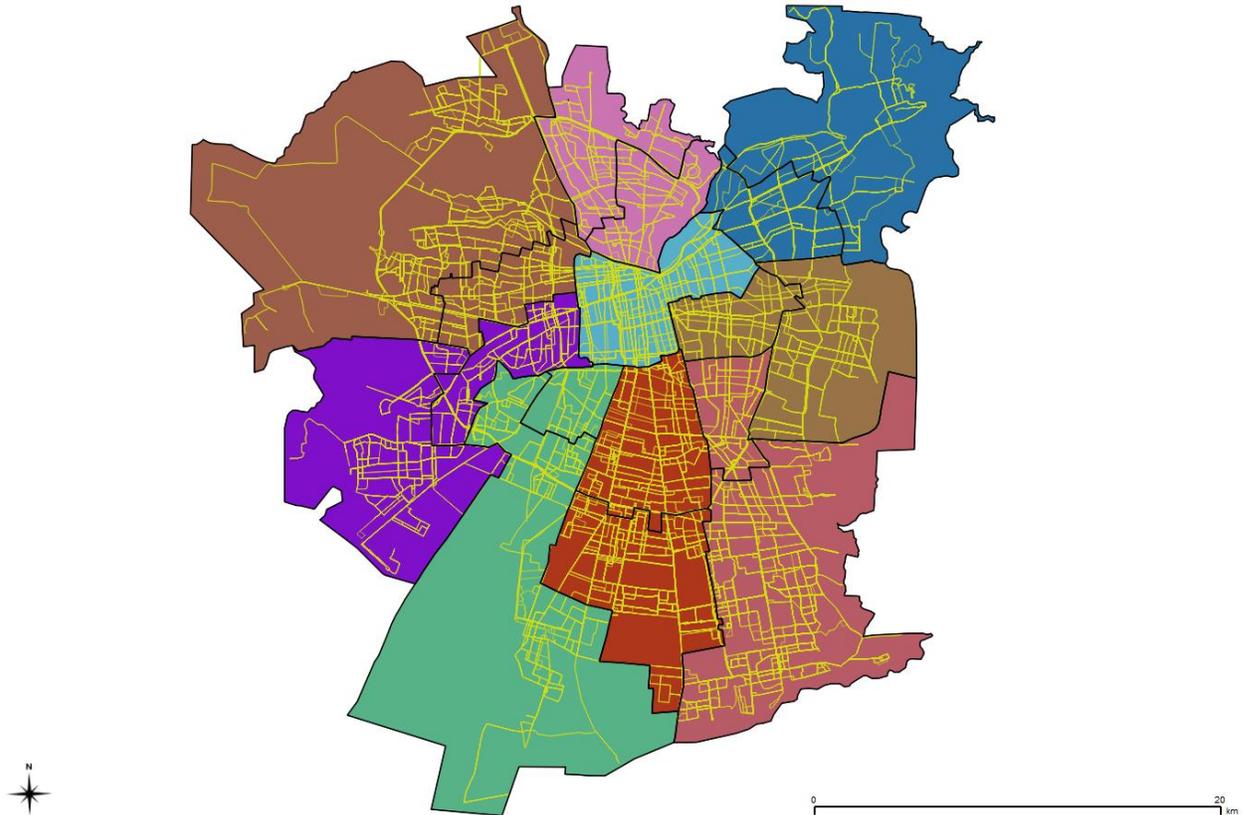


Figura 7.2: Red cubierta por las líneas de Transantiago, 28/10/17

(Fuente: Consolidado de Archivos Geográficos de Rutas)

Luego, en cuanto a las características de la flota de buses, se tiene lo mostrado en la Tabla 7.1. Donde se puede ver que la mayor parte de los buses operando corresponden a buses de 12 metros (medianos), cuya capacidad máxima es de 90 pasajeros, mientras que se opera con 21% de buses articulados y alrededor de 16% de buses de 9 metros (50 pasajeros), los cuales son minoría. Además, en el Informe de Gestión 2015 -2016 (DTPM, 2017), se detalla que la antigüedad promedio de los buses es de 6.6 años y que la flota que cuenta con accesibilidad universal es el 84% lo que corresponde a buses de 12 metros y articulados.

Tabla 7.1: Cantidad de cada tipo de bus, operación Transantiago

Buses	Transantiago	
	Cantidad	%
Chicos	1050	15.8%
Medianos	4167	62.7%
Grandes	1402	21.1%
Otro	27	0.4%
Total	6646	

(Fuente: Informe de Gestión 2015 -2016)

Ahora bien, a partir de las líneas presentadas en la Figura 7.2, se realiza un análisis para saber a qué estructura de líneas se parece la forma de operación actual considerando la zonificación adoptada para el modelo basado en centros. Para esto, se utiliza el Software *QGIS*, un sistema de información geográfica de código libre, en donde se pueden seleccionar e identificar los servicios que pasan por alguna división de una macrozona.

En primer lugar, a partir de todos los servicios de Transantiago que llevan pasajeros, se seleccionan las líneas que pasan por un sector de una zona (periferia, subcentro o CBD), guardando el resultado en un nuevo archivo de forma “.shp” (Shape). Luego, a partir del archivo anterior se seleccionan las líneas que llegan a otro nodo de la zonificación adoptada, esta selección se guarda en un archivo de valores “.csv”. Repitiendo este proceso para todos los pares de nodos (136 en total), se tiene un listado de todas las líneas que unen cada par origen-destino con toda la información que éstas tienen, como las frecuencias en punta mañana y punta tarde, distancia recorrida, plazas, etc.

Un ejemplo del proceso descrito anteriormente se presenta en las siguientes imágenes para el caso del par origen destino periferia Norte – periferia Oriente. En la Figura 7.3 se muestran las líneas que sirven el nodo periferia Norte, donde en amarillo se destacan las líneas que unen este nodo con la periferia de la zona Oriente. De esta imagen se puede ver que se utiliza mayoritariamente la circunvalación, que corresponde a Américo Vespucio, sin atravesar el CBD. Luego, en la Tabla 7.2 se muestra la información del archivo .csv correspondiente a las líneas que unen el par de nodos mencionado, de aquí se puede notar que los unen 10 servicios, donde algunos corresponden a variantes sin frecuencia para punta mañana y recorridos nocturnos.

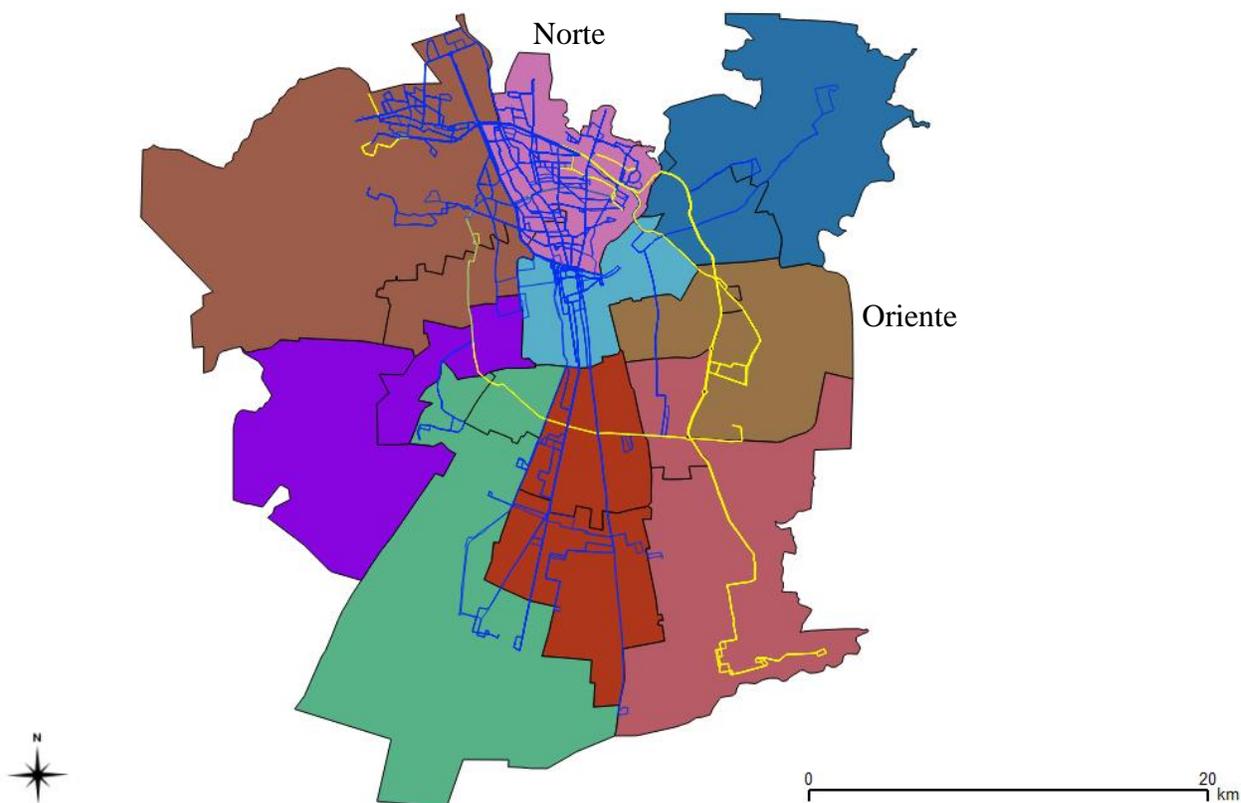


Figura 7.3: Ejemplo selección líneas Transantiago para el par PNorte-POriente

(Fuente: Consolidado de Archivos Geográficos de Rutas y Elaboración Propia)

Tabla 7.2: Detalle operativo de las líneas que unen al par PNorte-POriente

ROUTE_NAME	SERVICE_NA	UN	DIST	COD_USUSEN	FREC_PM	FREC_PT	PLAZAS_PM	PLAZAS_PT
112NR	RECOLETA - AV. LA FLORIDA	1	27.159	112NR	0	0	0	0
107I_cvd	VARIANTE CICLOVIA	1	36.612	107I	0	0	0	0
712I	PUENTE ALTO - RECOLETA	7	49.383	712I	6	6	540	540
712R	RECOLETA - PUENTE ALTO	7	46.964	712R	5	6	450	540
425I	RIGOBERTO JARA - LO HERMIDA	4	34.11	425I	14	12	1441	1279
112NI	AV. LA FLORIDA - RECOLETA	1	27.043	112NI	0	0	0	0
425R	LO HERMIDA - RIGOBERTO JARA	4	33.808	425R	13	13	1363	1351
429I	LO ECHEVERS - LO HERMIDA	4	34.099	429I	7	6	668	586
107R	AV. DEPARTAMENTAL - CIUDAD EMPRESARIAL	1	36.655	107R	11	10	1505	1239
429R	LO HERMIDA - LO ECHEVERS	4	33.901	429R	6	0	626	0

(Fuente: Consolidado de Archivos Geográficos de Rutas y Elaboración Propia)

Luego de repetir el proceso para todos los pares de nodos, se logra el siguiente análisis:

- 130 de 136 pares origen destino están conectados con al menos una línea directa de buses. Cabe destacar que los pares no conectados tampoco son servidos por Metro de manera directa.
- Del procedimiento realizado, se puede notar que las líneas directas en general no cubren la totalidad de las divisiones de las zonas, si no que llegan al comienzo de ésta en especial para las periferias en gran parte de los casos, por lo que para llegar a cualquier parte de una zona se deberá hacer un transbordo con un recorrido intra-zonal, los cuales no están considerados en la visión estratégica de este trabajo.

- Existen líneas de buses que sirven exclusivamente un sector de una macrozona, pero este caso no se da en todos los sectores, además, estas líneas no son consideradas desde el punto de vista estratégico.
- Se puede concluir por tanto que la estructura de operación actual de Santiago no se parece ni a la de troncal-alimentador ni hub&spoke, de la manera en la que se describe en capítulos anteriores, ya que se puede cubrir el 96% de los pares origen destino sin necesidad de transbordos. Por lo tanto, se puede decir que la estructura actual de operación se parece más a las líneas directas, según la zonificación del modelo basado en centros.

Un punto relevante a destacar es que, desde el punto de vista estratégico la estructura actual de operación en Santiago es directa, debido a que al considerar macrozonas las líneas que prevalecen en la modelación son troncales. Sin embargo, no se puede descartar que se opere actualmente con una estructura de buses troncales y alimentadores distinto al con el cual se trabaja, con alimentadores que sirven viajes dentro de un mismo sector de una macrozona para realizar acercamiento a las líneas troncales, donde los servicios troncales son directos.

7.3. Comparación Estructuras Óptimas y Forma de Operación Actual

En la sección anterior se muestran algunas de las características del sistema actual de operación de Transantiago. Con estos elementos es posible contrastar los resultados encontrados en este trabajo con la manera actual de operar los buses y metro. Sin embargo, la comparación no es sencilla, ya que los resultados de esta memoria consideran un sistema que se compone únicamente de buses, mientras que el sistema actual opera con buses y metro, éste último comportándose como una tecnología distinta de mayor capacidad que los buses y mayor velocidad de servicio. Además, existe una diferencia de la demanda considerada en ambos casos, ya que para la modelación realizada no se consideran los viajes intra-zonales, mientras que Transantiago sí las considera al momento de establecer flotas y frecuencias de operación.

En la presente sección se compara la forma de operación actual del sistema de transporte público de Santiago, con los resultados obtenidos al encontrar las estructuras que minimizan el costo de los operadores más el de los usuarios. Dentro de los elementos a comparar se tienen los tamaños de buses considerados en cada caso, plazas totales, costos diarios, la estructura de líneas y frecuencias en punta mañana para algunos pares origen destino de ejemplo.

Como se menciona anteriormente, la comparación de las estructuras óptimas encontradas con la forma de operación actual tiene como dificultad el hecho de que poseen diferentes tecnologías, dado que Transantiago opera con metro además de los buses. El sistema de metro se asemeja a líneas troncales de alta capacidad con velocidades mayores que los buses. De este modo es posible encontrar un factor de equivalencia entre trenes de metro y buses. Este valor se obtiene de dividir el tamaño promedio de los trenes de metro (1,045 [pax/tren]) y el tamaño promedio de los buses (102.7 [pax/bus]), obtenidos del Informe de Gestión 2015-2016 (DTPM, 2017). Al hacer este cociente se obtiene que un tren promedio equivale a 10.2 veces un bus de tamaño promedio (bus-eq), este dato será relevante para poder realizar la comparación incluyendo el sistema de metro.

En la Tabla 7.3 se muestra la comparación de tipos de vehículos utilizados por el Transantiago con las líneas exclusivas cuando se optimiza punta mañana de manera aislada y se adapta para fuera de punta, además de cuando se diseña para fuera de punta y se adapta para punta mañana, ésta última es la que genera menos costos diarios. En esta tabla se muestra la flota total para operar en el día,

que corresponde a la misma flota que se utiliza en punta mañana, debido a que es este periodo el que determina la cantidad de vehículos.

Es necesario notar que en la Tabla 7.3, en la columna Transantiago, se tiene los valores de la flota operacional en punta mañana, es decir, el resultado mostrado se obtiene al multiplicar la flota total de buses y metro por el porcentaje de flota operacional, el cual es 92.6% para buses y 98.9% para metro. Esta conversión es necesaria debido a que la flota obtenida en la modelación realizada no considera flota en mantenimiento, ya que se calcula directamente la flota necesaria para operar.

De la Tabla 7.3 se puede ver que, al optimizar las frecuencias para las líneas exclusivas en punta mañana de manera aislada, no se utilizan buses articulados, ya que no se necesita tanta capacidad de carga. Además, al diseñar para fuera de punta y adaptar punta mañana, que es la mejor forma encontrada de diseñar el sistema, se tiene que solo son necesarios buses de 9 metros, con capacidad máxima de 50 pasajeros. Por lo tanto, un primer comentario con respecto al modelo actual es el uso de buses articulados que presentan menores costos de operadores por pasajero, pero tiempos de espera elevados para los usuarios, debido a que circulan con menor frecuencia para mantener la misma capacidad. Con respecto a la distribución de tamaños de bus en la flota, se puede notar que es necesario que los buses sean de menor tamaño, ya que el tamaño predominante en las estructuras óptimas son los buses de 9 metros. Sin embargo, se debe tener presente que si se agrega restricción de capacidad de vías esto podría variar, aumentando la cantidad de buses de mayor tamaño en el resultado de la modelación.

Tabla 7.3: Comparación flota operacional Transantiago, punta mañana óptimo y adaptado

Vehículo	Transantiago		Punta mañana óptimo		Punta mañana adaptado	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
Buses Chicos	972	15.3%	5216	65.4%	8558	100%
Buses Medianos	3859	60.9%	2761	34.6%	-	-
Buses Grandes	1298	20.5%	-	-	-	-
Trenes	184	2.9%				
Otros Buses	25	0.4%	-	-	-	-
Total	6338		7977		8558	

(Fuente: Informe de Gestión 2015 -2016 y Elaboración Propia)

Además, es necesario recordar que a pesar de que los trenes representen el 2.9% de los vehículos con los que opera Transantiago, la capacidad aportada al sistema es mucho mayor, debido a que un tren promedio representa 10.2 veces un bus de tamaño promedio a los utilizados. Ahora bien, para comparar la capacidad entre las estructuras óptimas y la forma de operación actual se calcula la cantidad de plazas de cada sistema para punta mañana, las cuales se obtienen como la sumatoria de la multiplicación de la capacidad por la cantidad de buses de cada tamaño.

Para poder comparar la cantidad de plazas de ambos sistemas es necesario notar que Transantiago opera servicios de buses que recorren exclusivamente un sector de una macrozona (alimentadores),

los cuales no son considerados en la modelación realizada, ya que solo considera líneas troncales (recorren más de un sector de una macrozona). Es por esto que la cantidad de plazas de los buses de Transantiago se obtienen del Consolidado de Archivos Geográficos de Rutas (DTPM, 2017), ignorando los recorridos alimentadores según la zonificación adoptada, para que la cantidad de plazas de estas líneas no afecten la comparación.

En la Tabla 7.4 se muestra la cantidad de plazas de Transantiago, separado en buses y metro, donde los buses corresponden a las plazas de las líneas troncales y metro a la cantidad de plazas disponibles multiplicado por el porcentaje de flota operacional en punta mañana. De esto se puede ver que el metro aporta con aproximadamente la mitad de capacidad que aportan los buses. Además, se puede ver que la cantidad de plazas obtenidas al diseñar para fuera de punta y adaptar para punta mañana es significativamente menor a la cantidad de plazas del sistema actual. Lo anterior se puede justificar por la forma de tratar el tamaño de bus en el proceso de optimización, el cual se asume igual a la cantidad de pasajeros máxima que lleva cada bus, por lo tanto, si se considerara el tamaño de buses reales que circularían si este diseño se implementase, el número de plazas debiese aumentar. Sin embargo, la cantidad de plazas de Transantiago debería ser siempre mayor, ya que, a pesar de haber filtrado los recorridos alimentadores, se tiene que los recorridos troncales del sistema actual también satisfacen parte de la demanda de los viajes intra-zonales por lo que cierta cantidad de plazas está destinada a los pasajeros que realizan este tipo de viajes.

Tabla 7.4: Comparación cantidad de Plazas punta mañana, sistema actual (2016-2017) y mejor diseño encontrado

Sistema	Plazas	
Transantiago	Buses Troncales	449,851
	Metro	192,290
	Total	642,141
Punta mañana adaptado	Buses Troncales	347,689

(Fuente: Elaboración Propia)

Luego, otra comparación que se puede realizar es contrastar el costo de operación de Transantiago, incluyendo metro y buses troncales, con los costos de operación de la mejor manera de diseñar encontrada. Por un lado, el costo operacional diario de Metro se obtiene del Reporte de Sostenibilidad 2016 (Metro de Santiago, 2017), donde se muestra el costo operacional anual y éste se transforma a costo diario dividiendo por 365, entendiendo que este costo es para un día promedio, no exclusivamente días laborales. Por otro lado, el costo de los buses se obtiene calculando la cantidad de buses-km recorridos en un día normal, ignorando los recorridos alimentadores por las mismas razones mencionadas anteriormente. Luego, la cantidad de buses-km recorridos de las líneas troncales (obtenida del Consolidado de Frecuencias – Capacidades – Distancias - Velocidades (DTPM, 2017)) se multiplica por el costo de recorrer un kilómetro por un bus, el cual corresponde a \$314,57 (Librium, 2013), el que se transforma a valor del 2016 para ser consistentes. Finalmente, el costo de operación al diseñar para fuera de punta y adaptar para punta mañana se obtiene directamente de la modelación presentada en el capítulo anterior.

En la Tabla 7.5 se muestra el resultado del cálculo de los costos de Transantiago, separando buses y metro, junto con el costo de operación diario de la mejor forma de operar encontrada al optimizar para fuera de punta y adaptar para punta mañana. De esta tabla se puede observar que el costo de operación de Transantiago se divide en dos partes similares entre buses y metro, a pesar de que la diferencia entre plazas era mayor (buses aportaban el doble de capacidad que metro); esto indica

que una plaza en metro es más cara de operar que una plaza en bus. Además, se tiene que el costo que se obtiene al adaptar punta mañana es similar al costo de los buses troncales y a la mitad del costo total de operación de Transantiago. Esta diferencia notoria se explica por el metro, que es una tecnología más cara de operar y por el hecho de que los recorridos troncales también llevan viajes que son intra-zonales. Además, el sistema actual no es el óptimo, por lo que es de esperarse que el costo de la mejor manera de diseñar encontrada en este trabajo sea menor al costo del sistema actual.

Tabla 7.5: Comparación costos de operación diario, sistema actual (2016-2017) y mejor diseño encontrado

Sistema	Costo Operación Diario[US]	
Transantiago	Buses Troncales	633,595
	Metro	619,571
	Total	1,253,166
Punta mañana adaptado	Buses Troncales	580,206

(Fuente: Elaboración Propia)

Con respecto a la estructura de líneas con la que opera Transantiago, de acuerdo con lo mostrado en la sección anterior se puede notar que, bajo la visión estratégica del modelo basado en centros, las líneas troncales son directas, ya que no se necesita hacer transbordos en el 96% de los pares origen destino. Este tipo de estructura es de las que presenta menor costo para ambos periodos en la minimización de costos de operadores y usuarios realizada para punta mañana y fuera de punta por separado, ya que no está basada en transbordos. Por lo tanto, se puede decir que el sistema no está alejado del óptimo encontrado en este sentido.

Luego, se comparan las frecuencias y pasajeros transportados de Transantiago en punta mañana para tres pares origen destino relevantes en cuanto al valor de buses por hora (mínimo y máximos) obtenidos en los resultados al diseñar para fuera de punta y adaptar para punta mañana, utilizando líneas exclusivas. Cabe destacar que se distingue entre frecuencia de buses y de metro de los servicios que conectan el par origen destino, siendo estos recorridos no exclusivos para ese par origen destino, ya que son todos los servicios que conectan de alguna manera el par de nodos independiente de su recorrido antes o después.

Las frecuencias de buses son obtenidas del Consolidado de Archivos Geográficos de Rutas (DTPM, 2017), mientras que los servicios que conectan cada para origen destino se obtienen de los archivos .csv obtenidos en el proceso detallado en la sección anterior, mientras que las frecuencias de cada línea de metro por sentido se obtienen de los archivos de GTFS vigente (DTPM, 2018), cuyo detalle para punta mañana se encuentra en la Tabla 7.6. En esta tabla se tiene la frecuencia de trenes por hora por línea y sentido en punta mañana, según el horario definido para este trabajo. Ahora bien, como la modelación asume sólo el uso de buses se muestra también la frecuencia de metro en buses equivalentes, la cual se obtiene multiplicando la frecuencia en trenes por hora por 10,2, que es la cantidad de veces que un tren promedio tiene la capacidad de un bus promedio (detallado al comienzo de esta sección).

Tabla 7.6: Frecuencias actuales Metro de Santiago, punta mañana

Línea	Sentido		Frecuencia [tren/hr]	Frecuencia [bus-eq/hr]
1	Ida	Oriente	23	236
	Vuelta	Poniente	21	209
2	Ida	Sur	15	150
	Vuelta	Norte	16	162
4	Ida	Sur	12	118
	Vuelta	Norte	12	126
4A	Ida	Poniente	14	142
	Vuelta	Oriente	14	142
5	Ida	Oriente	17	177
	Vuelta	Poniente	20	209

(Fuente: GTFS vigente y Elaboración Propia)

En la Tabla 7.7 se muestran las frecuencias actuales del Transantiago (para buses y metro en buses equivalentes) para tres pares OD relevantes en el sentido más cargado, lo cual se obtuvo al separar en forma manual los servicios en cada sentido y obtener el sentido con mayor frecuencia para cada caso. En el primer par OD se tiene que el sentido más cargado es de poniente a oriente, en el segundo caso se tiene que el sentido con más frecuencia es el sentido sur-norte, el tercer caso al no existir recorrido directo se obtiene el sentido más cargado de la demanda real, el cual es norte-sur. Luego, se muestra la frecuencia de las estructuras exclusivas y directas, cabe destacar que se presentan los resultados de las estructuras directas optimizadas debido a que se muestra que es la estructura más similar al sistema actual, por lo que los resultados son comparables. Con respecto a las exclusivas, las frecuencias presentadas son las frecuencias que se obtienen al diseñar para fuera de punta y adaptar para punta mañana, la cual tiene el menor costo diario, las cuales al ser exclusivas solo una línea conecta cada par origen destino. Además, se presentan las frecuencias de las líneas directas, donde al igual que los servicios de Transantiago representa la suma de las frecuencias de todos los servicios que conectan de alguna manera el par de nodos, independiente de su recorrido.

De la Tabla 7.7 se puede ver que las frecuencias de Transantiago para el primer par origen destino es mayor que las líneas exclusivas, mientras que en comparación con los resultados de las líneas directas las frecuencias de buses más metro son menores. En el segundo caso, las frecuencias en buses equivalentes son parecidas (entre total Transantiago, exclusivas y directas). Ahora bien, para el caso de la línea que conecta la periferia del Nor-Oriente con el subcentro del Sur-Poniente en la actualidad no existe un recorrido directo, mientras que la frecuencia de las líneas exclusivas y directas es bastante pequeña, por lo que se infiere que no hay gran cantidad de pasajeros que se vean afectados.

Tabla 7.7: Comparación frecuencias punta mañana Transantiago, líneas exclusivas y directas, para tres pares OD relevantes

Par OD	Frecuencia buses [bus/hr]	Frecuencia Metro [bus-eq/hr]	Total Transantiago [bus-eq/hr]	Frecuencia Óptima [bus/hr]	
				Exclusivas	Directas
SCNor-Oriente CBD	212	236	448	298	927
PSur-Oriente CBD	205	126	331	343	380
PNor-Oriente SCSur-Poniente	No existe directo	No existe directo	No existe directo	4.4	6.4

(Fuente: Consolidado de Archivos Geográficos de Rutas, GTFS vigente y Elaboración Propia)

Luego, en la Tabla 7.8 se presenta la cantidad de pasajeros que llevan los servicios que conectan cada par origen destino en una hora en el sentido más cargado. Las cifras de buses y metro se calculan con los datos de tamaño medio de buses (102.7 [pax/bus]) y de trenes de metro (1,045 [pax/tren]). Los resultados de las líneas exclusivas y directas se obtienen del proceso de modelación realizado. De esta tabla se puede notar que la demanda del sentido más cargado de cada par origen destino está representada por los pasajeros transportados por las líneas exclusivas, luego, el hecho que no exista recorrido directo para el último par solo afecta a 35 pasajeros. Se tiene que la diferencia de pasajeros transportados entre la operación actual de Santiago y las líneas directas se debe a que los recorridos de los servicios son diferentes por lo que pueden servir a diferentes pares origen destino, además de que la demanda intra-zonal no está considerada en la modelación realizada en este trabajo y los servicios troncales se ven afectados por estos viajes.

Tabla 7.8: Comparación pasajeros punta mañana Transantiago, líneas exclusivas y directas, para tres pares OD relevantes

Par OD	Pasajeros buses [pax/hr]	Pasajeros Metro [pax/hr]	Total Transantiago [pax/hr]	Pasajeros Óptimos [pax/hr]	
				Exclusivas	Directas
SCNor-Oriente CBD	21,776	24,167	45,943	13.390	59.895
PSur-Oriente CBD	21,057	12,898	33,955	17.134	27.881
PNor-Oriente SCSur-Poniente	No existe directo	No existe directo	No existe directo	35	262

(Fuente: Elaboración Propia)

Cabe destacar que como en la operación de Transantiago se realizan paradas en nodos intermedios los servicios satisfacen también pares intermedios o pares más alejados, como en el caso de los servicios que conectan la periferia del Sur-Oriente con el CBD. Este caso se muestra en la Figura 7.4, donde se puede ver que existen líneas que conectan la periferia del Sur-Oriente con la periferia del Poniente, pasando por el CBD, por lo que no se puede determinar cuál es el tramo más cargado de esos servicios que da como resultado esas frecuencias, debido a que las frecuencias de Transantiago no están optimizadas necesariamente para la demanda de este par origen destino. Es por esto que la comparación no se puede realizar directamente con los resultados de las líneas exclusivas, ya que la forma de operación se parece a las directas. Además, es necesario recordar que Transantiago transporta pasajeros que realizan viajes dentro de un mismo sector de una

macrozona, viajes que no son considerados bajo la visión estratégica. Es por lo anterior que la comparación de las frecuencias no se puede realizar directamente, ya que se tienen muchos factores involucrados que exceden el alcance del análisis.

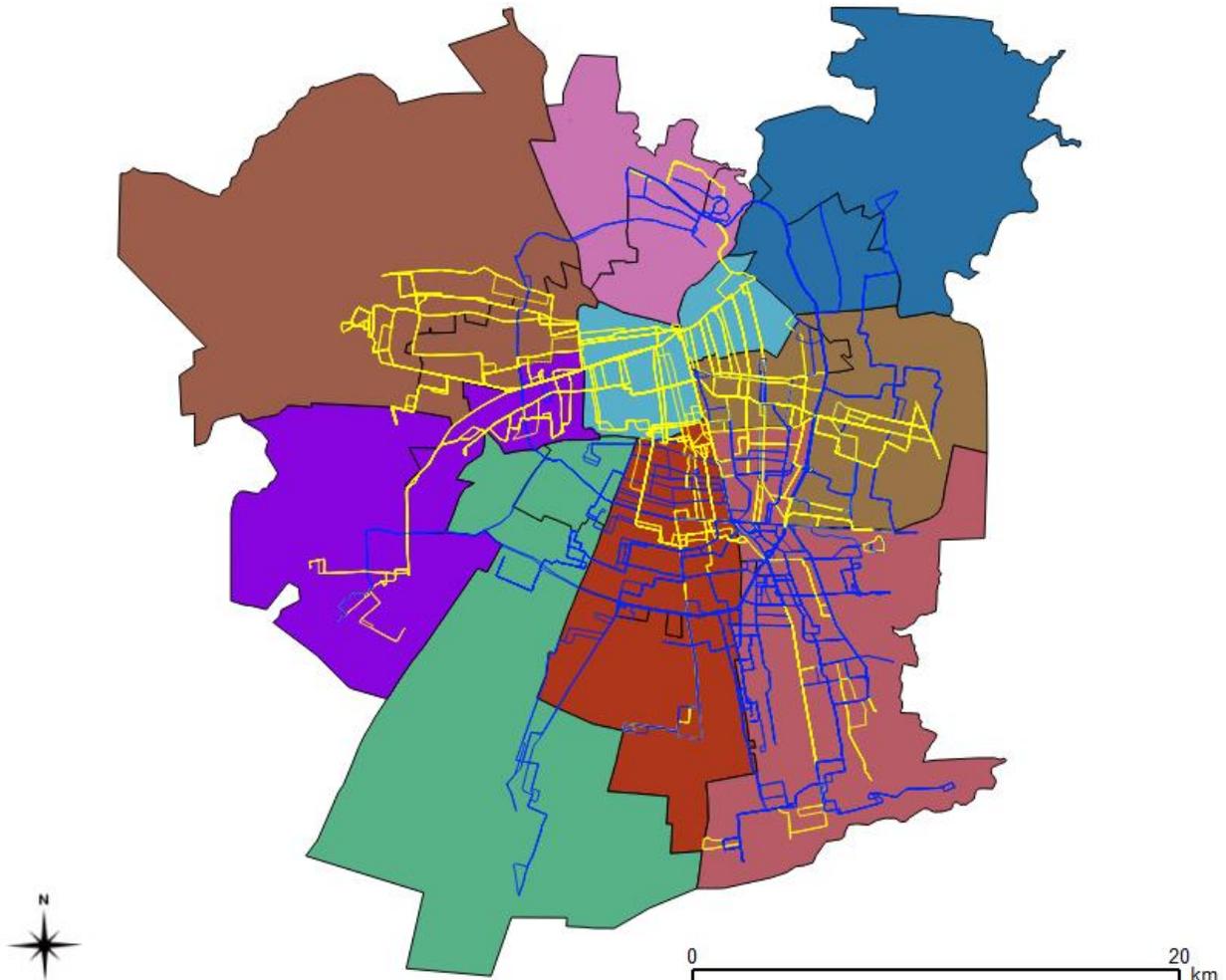


Figura 7.4: Ejemplo selección (amarillo) líneas Transantiago para el par PSur-Oriente – CBD

(Fuente: Consolidado de Archivos Geográficos de Rutas y Elaboración Propia)

Finalmente, como conclusión de la comparación realizada se tiene que, para acercar el sistema actual a los resultados obtenidos en los procesos de optimización y adaptar la flota es necesario disminuir los tamaños de los buses, pero cumpliendo la factibilidad física (que puedan circular los buses en las calles). Luego, con respecto a la comparación realizada de plazas y costos operacionales de los buses troncales más metro, se tiene que el sistema actual cuenta con más plazas y un mayor costo operacional en contraste con la mejor forma de operar encontrada, lo cual se justifica por diferencia en las tecnologías consideradas y la demanda intra-zonal existente que afecta a los recorridos troncales.

Además, no se puede concluir acerca de la frecuencia, debido a la diferencia en las demandas consideradas en ambos casos, pero la demanda del sistema actual debiese aumentar al disminuir el tamaño de los buses. Por otro lado, la estructura de líneas no debiese cambiar, ya que se basa en los recorridos directos, lo que no quiere decir que los pasajeros en el sistema actual no requieran transbordar, debido a que son directos de acuerdo con la zonificación adoptada del modelo basado

en centros. Todo lo anterior suponiendo que se desea minimizar el costo de los operadores y usuarios por igual, sin restricción presupuestaria como se muestra en Jara-Díaz y Gschwender (2009).

Capítulo 8 : Conclusión

8.1. Síntesis

Este trabajo de título se motiva en que el diseño de un sistema de transporte público depende de la forma de la ciudad y de la estructura de la demanda, pero la estructura de demanda varía a lo largo del día, por lo que diseñar para punta mañana, como se realiza habitualmente, no es evidentemente ventajoso. Con el fin de saber si es mejor diseñar para hora punta y adaptar las líneas (frecuencias y tamaños de embarque) para fuera de punta o viceversa, se estudió Santiago aplicado al modelo basado en centros propuesto por Fielbaum et al. (2017). La principal conclusión de esta memoria es que la mejor forma de operar el transporte público de la ciudad de Santiago es diseñando la flota y tamaños de buses para fuera de punta optimizando los costos totales y luego adaptar las frecuencias de las líneas para punta mañana. De esta forma se tienen los menores costos totales diarios, operando con líneas exclusivas en ambos periodos, con buses de baja capacidad.

En primer lugar, se definió la estructura topológica y de demanda de Santiago. Se describió Santiago con 8 zonas más el CBD, además de las distancias entre nodos con datos de viajes reales en el sistema de transporte público. Luego, con esto se logró determinar la cantidad de viajes que se realizan entre cada par origen destino, para punta mañana y fuera de punta. Cabe destacar que ambas estructuras fueron consideradas asimétricas para rescatar de mejor manera lo observado para ambos periodos en Santiago. Con esto, la ciudad quedó representada con 8 zonas (con periferia y subcentro) más el centro de trabajo (CBD), donde el CBD es el mayor atractor de viajes para ambos periodos.

Luego, considerando cuatro estructuras de líneas (exclusivas, directas, hub&spoke y troncal-alimentador) se optimizó el valor de recursos consumidos (VRC) correspondiente al costo de los operadores más el de los usuarios para cada periodo por separado. Al realizar esto se obtuvo que la mejor estructura, que tiene menor costo por periodo, son las líneas exclusivas tanto para punta mañana como para fuera de punta. Esta conclusión se mantiene para todos los valores de costo por transbordo, incluso cuando es nulo, es decir, que debido a la distribución de viajes las estructuras estratégicas basadas en transbordos no son adecuadas y no tiene relación con el valor de la penalidad por transbordo. Además, se realizaron análisis de sensibilidad modificando el tiempo de viaje, de manera que incluya el número de calles que representa cada arco (manteniéndose las exclusivas con menor costo en ambos periodos) y agregando la fracción del intervalo de llegada real, el cual es mayor un medio (donde las directas tienen menor costo en punta mañana y las exclusivas en fuera de punta).

Del proceso anterior, se rescataron las flotas resultantes del proceso de optimización y se clasificaron en distintos tipos de buses, de acuerdo con el tamaño de embarque. Con la flota resultante al diseñar para un periodo se adaptaron las frecuencias del otro periodo de tal manera que la proporción de buses utilizados fuera la misma que la de esta flota, para que la vida útil de todos los buses sea la misma. Al realizar este proceso para ambos periodos, resultó que diseñar para punta mañana y adaptar para fuera de punta tiene mayor costo total diario (usuarios y operadores) que adaptar para punta mañana la flota óptima obtenida para fuera de punta, lo que demuestra que el periodo fuera de punta tiene mayor relevancia a lo largo del día que los periodos punta. Este resultado se mantuvo al cambiar las categorías de buses, cambiar levemente la duración

de cada periodo (aumentando en una hora el periodo punta) y la restricción en la compra de nuevos buses, por lo que el resultado es robusto.

Luego, se analizó la forma de operación actual de Santiago, de donde se obtiene que las líneas troncales son directas, ya que existen 96% pares de nodos del modelo basado en centros unidos con al menos un servicio directamente, lo que no implica que exista una baja tasa de transbordos en el sistema actual. Dentro de la comparación se considera la flota, plazas, costos operacionales y frecuencias de Transantiago actual y lo encontrado en la mejor forma de diseñar y adaptar la flota, al hacer esto se tiene que los tamaños de buses utilizados actualmente son mayores a los tamaños obtenidos de los resultados encontrados, ya que al diseñar para fuera de punta y adaptar se utilizan únicamente buses de 9 metros, mientras que Transantiago utiliza solo el 16% de este tipo de bus. Además, al comparar plazas y costos operacionales, se tiene que el sistema actual cuenta con mayor cantidad de plazas y casi el doble de costo operacional en comparación a los resultados obtenidos de diseñar para fuera de punta y adaptar a punta mañana en líneas exclusivas. Finalmente, se tiene que las frecuencias actuales (bus más metro) no se pueden comparar directamente, debido a la cantidad de factores involucrados, como la existencia de viajes intra-zonales que no son considerados en el análisis estratégico, pero sí existen en el sistema actual.

8.2. Discusión

Teniendo en cuenta que el diseño apropiado del sistema de transporte público de una determinada ciudad depende de la estructura de la ciudad y de la estructura y volumen de viajes, se puede concluir que definir de manera adecuada la estructura topológica de Santiago juega un papel fundamental en los resultados obtenidos. Por esta razón se decide establecer la estructura geométrica y de demanda de manera asimétrica. Mientras que las distancias entre las distintas divisiones (periferias, subcentros y CBD) se define también con datos reales mediante la distancia media de viajes (euclidiana) entre cada zona. De esta forma se representa a Santiago de manera simplificada para la modelación, pero fiel para representar el fenómeno de manera adecuada.

Otro aspecto que puede hacer que varíen los resultados encontrados son los parámetros y supuestos utilizados en el proceso de optimización de frecuencias de las diferentes estructuras de líneas. Dentro de los supuestos que se plantean existen algunos que se alejan de lo sucedido en la realidad, como la subida y bajada secuencial o el cálculo del tiempo de espera promedio, sin embargo, son simplificaciones sensatas, dentro de las cuales algunas ayudan a que el proceso de optimización de frecuencias sea más rápido.

En la misma línea de lo anterior, se realizaron dos análisis de sensibilidad levantando supuestos con respecto al cálculo del tiempo de espera, como el número de calles por arco y la fracción del intervalo de llegada. En ambos casos el valor del tiempo de espera aumentó considerablemente, volviéndose más relevante dentro de la función de VRC. Como consecuencia de esto se obtienen frecuencias y flotas mucho más elevadas, y tamaños de embarque más pequeños para las cuatro estructuras de líneas. El hecho de considerar un mayor número de calles por arco (distinto de 1) acerca el modelo a lo sucedido en los sistemas de transporte público actuales, donde no existe una única calle que une dos zonas, sino que existen múltiples calles donde se deben dividir los buses, observándose una frecuencia menor y en consecuencia mayores tiempos de espera.

Con respecto a los resultados encontrados al optimizar las cuatro estructuras estratégicas de líneas para ambos periodos del día de manera aislada, se tiene que las estructuras basadas en transbordos

no son convenientes para niveles de demanda altos como en el caso de Santiago, ni para la distribución de viajes que se presenta, independiente del valor que tenga la penalidad por transbordo. Por lo tanto, las mejores estructuras son las directas y las exclusivas que conectan todos los pares origen destino sin necesidad de abordar un segundo bus, mientras que entre estas dos últimas la mejor para ambos periodos son las líneas exclusivas que presentan menores costos de operación tanto para punta mañana como para fuera de punta.

Respecto a los resultados del proceso de optimización de ambos periodos por separado, existen valores extremos de frecuencias, tiempos de espera y tamaños de embarque que no son factibles de implementar. Para lo anterior se debiesen establecer cotas mínimas y máximas para el caso de las frecuencias y cotas mínimas para el tiempo de espera y el tamaño de embarque. Aplicar esto significa que los resultados de la optimización varíen para todas las estructuras de líneas, por lo que no se tiene certeza de que el resultado de la estructura con menor costo total se mantenga, aunque es probable que así sea, ya que son pocas las líneas que se verían afectadas en cada estructura de líneas.

Además, respecto a la hipótesis planteada al inicio sobre que las estructuras óptimas, frecuencias y tipos de buses serán diferentes para cada periodo del día, se tiene que la estructura con menor costo total para ambos periodos es la exclusiva, pero sí existen diferencias significativas en las frecuencias y tipos de bus. Las frecuencias en punta mañana son mayores y se utilizan buses de mayor capacidad en comparación a los resultados obtenidos en fuera de punta, lo cual es consistente con la mayor demanda existente en ese periodo.

Finalmente, un punto relevante es que al diseñar para fuera de punta y adaptar la flota para punta se obtienen menores costos tanto para operadores como para los usuarios en comparación con la otra forma de diseñar. Sin embargo, los costos operacionales son mayores, es decir, la diferencia se tiene en un ahorro significativo en el costo de capital. Esto puede deberse a la simplificación realizada al adaptar la flota (la cual se explica en la sección 6.1), donde se asume que todos los buses resultantes de la optimización del periodo fuera de punta son ahora de 50 pasajeros de tamaño máximo, sin importar el tamaño de embarque que tenían y con el cual se calculó el costo de capital para el periodo fuera de punta optimizado. Es decir, por ejemplo, un bus que tenía tamaño de 20 pasajeros por bus se utiliza ahora para llevar 50 pasajeros por bus y el costo de capital extra no se agrega al nuevo costo de operadores en punta mañana. Es importante notar que en el caso de que el costo de capital de diseñar para fuera de punta y adaptar la flota para punta mañana fuese el mismo valor que cuando se diseña para punta, sigue teniendo un menor costo diario diseñar para fuera de punta y adaptar, solo que esta vez los costos de los operadores aumentaría y el de los usuarios disminuiría.

8.2. Extensiones

A partir de lo realizado surgen varias maneras de profundizar los temas tratados. En primer lugar, se tiene que se utiliza el modelo basado en centros donde cada nodo cubre una gran cantidad de superficie de distintas comunas. A partir de esto, surge como extensión investigar dentro de los nodos, que tienen áreas grandes, y de esta manera ver cómo se resuelve el transporte al interior de los puntos. Además, debido a que cada arco de la red representa varias calles, es interesante realizar el proceso de adaptar la flota de un periodo a otro considerando el número de calles por arco (v) en el cálculo del tiempo de espera promedio, tal como se muestra en el análisis de sensibilidad del Capítulo 5. Esto debido a que las líneas exclusivas siguen presentando el menor costo total y se

podrá analizar si en ese caso sigue siendo mejor basar el diseño en el periodo fuera de punta y adaptar los buses a punta mañana.

Como se menciona en la discusión, si se desea hacer el modelo factible, se deben imponer cotas mínimas y máximas en los valores de las frecuencias, tamaños de bus y tiempos de espera. De esta manera, surge como investigación futura optimizar nuevamente las frecuencias de las cuatro estructuras de líneas para punta y fuera de punta, de manera de saber si las líneas exclusivas siguen presentando el costo total más bajo en ambos periodos y de ser así adaptar la flota.

Luego, otra línea de investigación futura es realizar un modelo de optimización conjunto para ambos periodos del día, hora punta y fuera de punta, aplicado al modelo basado en centros, ya que el problema está resuelto para el caso de una línea simple (Jara-Díaz et al., 2017). También es interesante aplicar ese modelo a la ciudad de Santiago para ver qué tan cerca están los resultados obtenidos en este trabajo donde se diseña para un periodo y se adaptan las frecuencias de cada línea de buses para el otro.

Otra posible extensión a este trabajo es que se puede realizar un análisis más detallado de la comparación de los resultados encontrados con la operación actual de Santiago, comparando por ejemplo las frecuencias actuales con las directas optimizadas, pero esta vez considerando el flujo intra-zonal en la modelación. Tal vez analizar los flujos de metro por separado, incorporando un nuevo modo con menores tiempos de subida y bajada, con mayor velocidad, con capacidad real de los trenes, etc. Otra manera de incluir metro es realizar el mismo trabajo anterior, pero asumiendo que el metro ya existe, que opera como lo hace actualmente y en base a esto optimizar el sistema de buses, lo que dará como resultado una menor flota de buses que la obtenida al asumir que el sistema de transporte público opera únicamente con buses.

Bibliografía

- Badia, H., Estrada, M., & Robusté, F. (2016). Bus network structure and mobility pattern: A monocentric analytical approach on a grid street layout. *Transportation Research Part B*, 93 37-56.
- Ceder, A., & Wilson, N. H. (1986). Bus network design. *Transportation Research Part B*, 20(4), 331-344.
- Chang, S. K., & Schonfeld, P. M. (1991). Multiple period optimization of bus transit systems. *Transportation Research Part B*, 25(6) 453-478.
- Currie, G. (2005). The demand performance of bus rapid transit. *Journal of Public Transportation*, 8 (1), 3.
- Daganzo, C. F. (2010). Structure of competitive transit networks. *Transportation Research Part B*, 44(4) 434-446.
- DTPM. (01 de Noviembre de 2017). *Archivos Geográficos de Servicios asociados a Paraderos - Formato Shape (28/10/17)*. Obtenido de Directorio de Transporte Público Metropolitano: www.dtpm.cl
- DTPM. (01 de Noviembre de 2017). *Consolidado de Archivos Geográficos de Rutas (28/10/17)*. Obtenido de Directorio de Transporte Público Metropolitano: www.dtpm.cl
- DTPM. (8 de Agosto de 2017). *Consolidado de Frecuencias - Capacidades - Distancias - Velocidades (08/07/17)*. Obtenido de Directorio de Transporte Público Metropolitano: www.dtpm.cl
- DTPM. (2017). *Informe de Gestión 2015 - 2016*. Santiago, Chile.: Directorio de Transporte Público Metropolitano.
- DTPM. (11 de Agosto de 2017). *Matrices origen-destino, subidas y bajadas, mayo 2016 (a partir de software ADATRAP desarrollado por Universidad de Chile - Directorio de Transporte Público Metropolitano)*. Obtenido de Directorio de Transporte Público Metropolitano: www.dtpm.cl
- DTPM. (11 de Enero de 2018). *GTFIS Vigente desde 24-11-2017*. Obtenido de Directorio de Transporte Público Metropolitano: www.dtpm.cl
- Espinoza, D. (2017). Condiciones para operar una línea de bus con frecuencia similar en periodos punta y fuera de punta. (*Tesis de Maestría*), Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- Fielbaum, A. (2014). Identificación y análisis de estructuras óptimas de líneas de transporte público en redes representativas con demanda paramétrica. (*Tesis de Maestría*), Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- Fielbaum, A., Jara-Díaz, S., & Gschwender, A. (2016). Optimal public transport networks for a general urban structure. *Transport Research Part B*, 94, 298-313.

- Fielbaum, A., Jara-Díaz, S., & Gschwender, A. (2017a). A parametric description of cities for the normative analysis of transport systems. *Networks and Spatial Economics*, 17(2), 343-365.
- Fielbaum, A., Jara-Díaz, S., & Gschwender, A. (2017b). Transit lines structures on a general parametric city: the role of heuristics. *No publicado*.
- García-Martínez, A., Cascajo, R., Jara-Díaz, S. R., Chowdhury, S., & Monzon, A. (2018). Transfer penalties in multimodal public transport networks. *Transportation Research Part A*.
- Gschwender, A., Jara-Díaz, S. R., & Bravo, C. (2016). Feeder-trunk or direct lines? Economies of density, transfer costs and transit structure in an urban context. *Transport Research Part A*, 88, 209-222.
- Jansson, J. O. (1980). A simple bus line model for optimisation of service frequency and bus size. *Journal of Transport Economics and Policy*, 53-80.
- Jara-Díaz, S., & Gschwender, A. (2003b). Towards a general microeconomic model for the operation of public transport. *Transport Reviews*, 23(4) 453-469.
- Jara-Díaz, S., & Gschwender, A. (2009). The effect of financial constraints on the optimal design of public transport services. *Transportation*, 36(1) 65-75.
- Jara-Díaz, S., & Gschwender, A. (2003a). From the single line model to the spatial structure of transit services: corridors or direct? *Journal of Transport Economics and Policy (JTEP)*, 37(2) 261-277.
- Jara-Díaz, S., Fielbaum, A., & Gschwender, A. (2017). Optimal fleet size, frequencies and vehicle capacities considering peak and off-peak periods in public transport. *Transportation Research Part A*, 106 65-74.
- Jara-Díaz, S., Munizaga, M., & Olguín, J. (2013). The role of gender, age and location in the values of work behind time use patterns in Santiago, Chile. *Papers in Regional Science*, 92(1), 87-102.
- Librium. (2013). *Informe de Avance 2: Estudio para la actualización de la estructura de costos y evaluación del equilibrio económico de los contratos de operadores de vías del sistema de transporte público de Santiago mediante buses*. Santiago: Gobierno de Chile.
- Metro de Santiago. (2013). *Memoria Anual 2012*. Santiago: Gobierno Corporativo Metro de Santiago.
- Metro de Santiago. (2017). *Reporte de Sostenibilidad 2016*. Santiago: Gobierno Corporativo Metro de Santiago.
- Ministerio de Desarrollo Social. (2017). *Precios Sociales Vigentes Año 2017*. Chile: Gobierno de Chile.
- Mohring, H. (1972). Optimization and scale economies in urban bus transportation. *The American Economic Review*, 62(4) 591-604.
- SECTRA. (2014). *Encuesta Origen Destino de Viajes 2012*. Santiago, Chile: SECTRA-Universidad Alberto Hurtado.

- Tirachini, A., Camus, L., & Cruz, D. (2016). Modelación de tiempos de detención de buses en paraderos de Santiago y Valparaíso-Viña del Mar. *Ingeniería de Transporte*, Vol. 19, No. 2.
- Walker, J. (2012). *Human transit: How clearer thinking about public transit can enrich our communities and our lives*. Washington: Island Press.
- Yang, H., Ye, M., Tang, W. H., & Wong, S. C. (2005). A multiperiod dynamic model of taxi services with endogenous service intensity. *Operations research*, 53(3) 501-515.

Anexos

A. Frecuencias, Flota y Tamaño de Embarque por Línea

En el presente anexo se muestran los resultados por línea de las distintas estructuras de líneas para punta mañana y fuera de punta. De izquierda a derecha, se muestra la flota, el tamaño de embarque, la frecuencia y la cantidad de pasajeros que abordan el servicio en una hora (afluencia).

Con respecto a la notación utilizada en las líneas presentadas en las siguientes tablas, se tiene por ejemplo que la línea “PNorteSCOriente” corresponde al servicio que une a la periferia de la zona Norte con el subcentro de la zona Oriente, mientras que la línea “SCPonienteCBD” corresponde al servicio que une al subcentro de la zona Poniente con el CBD.

Tabla A.1: Detalles por línea, líneas directas, punta mañana

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
PNor-OrienteSCNor-Poniente	83.4	31.9	38.4	3,244
PNor-OrienteSCNorte	26.8	15.5	19.9	671
PNor-OrienteSCPoniente	81.4	33.5	34.2	3,101
PNor-OrienteSCSur	76.4	32.7	32.6	2,903
PNor-OrienteSCSur-Oriente	175.8	13.3	98.1	3,801
PNor-OrienteSCSur-Poniente	13.6	32.5	6.4	441
PNor-PonienteSCNor-Oriente	129.6	126.4	60.4	9,525
PNor-PonienteSCNorte	116.3	46.0	79.3	4,582
PNor-PonienteSCOriente	66.1	94.8	35.4	4,098
PNor-PonienteSCPoniente	58.0	37.7	56.8	2,782
PNor-PonienteSCSur	58.1	84.0	26.0	3,047
PNor-PonienteSCSur-Oriente	61.5	90.7	27.2	3,192
PNor-PonienteSCSur-Poniente	24.1	66.3	14.9	1,247
PNorteSCNor-Oriente	54.0	44.7	45.5	2,374
PNorteSCNor-Poniente	62.3	30.0	45.6	1,966
PNorteSCOriente	49.5	40.8	31.1	2,021
PNorteSCPoniente	210.7	28.1	105.8	6,953
PNorteSCSur	231.9	27.6	118.3	8,095
PNorteSCSur-Oriente	48.9	40.3	24.6	1,733
PNorteSCSur-Poniente	22.4	30.3	12.9	665
POrienteSCNor-Oriente	117.7	49.8	105.5	5,705
POrienteSCNor-Poniente	192.0	23.5	106.7	5,875
POrienteSCNorte	51.9	33.5	31.2	1,829
POrienteSCPoniente	275.7	24.5	137.2	8,181
POrienteSCSur	255.6	25.6	129.2	8,006
POrienteSCSur-Oriente	71.8	35.7	62.9	2,683
POrienteSCSur-Poniente	22.6	28.4	12.9	593

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
PPonienteSCNor-Oriente	95.7	126.7	41.3	6,656
PPonienteSCNor-Poniente	49.0	26.5	50.1	2,214
PPonienteSCNorte	45.1	86.2	21.7	2,487
PPonienteSCOriente	46.9	88.3	23.1	2,605
PPonienteSCSur	87.5	31.7	57.8	3,200
PPonienteSCSur-Oriente	45.9	94.6	18.8	2,373
PSurSCNor-Oriente	105.0	126.9	44.0	7,158
PSurSCNor-Poniente	38.7	76.4	16.9	1,849
PSurSCNorte	44.2	98.1	20.4	2,600
PSurSCOriente	60.1	100.9	28.4	3,596
PSurSCPoniente	51.1	47.8	31.4	2,194
PSurSCSur-Oriente	54.0	53.8	45.1	2,960
PSurSCSur-Poniente	16.3	23.9	15.8	469
PSur-OrienteSCNor-Oriente	369.7	96.5	173.3	20,031
PSur-OrienteSCNor-Poniente	60.2	102.1	22.8	3,096
PSur-OrienteSCNorte	61.4	106.6	24.6	3,358
PSur-OrienteSCOriente	133.9	28.7	89.0	3,165
PSur-OrienteSCPoniente	78.4	107.1	27.4	4,109
PSur-OrienteSCSur	93.7	36.2	63.3	3,415
PSur-OrienteSCSur-Poniente	45.5	50.9	23.7	1,941
PSur-PonienteSCNor-Oriente	136.8	67.3	66.4	6,237
PSur-PonienteSCNor-Poniente	98.9	27.7	62.3	3,198
PSur-PonienteSCNorte	58.0	51.5	31.4	2,200
PSur-PonienteSCOriente	64.1	52.6	35.7	2,430
PSur-PonienteSCPoniente	10.3	17.7	9.3	191
PSur-PonienteSCSur	55.5	23.7	57.2	1,559
PSur-PonienteSCSur-Oriente	52.0	49.3	33.3	2,439
PNor-PonienteCBD	405.8	37.4	317.0	14,117
PNorteCBD	105.9	19.0	102.1	2,973
POrienteCBD	76.2	18.7	71.9	1,891
PPonienteCBD	325.4	40.9	224.0	11,370
PSurCBD	198.5	39.8	130.4	6,649
PSur-OrienteCBD	568.0	56.3	305.2	20,776
PSur-PonienteCBD	156.6	25.2	126.5	3,519
SCNorteCBD	10.7	7.8	18.3	239
SCOrienteCBD	28.7	7.3	53.8	644
SCPonienteCBD	16.9	15.0	18.1	327
SCSur-OrienteCBD	10.0	11.2	10.7	175
SCNor-OrienteSCNor-Poniente	258.7	31.9	169.3	9,502
SCNor-OrienteSCNorte	40.9	15.5	57.0	1,038
SCNor-OrienteSCPoniente	428.9	33.5	246.8	15,101
SCNor-OrienteSCSur	319.2	32.7	187.2	11,333

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
SCNor-OrienteSCSur-Oriente	113.1	13.3	97.0	2,468
SCNor-PonienteSCPoniente	22.3	10.9	47.8	859
SCNor-PonienteSCSur	81.7	22.9	49.6	2,392
SCNor-PonienteSCSur-Oriente	169.9	18.7	101.9	4,213
SCNorteSCOriente	104.4	12.2	93.0	2,938
SCNorteSCSur-Oriente	145.4	15.0	95.6	3,656
SCNorteSCSur-Poniente	21.6	10.7	16.8	457
SCOrienteSCSur-Poniente	32.6	8.2	26.6	613
SCPonienteSCSur	17.5	12.6	17.4	467
SCPonienteSCSur-Oriente	101.0	27.8	53.7	2,814

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla A.2: Detalles por línea, líneas exclusivas, punta mañana

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
PNor-OrienteCBD	67.1	41.1	47.5	1,953
PNor-OrienteSCNor-Oriente	37.0	24.4	58.2	1,419
PNor-OrienteSCNor-Poniente	21.0	17.8	10.0	177
PNor-OrienteSCNorte	17.1	14.4	12.9	185
PNor-OrienteSCOriente	18.8	15.6	15.9	249
PNor-OrienteSCPoniente	23.3	19.6	10.1	197
PNor-OrienteSCSur	20.8	17.7	9.1	161
PNor-OrienteSCSur-Oriente	31.7	25.3	17.8	450
PNor-OrienteSCSur-Poniente	9.1	7.9	4.4	35
PNor-PonienteCBD	254.6	61.5	196.5	12,083
PNor-PonienteSCNor-Oriente	140.1	63.5	68.0	4,320
PNor-PonienteSCNor-Poniente	50.4	27.8	91.7	2,552
PNor-PonienteSCNorte	90.5	48.0	62.1	2,981
PNor-PonienteSCOriente	69.0	44.2	38.3	1,690
PNor-PonienteSCPoniente	56.3	34.5	55.9	1,927
PNor-PonienteSCSur	52.9	38.0	26.7	1,013
PNor-PonienteSCSur-Oriente	63.1	43.5	28.8	1,251
PNor-PonienteSCSur-Poniente	27.3	22.0	17.5	386
PNorteCBD	102.6	45.5	97.5	4,430
PNorteSCNor-Oriente	47.9	32.4	41.0	1,327
PNorteSCNor-Poniente	43.9	31.4	32.4	1,015
PNorteSCNorte	43.7	24.7	94.7	2,343
PNorteSCOriente	32.8	25.7	21.1	541
PNorteSCPoniente	27.8	22.7	15.4	350
PNorteSCSur	32.1	25.7	16.7	430
PNorteSCSur-Oriente	31.0	25.0	15.9	399

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
PNorteSCSur-Poniente	14.6	12.6	8.6	108
POrienteCBD	123.8	48.7	114.7	5,583
POrienteSCNor-Oriente	111.4	47.6	100.4	4,780
POrienteSCNor-Poniente	25.1	20.7	14.2	293
POrienteSCNorte	28.2	22.8	17.3	395
POrienteSCOriente	40.9	24.8	76.4	1,898
POrienteSCPoniente	31.9	25.7	16.1	414
POrienteSCSur	35.3	27.4	21.1	578
POrienteSCSur-Oriente	62.5	37.5	55.0	2,065
POrienteSCSur-Poniente	15.1	13.0	8.7	113
PPonienteCBD	201.4	61.9	137.6	8,524
PPonienteSCNor-Oriente	106.1	58.1	47.8	2,778
PPonienteSCNor-Poniente	36.1	25.9	37.5	972
PPonienteSCNorte	43.8	32.8	23.6	775
PPonienteSCOriente	48.2	35.5	24.6	874
PPonienteSCPoniente	54.1	28.1	105.5	2,970
PPonienteSCSur	32.0	25.0	21.5	538
PPonienteSCSur-Oriente	45.7	34.3	22.4	769
PPonienteSCSur-Poniente	32.0	24.1	29.9	722
PSur-OrienteCBD	414.1	77.4	221.5	6,078
PSur-OrienteSCNor-Oriente	289.5	77.2	138.0	17,134
PSur-OrienteSCNor-Poniente	58.5	42.4	22.9	10,655
PSur-OrienteSCNorte	62.6	44.0	26.0	971
PSur-OrienteSCOriente	150.4	58.5	98.5	1,144
PSur-OrienteSCPoniente	66.6	46.0	27.2	5,764
PSur-OrienteSCSur	82.2	46.1	55.8	1,251
PSur-OrienteSCSur-Oriente	103.4	43.5	111.9	2,569
PSur-OrienteSCSur-Poniente	28.2	23.0	15.1	4,869
PSur-PonienteCBD	127.6	52.0	101.2	347
PSur-PonienteSCNor-Oriente	87.2	51.5	43.1	5,266
PSur-PonienteSCNor-Poniente	31.2	24.7	20.0	2,222
PSur-PonienteSCNorte	40.7	31.0	22.4	492
PSur-PonienteSCOriente	45.6	33.6	25.8	695
PSur-PonienteSCPoniente	43.3	30.1	38.7	866
PSur-PonienteSCSur	55.0	33.8	56.3	1,164
PSur-PonienteSCSur-Oriente	36.9	28.1	24.3	1,900
PSur-PonienteSCSur-Poniente	12.4	10.3	23.0	683
PSurCBD	156.9	59.3	102.5	236
PSurSCNor-Oriente	114.5	60.7	49.9	3,031
PSurSCNor-Poniente	34.9	27.7	17.1	474
PSurSCNorte	51.3	37.5	24.6	923
PSurSCOriente	61.2	40.9	34.7	1,421

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
PSurSCPoniente	35.3	27.3	22.2	606
PSurSCSur	54.9	29.9	89.2	2,665
PSurSCSur-Oriente	57.9	36.3	49.6	1,797
PSurSCSur-Poniente	32.0	24.0	31.2	749
SCNor-OrienteCBD	272.7	40.3	332.1	21,286
SCNor-OrienteSCNor-Poniente	131.8	54.3	86.1	5,020
SCNor-OrienteSCNorte	51.1	27.1	70.0	2,228
SCNor-OrienteSCOriente	51.9	23.9	89.1	2,789
SCNor-OrienteSCPoniente	169.9	61.1	97.5	6,506
SCNor-OrienteSCSur	142.9	57.4	83.7	5,252
SCNor-OrienteSCSur-Oriente	102.2	37.8	85.7	4,655
SCNor-OrienteSCSur-Poniente	36.7	25.2	24.9	708
SCNor-PonienteCBD	200.0	42.6	261.6	14,050
SCNor-PonienteSCNorte	51.3	18.8	55.6	2,006
SCNor-PonienteSCOriente	55.3	31.3	43.5	1,647
SCNor-PonienteSCPoniente	59.9	20.3	124.2	4,173
SCNor-PonienteSCSur	54.1	21.3	36.9	1,488
SCNor-PonienteSCSur-Oriente	61.2	30.1	36.6	1,607
SCNor-PonienteSCSur-Poniente	21.5	10.1	20.9	375
SCNorteCBD	124.5	29.0	201.9	9,777
SCNorteSCOriente	38.5	19.8	34.4	1,016
SCNorteSCPoniente	61.9	27.0	44.8	1,942
SCNorteSCSur	76.5	35.8	50.9	2,503
SCNorteSCSur-Oriente	50.8	21.7	33.4	1,284
SCNorteSCSur-Poniente	25.7	12.7	20.2	432
SCOrienteCBD	119.8	28.2	212.1	9,783
SCOrienteSCPoniente	66.0	34.3	44.5	1,968
SCOrienteSCSur	62.4	33.1	53.2	2,139
SCOrienteSCSur-Oriente	61.7	22.5	99.0	3,607
SCOrienteSCSur-Poniente	21.1	13.7	17.3	304
SCPonienteCBD	273.1	51.1	279.7	17,188
SCPonienteSCSur	51.0	20.3	50.6	1,840
SCPonienteSCSur-Oriente	63.7	31.5	40.7	1,807
SCPonienteSCSur-Poniente	23.1	11.3	40.1	733
SCSur-OrienteCBD	182.6	42.4	188.0	13,833
SCSur-OrienteSCSur-Poniente	22.8	12.6	23.3	11,622
SCSur-PonienteCBD	50.8	23.2	71.2	437
SCSurCBD	221.0	48.2	234.6	2,351
SCSurSCSur-Oriente	53.7	24.9	93.3	2,940
SCSurSCSur-Poniente	28.2	11.0	64.9	1,354

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla A.3: Detalles por línea, troncal-alimentador, punta mañana

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
PNor-OrienteSCNor-Oriente	86.3	36.2	133.4	4,826
PNor-PonienteSCNor-Poniente	363.8	43.8	644.5	28,203
PNorteSCNorte	143.2	36.1	303.5	10,943
POrienteSCOriente	216.1	41.0	393.0	16,119
PPonienteSCPoniente	243.8	40.7	465.3	18,922
PSurSCSur	251.3	44.4	399.2	17,744
PSur-OrienteSCSur-Oriente	718.6	58.3	766.2	44,704
PSur-PonienteSCSur-Poniente	188.0	40.8	331.3	13,524
SCNor-OrienteSCNor-Poniente	158.0	122.8	97.2	15,755
SCNor-OrienteSCPoniente	466.3	69.5	261.9	28,077
SCNor-OrienteSCSur	488.8	59.2	281.2	27,042
SCNor-OrienteSCSur-Poniente	195.0	44.9	128.5	10,071
SCNor-PonienteSCOriente	64.2	95.0	47.0	6,556
SCNor-PonienteSCSur-Oriente	1063.3	35.4	625.0	48,704
SCNorteSCOriente	42.6	53.8	35.6	3,920
SCNorteSCSur	418.3	41.4	273.3	21,038
SCNorteSCSur-Oriente	211.7	45.6	135.2	11,588
SCNorteSCSur-Poniente	109.1	34.2	82.8	5,544
SCOrienteSCPoniente	558.2	42.7	368.7	28,707
SCOrienteSCSur-Poniente	117.2	34.7	92.4	6,213
Circida	791.9	41.7	162.2	30,948
Circvuelta	1586.1	76.8	326.4	54,519

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla A.4: Detalles por línea, hub&spoke, punta mañana

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
PNor-OrienteSCSur-Poniente	221.1	47.3	102.0	11,998
PNor-PonienteSCSur-Oriente	940.3	67.5	418.0	43,591
PNorteSCSur	629.8	34.5	317.4	29,686
POrienteSCPoniente	984.9	33.4	483.3	43,933
PPonienteSCOriente	495.9	78.4	241.4	32,814
PSurSCNorte	628.7	60.9	291.3	34,941
PSur-OrienteSCNor-Poniente	1474.2	79.5	562.5	65,415
PSur-PonienteSCNor-Oriente	499.8	56.6	238.9	30,321
CBDSNorte-Oriente	393.7	47.3	482.5	28,240
CBDSNorte	14.0	11.7	23.7	552
Circida	774.1	42.7	158.4	30,948
Circvuelta	1657.4	73.4	341.5	54,519

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla A.5: Detalles por línea, líneas directas, fuera de punta

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
PSurSCOriente	1.6	43.3	0.8	68
PNorteSCNor-Poniente	1.3	12.3	1.0	24
SCOrienteSCSur-Poniente	1.8	12.7	1.5	48
SCSurSCSur-Oriente	0.9	7.2	1.7	19
PSur-PonienteCBD	3.6	23.6	2.9	96
PNor-PonienteSCOriente	6.3	38.2	3.4	267
PPonienteSCNor-Oriente	12.0	54.8	5.3	642
PSurSCNor-Oriente	19.7	50.7	8.4	874
SCNor-PonienteSCSur	14.2	16.3	8.7	345
PPonientePSur	18.8	21.9	8.9	569
PSur-PonienteSCSur-Oriente	19.5	14.6	12.8	387
SCPonienteSCSur	12.8	8.5	13.0	219
PNor-OrientePPoniente	40.3	61.0	13.7	2,425
PNor-OrientePSur-Oriente	38.4	58.7	14.0	1,568
PNortePOriente	30.8	43.4	14.2	1,977
PNor-OrientePSur-Poniente	38.4	39.2	14.2	1,674
PNor-OrientePSur	43.0	58.6	14.4	2,241
SCOrienteSCSur-Oriente	9.3	3.9	15.6	111
PNor-PonientePPoniente	24.1	29.4	15.9	961
PNortePPoniente	41.2	47.9	16.1	2,411
PNor-OrientePNorte	29.1	18.9	16.2	890
PNortePSur	42.3	46.7	16.2	2,155
PNorteSCNor-Oriente	19.0	13.3	16.3	485
PPonienteSCSur	24.8	14.2	16.6	663
POrientePPoniente	43.5	50.5	16.8	2,589
PNor-PonientePSur-Poniente	37.0	22.3	17.5	1,016
SCNor-OrienteSCNorte	12.8	7.7	18.0	211
PNor-OrientePOriente	31.4	32.8	18.1	1,151
PSur-PonienteSCNor-Oriente	37.6	31.9	18.4	1,318
PNortePSur-Poniente	43.3	32.4	18.7	1,886
SCSur-PonienteCBD	13.0	6.9	18.8	180
PPonientePSur-Poniente	33.0	24.2	20.3	1,075
POrientePSur-Poniente	48.6	34.0	20.8	2,137
PSurSCSur-Oriente	24.5	15.7	21.0	719
SCNorteSCOriente	24.3	16.5	21.4	1,031
PSurPSur-Oriente	45.5	32.0	21.8	1,717
PNor-PonientePOriente	52.4	42.5	21.9	2,666
PNor-PonienteSCNor-Oriente	46.4	41.9	22.2	2,023
POrientePSur	58.8	49.7	22.3	3,074
PSurSCPoniente	36.1	15.1	22.6	835
SCSurCBD	21.1	14.4	23.3	490

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
SCNorteSCSur-Oriente	37.1	15.2	24.3	998
SCPonienteSCSur-Oriente	46.0	19.9	24.5	1,140
PSur-OrientePSur-Poniente	60.3	18.2	24.8	1,406
PSurPSur-Poniente	40.6	22.9	25.8	1,143
PNortePSur-Oriente	77.6	43.2	26.5	3,423
PPonienteSCNor-Poniente	26.1	13.5	27.0	893
PNor-OrientePNor-Poniente	75.1	48.4	27.4	3,845
PNor-OrienteSCSur-Oriente	50.4	18.1	28.0	1,383
SCNor-PonienteSCOriente	36.2	13.5	28.4	1,140
SCNor-OrienteCBD	22.8	15.2	28.9	862
POrienteSCNor-Oriente	31.7	20.5	29.0	914
SCNor-OrienteSCSur-Oriente	35.3	9.1	30.4	654
SCNor-PonienteCBD	23.2	9.7	31.8	459
PNor-PonienteSCPoniente	31.9	17.1	31.8	924
SCNor-OrienteSCNor-Poniente	53.0	21.2	34.8	1,805
SCOrienteSCSur	50.8	19.3	35.0	1,710
SCNor-PonienteSCSur-Oriente	59.8	11.5	36.1	1,154
SCNorteSCSur	55.8	20.1	37.1	1,862
SCSur-OrienteCBD	35.0	9.1	37.7	566
PNor-PonientePSur	112.1	33.8	39.9	4,035
POrientePSur-Oriente	90.5	27.2	44.2	2,957
PSur-OrienteSCNor-Oriente	93.0	38.3	44.6	2,894
PSur-OrienteCBD	82.4	29.3	44.7	2,249
SCNorteSCPoniente	69.6	20.5	45.2	2,432
SCOrienteSCPoniente	70.6	21.2	47.3	2,546
PNor-PonientePNorte	91.1	29.6	47.9	2,663
PPonientePSur-Oriente	171.8	43.5	51.6	6,872
PNor-PonienteCBD	67.7	26.5	53.0	2,255
SCNor-PonienteSCPoniente	25.0	6.9	54.3	605
SCPonienteCBD	57.9	15.2	61.5	1,438
SCNor-OrienteSCSur	105.7	21.9	62.1	3,696
PNor-PonientePSur-Oriente	208.9	32.6	66.7	6,828
SCNor-OrienteSCPoniente	188.1	22.9	108.1	6,902

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla A.6: Detalles por línea, líneas exclusivas, fuera de punta

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
PNor-OrienteCBD	63.6	22.2	49.6	1,892
PNor-OrientePNor-Poniente	21.4	12.1	9.0	139
PNor-OrientePNorte	12.4	6.1	7.8	70
PNor-OrientePOriente	23.0	12.5	14.9	243
PNor-OrientePPoniente	13.9	7.8	5.5	56
PNor-OrientePSur	17.4	10.4	6.7	85
PNor-OrientePSur-Oriente	30.3	16.1	12.6	270
PNor-OrientePSur-Poniente	11.9	7.1	5.1	44
PNor-OrienteSCNor-Oriente	44.8	14.4	77.1	2,033
PNor-OrienteSCNor-Poniente	16.5	8.1	8.6	103
PNor-OrienteSCNorte	13.9	6.3	11.6	117
PNor-OrienteSCOriente	21.1	10.7	19.6	291
PNor-OrienteSCPoniente	20.2	10.2	9.6	140
PNor-OrienteSCSur	15.2	6.0	7.4	82
PNor-OrienteSCSur-Oriente	29.9	13.4	18.5	387
PNor-OrienteSCSur-Poniente	8.8	5.8	4.7	30
PNor-PonienteCBD	122.4	37.6	104.5	5,414
PNor-PonientePNorte	42.5	16.2	24.9	719
PNor-PonientePOriente	14.1	7.0	6.8	70
PNor-PonientePPoniente	16.8	7.1	12.6	153
PNor-PonientePSur	12.9	5.7	5.6	53
PNor-PonientePSur-Oriente	19.1	8.4	6.9	96
PNor-PonientePSur-Poniente	14.2	5.7	7.5	78
PNor-PonienteSCNor-Oriente	38.4	22.3	20.9	540
PNor-PonienteSCNor-Poniente	38.2	12.6	76.9	1,765
PNor-PonienteSCNorte	32.1	19.9	24.7	527
PNor-PonienteSCOriente	23.7	13.9	14.7	246
PNor-PonienteSCPoniente	34.2	17.7	37.8	836
PNor-PonienteSCSur	17.9	11.7	10.0	129
PNor-PonienteSCSur-Oriente	26.2	14.0	13.3	248
PNor-PonienteSCSur-Poniente	10.8	5.0	7.7	61
PNorteCBD	64.5	24.3	68.0	2,437
PNortePOriente	10.1	4.2	5.4	40
PNortePPoniente	9.5	4.1	4.6	32
PNortePSur	10.7	5.3	4.7	37
PNortePSur-Oriente	14.2	5.6	5.6	58
PNortePSur-Poniente	9.8	4.3	4.9	35
PNorteSCNor-Oriente	19.3	9.9	18.5	252
PNorteSCNor-Poniente	27.1	16.7	22.2	409
PNorteSCNorte	35.4	11.4	84.8	1,788

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
PNorteSCOriente	15.6	7.0	11.1	125
PNorteSCPoniente	19.5	11.0	12.0	168
PNorteSCSur	15.6	7.7	9.0	102
PNorteSCSur-Oriente	19.7	7.8	11.2	160
PNorteSCSur-Poniente	9.4	5.7	6.1	42
POrienteCBD	70.4	25.8	72.4	2,747
POrientePPoniente	10.0	4.9	4.5	33
POrientePSur	18.6	10.4	9.1	123
POrientePSur-Oriente	42.8	19.4	23.4	676
POrientePSur-Poniente	12.4	6.8	6.1	55
POrienteSCNor-Oriente	35.7	20.1	36.2	825
POrienteSCNor-Poniente	13.0	5.9	8.1	77
POrienteSCNorte	13.5	7.0	9.2	90
POrienteSCOriente	35.3	12.9	72.9	1,567
POrienteSCPoniente	20.3	11.9	11.4	166
POrienteSCSur	17.2	8.2	11.4	142
POrienteSCSur-Oriente	32.7	14.8	32.1	701
POrienteSCSur-Poniente	8.0	4.5	5.1	30
PPonienteCBD	77.7	31.8	59.2	2,493
PPonientePSur	9.3	4.2	5.0	34
PPonientePSur-Oriente	13.0	5.7	4.9	47
PPonientePSur-Poniente	28.4	13.0	19.6	390
PPonienteSCNor-Oriente	34.2	15.2	17.2	410
PPonienteSCNor-Poniente	22.1	11.1	25.6	392
PPonienteSCNorte	19.3	8.3	11.6	161
PPonienteSCOriente	24.8	9.8	14.1	249
PPonienteSCPoniente	45.6	16.2	98.1	2,460
PPonienteSCSur	16.6	7.3	12.4	148
PPonienteSCSur-Oriente	27.2	10.1	14.8	286
PPonienteSCSur-Poniente	16.7	9.6	17.4	206
PSur-OrienteCBD	139.4	46.2	82.7	2,008
PSur-OrientePSur-Poniente	16.6	7.0	7.7	4,968
PSur-OrienteSCNor-Oriente	65.6	35.8	35.0	93
PSur-OrienteSCNor-Poniente	19.1	8.5	8.4	1,351
PSur-OrienteSCNorte	25.3	15.4	11.7	116
PSur-OrienteSCOriente	49.7	22.2	36.4	210
PSur-OrienteSCPoniente	36.7	23.2	16.7	1,148
PSur-OrienteSCSur	31.5	18.1	24.0	417
PSur-OrienteSCSur-Oriente	70.6	24.6	84.5	510
PSur-OrienteSCSur-Poniente	12.1	5.0	7.2	3,114
PSur-PonienteCBD	56.3	25.2	49.8	64
PSur-PonienteSCNor-Oriente	23.3	15.5	12.9	1,655

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
PSur-PonienteSCNor-Poniente	9.9	5.1	7.1	212
PSur-PonienteSCNorte	13.7	9.0	8.4	51
PSur-PonienteSCOriente	16.7	10.6	10.6	84
PSur-PonienteSCPoniente	28.0	17.6	27.8	127
PSur-PonienteSCSur	24.7	15.6	28.3	517
PSur-PonienteSCSur-Oriente	17.9	10.6	13.1	470
PSur-PonienteSCSur-Poniente	11.7	4.8	23.9	168
PSurCBD	69.9	31.1	50.9	199
PSurPSur-Oriente	37.8	14.5	20.4	534
PSurPSur-Poniente	32.6	12.8	23.1	521
PSurSCNor-Oriente	34.6	19.1	16.9	403
PSurSCNor-Poniente	15.3	7.3	8.3	93
PSurSCNorte	21.7	10.8	11.6	181
PSurSCOriente	26.8	11.5	17.0	321
PSurSCPoniente	22.2	12.7	15.5	242
PSurSCSur	34.9	13.3	63.1	1,370
PSurSCSur-Oriente	32.9	11.5	31.3	698
PSurSCSur-Poniente	20.8	13.5	22.5	321
SCNor-OrienteCBD	153.0	26.3	207.1	10,689
SCNor-OrienteSCNor-Poniente	36.3	19.1	26.6	645
SCNor-OrienteSCNorte	23.9	10.6	36.7	594
SCNor-OrienteSCOriente	27.3	11.0	52.6	932
SCNor-OrienteSCPoniente	58.3	26.1	37.4	1,353
SCNor-OrienteSCSur	41.3	21.0	27.1	741
SCNor-OrienteSCSur-Oriente	40.7	15.7	38.4	1,019
SCNor-OrienteSCSur-Poniente	12.4	7.7	9.4	84
SCNor-PonienteCBD	92.9	26.9	135.6	5,413
SCNor-PonienteSCNorte	18.4	7.4	22.5	292
SCNor-PonienteSCOriente	20.8	10.7	18.4	270
SCNor-PonienteSCPoniente	34.1	12.6	79.8	1,635
SCNor-PonienteSCSur	19.4	7.5	14.8	206
SCNor-PonienteSCSur-Oriente	23.6	11.6	15.8	265
SCNor-PonienteSCSur-Poniente	6.3	2.8	6.9	32
SCNorteCBD	72.1	20.4	131.1	4,465
SCNorteSCOriente	19.3	8.2	19.2	262
SCNorteSCPoniente	33.8	12.0	27.3	630
SCNorteSCSur	30.6	13.3	22.8	481
SCNorteSCSur-Oriente	24.0	8.9	17.6	299
SCNorteSCSur-Poniente	8.9	4.5	7.8	51
SCOrienteCBD	73.1	19.7	144.8	4,863
SCOrienteSCPoniente	34.9	14.6	26.3	625
SCOrienteSCSur	25.1	12.0	24.0	417

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
SCOrienteSCSur-Oriente	33.2	11.5	60.0	1,260
SCOrienteSCSur-Poniente	9.4	5.3	8.5	58
SCPonienteCBD	153.0	34.3	173.3	9,143
SCPonienteSCSur	31.3	12.7	34.6	728
SCPonienteSCSur-Oriente	35.7	14.0	25.4	620
SCPonienteSCSur-Poniente	11.2	4.9	21.8	174
SCSur-OrienteCBD	93.2	26.7	107.1	5,648
SCSur-OrienteSCSur-Poniente	11.4	5.6	13.0	4,690
SCSur-PonienteCBD	30.1	14.0	47.3	107
SCSurCBD	106.3	30.8	125.6	921
SCSurSCSur-Oriente	26.9	11.3	52.6	920
SCSurSCSur-Poniente	15.1	6.4	39.0	406

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla A.7: Detalles por línea, troncal-alimentador, fuera de punta

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
PNor-OrienteSCNor-Oriente	97.2	22.0	149.4	5,982
PNor-PonienteSCNor-Poniente	137.2	32.3	242.2	11,074
PNorteSCNorte	83.1	20.8	175.7	6,474
POrienteSCOriente	103.0	25.8	187.4	7,585
PPonienteSCPoniente	99.2	25.3	189.6	7,550
PSurSCSur	106.9	26.3	170.6	7,024
PSur-OrienteSCSur-Oriente	225.1	41.9	240.3	13,672
PSur-PonienteSCSur-Poniente	78.7	24.1	140.4	4,699
SCNor-OrienteSCNor-Poniente	69.5	51.6	43.9	4,988
SCNor-OrienteSCPoniente	205.6	39.7	115.7	11,997
SCNor-OrienteSCSur	162.1	35.1	93.4	8,675
SCNor-OrienteSCSur-Poniente	43.0	34.0	28.2	2,472
SCNor-PonienteSCOriente	39.9	41.9	30.2	2,718
SCNor-PonienteSCSur-Oriente	381.2	27.5	224.1	17,419
SCNorteSCOriente	23.8	34.7	20.2	1,821
SCNorteSCSur	200.1	28.0	131.1	9,578
SCNorteSCSur-Oriente	45.3	41.6	28.8	2,772
SCNorteSCSur-Poniente	39.6	27.7	30.0	2,091
SCOrienteSCPoniente	244.4	31.8	161.2	12,961
SCOrienteSCSur-Poniente	35.9	30.0	28.3	2,009
Circida	376.8	35.0	77.8	11,522
Circvuelta	493.3	50.1	101.9	14,895

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla A.8: Detalles por línea, hub&spoke, fuera de punta

Línea	Flota [Buses]	K [pax]	f [bus/hr]	Y [pax/hr]
PNor-OrienteSCSur-Poniente	167.9	42.6	77.1	9,987
PNor-PonienteSCSur-Oriente	369.2	47.6	164.3	16,811
PNorteSCSur	245.9	29.6	123.6	12,384
POrienteSCPoniente	398.2	24.8	194.9	18,756
PPonienteSCOriente	215.8	45.4	105.4	13,591
PSurSCNorte	290.9	33.1	136.0	13,527
PSur-OrienteSCNor-Poniente	463.4	56.9	177.1	19,857
PSur-PonienteSCNor-Oriente	247.0	28.2	120.0	10,935
CBDS CNor-Oriente	100.2	26.6	124.6	5,726
Circida	389.9	33.8	80.6	11,522
Circvuelta	496.8	49.8	102.6	14,895

(Fuente: Elaboración Propia)