



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

CONDICIONES PARA OPERAR UNA LINEA DE BUS CON FRECUENCIA SIMILAR
EN PERIODOS PUNTA Y FUERA DE PUNTA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN TRANSPORTE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIEGO ANDRÉS ESPINOZA SILVA

PROFESOR GUÍA:
ALEJANDRO TIRACHINI HERNÁNDEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANTONIO GSCHWENDER KRAUSE
CRISTIÁN CORTÉS CARRILLO
RICARDO GIESEN ENCINA

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR
AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN TRANSPORTE
Y AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: DIEGO ANDRÉS ESPINOZA SILVA
FECHA: DICIEMBRE 2017
PROF. GUÍA: SR. ALEJANDRO TIRACHINI HERNÁNDEZ

CONDICIONES PARA OPERAR UNA LINEA DE BUS CON FRECUENCIA SIMILAR EN PERIODOS PUNTA Y FUERA DE PUNTA

Los sistemas de transporte público son utilizados diariamente por millones de personas, quienes además de pagar el valor de la tarifa deben hacer uso de su tiempo (acceso, espera y en vehículo) acrecentando aún más el costo percibido por el usuario. El diseño táctico de un servicio de transporte público es uno de los problemas que más atención ha recibido en la literatura. Sin embargo, la gran mayoría de los estudios considera solo periodos punta, dejando fuera aquellos menos demandados. Esto llama la atención considerando las menores frecuencias observadas por los usuarios en los periodos fuera de punta y con esto los mayores costos percibidos en términos de tiempo, que podrían justificar mayores frecuencias si son incorporados correctamente.

En esta tesis se plantea un modelo microeconómico multiperiodo que considera costos de operadores y usuarios para determinar el valor óptimo de la frecuencia y el tamaño de vehículo que minimicen los costos totales de una línea de bus simple. El modelo se aplica en un escenario con demanda observada y tiempos de viaje estimados para el eje de Santa Rosa, Santiago de Chile. El objetivo es determinar escenarios que inciden en el uso de mayores frecuencias en periodos menos demandados y con esto determinar casos en los que se justifican tener frecuencias similares a la de los periodos punta. Para esto se crean distintos escenarios que permiten determinar el impacto que tiene el nivel de la demanda, la duración de los periodos, el nivel de congestión, entre otros elementos.

Uno de los principales resultados es la respuesta diferente en frecuencia óptima que tienen mercados de baja y alta demanda ante cambios en la afluencia. Mientras en los primeros se observan frecuencias similares entre periodos punta y fuera de punta, en los segundos se justifican mayores disparidades de frecuencia para los mismos cambios en demanda. Esto se debe a los mayores beneficios en tiempo de espera que se observan al aumentar la frecuencia en mercados menos demandados. Por otra parte, se observa que periodos punta más largos tienden a justificar una mayor diferencia de frecuencia entre periodos, ya que mientras la frecuencia de los periodos fuera de punta se mantiene prácticamente constante, un aumento de demanda absoluta en los más demandados provoca un aumento de frecuencia debido al mayor peso relativo de dichas horas. Otro de los principales resultados de este estudio es la mayor diferencia de frecuencia que se observa en la medida que se reduce la congestión. Una medida que aumente la velocidad comercial de los buses tendrá mayor impacto en los periodos más demandados, debido a que es en éstos donde se observa congestión, y por tanto donde se aprecian los mayores aumentos de frecuencia óptima. Además, se analiza el impacto que tiene una estructura de costos rígidas en la tripulación, como también la utilización de intervalos regulares entre buses (en comparación a distribución *poisson*), determinando que el primer caso favorece frecuencias óptimas similares entre periodos.

...and the singer turned and he said to the crowd: let there be rock!
(AC/DC)

Tabla de Contenido

Índice de Tablas	vi
Índice de Ilustraciones	viii
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación	2
1.2.1. Modelos teóricos y principales resultados	2
1.2.2. Frecuencias en la práctica	5
1.3. Objetivos	7
2. Revisión bibliográfica	8
2.1. Modelos de un periodo	8
2.2. Modelos multiperiodo	11
3. Descripción del modelo	17
3.1. Modelación de la demanda	17
3.2. Modelación del tiempo de viaje	18
3.2.1. Tiempo de crucero	18
3.2.2. Demoras en intersección	19
3.2.3. Demoras en paraderos	21
3.3. Estructura de costos	21
3.3.1. Costo de usuarios	21
3.3.2. Costo de operadores	24
3.4. Restricciones	26
3.5. Resumen del modelo	26
4. Aplicación	28
4.1. Características del eje	28
4.2. Tiempo de viaje	29
4.2.1. Generalidades	29
4.2.2. Tiempo de crucero	30
4.2.3. Demoras en intersecciones	31
4.3. Demanda	31
4.3.1. Demanda desagregada	32
4.3.2. Largo promedio de los viajes	33
4.3.3. Perfiles de carga	34

4.4.	Otras consideraciones	35
4.5.	Resumen	36
5.	Resultados	37
5.1.	Caso base	37
5.1.1.	Calibración de costos de administración	37
5.1.2.	Validación de los modelos de tiempo de viaje	38
5.1.3.	Optimización de instancia menor	41
5.1.4.	Optimización: Caso Base	42
5.2.	Efecto de niveles de demanda	46
5.3.	Efecto de la duración de periodos	50
5.4.	Efecto de implementar una medida de prioridad	51
5.5.	Efecto de un P_v sensible al hacinamiento	54
5.6.	Efecto turno de conductores	58
5.7.	Otras consideraciones	59
5.7.1.	Distribución del intervalo entre buses	60
5.7.2.	Sensibilidad al valor del tiempo de espera	61
5.8.	Análisis de costos	62
5.9.	Resumen de resultados	63
6.	Conclusión	65
6.1.	Contribuciones principales	66
6.2.	Líneas futuras de investigación	68
7.	Bibliografía	69
A.	Glosario y valores de parámetros generales	72
B.	Parámetros modelos de tiempo de viaje	74

Índice de Tablas

1.1. Análisis comparativo de distintos modelos multiperiodos.	4
3.1. Características de la instancia de solución del problema.	27
4.1. Periodos considerados en el escenario de aplicación.	30
4.2. Demanda desagregada por dirección y periodo.	33
4.3. Largo promedio de los viajes para cada periodo.	34
4.4. Carga máxima de los tramos por dirección y periodo.	34
4.5. Características de los tipos de buses considerados en el escenario.	36
5.1. Diferencia entre estructura de costos promedio y la del modelo.	38
5.2. Frecuencias observadas y bus utilizado para efectos de comparación.	39
5.3. Comparación tiempos medios de viaje (s/km) con Schneider (2014).	39
5.4. Comparación tiempos de crucero (s/km) con Schneider (2014).	40
5.5. Comparación demoras en intersecciones (s/km) con Schneider (2014).	40
5.6. Comparación demoras en paradero (s/km) con Schneider (2014).	41
5.7. Comparación proceso de optimización con enumeración para dos periodos.	42
5.8. Resultados de frecuencia y tamaño de vehículo para caso base.	43
5.9. Comparación de modelo propuesto y regla de la raíz cuadrada.	46
5.10. Razón de frecuencia y tamaño de bus para distintos nivel de demanda.	46
5.11. Razones de frecuencia para niveles de demanda sin restricciones activa.	47
5.12. Razon de frecuencia a distintas duraciones del periodo PMA.	52
5.13. Resultados de frecuencia a distintos niveles de congestión.	52
5.14. Frecuencias óptimas a distintos niveles de congestión sin restricción activa.	53
5.15. Resultados de escenario con valor constante del tiempo de viaje.	55
5.16. P_v fijando frecuencia de escenario constante en Dirección 1.	55
5.17. Resultados de escenario con valor constante del tiempo de viaje.	56
5.18. Frecuencia óptima para distintos valores de $P_v = Cte$	57
5.19. Turnos para conductores considerados.	58
5.20. Resultados para escenario de turno de conductores.	59
5.21. Frecuencias óptimas utilizando intervalos regulares entre buses.	61
5.22. Resultados a distintos valores del tiempo de espera en periodos punta.	62
5.23. Comparación caso base y escenario con frecuencias similares entre periodos.	63
5.24. Comparación de costos para escenario con frecuencias similares.	64
5.25. Resumen de las implicancias de los distintos escenarios.	64
A.1. Glosario y valores de parámetros generales utilizados.	73

B.1. Valores de parámetros utilizados en modelos de tiempo de viaje.	74
B.2. Número de semáforos coordinados para cada sección y periodo en dirección 1.	75
B.3. Número de semáforos coordinados para cada sección y periodo en dirección 2.	75
B.4. Tiempos de ciclo promedio (s) para cada sección y periodo en dirección 1. .	75
B.5. Tiempos de ciclo promedio (s) para cada sección y periodo en dirección 2. .	76
B.6. Tiempos de verde promedio (s) para cada sección y periodo en dirección 1. .	76
B.7. Tiempos de verde promedio (s) para cada sección y periodo en dirección 2. .	76
B.8. Reducción tiempo de cruceo (s/km) para par sección-periodo en dirección 1.	77
B.9. Reducción tiempo de cruceo (s/km) para par sección-periodo en dirección 2.	77
B.10.Reducción promedio en intersección (s/int) por sección-periodo en dirección 1.	77
B.11.Reducción promedio en intersección (s/int) por sección-periodo en sentido 2.	78
B.12.Parámetro de sobresaturación (s/km) para cada sección-periodo en dirección 1.	78
B.13.Parámetro de sobresaturación (s/km) para cada sección-periodo en dirección 2.	78

Índice de Ilustraciones

1.1. Comparación de distintos BRT a partir de Wright y Hook (2007)	5
1.2. Análisis de distintos recorridos de Transantiago	6
3.1. Modelo del recorrido de bus.	17
3.2. Modelo de probabilidad de detención de un bus por paradero.	20
3.3. Valor del tiempo de viaje.	23
4.1. Análisis de distintos recorridos de Transantiago	29
4.2. Desbalance espacial y temporal de la demanda.	33
4.3. Perfiles de carga (pax/h) para ambas direcciones de estudio.	35
5.1. Gráfico de la función objetivo entorno a la solución óptima para dos periodos.	42
5.2. Gráfico de razón de frecuencia y frecuencia en función de la demanda.	44
5.3. Comparación de los costos totales del sistema a distintos tamaños de buses	45
5.4. Costo de operadores y usuarios a distintos valores de frecuencia.	50
5.5. Cambio de frecuencia (veh/h) a distinta duración (h) de periodos punta.	51

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Los sistemas de transporte son usados diariamente por millones de personas y son vitales para el desarrollo de las ciudades y de las actividades que en ellas se realizan. En particular el transporte público es un eje esencial en la movilidad de la ciudad, ya que existen muchos usuarios cautivos, quienes para viajes largos no tienen otra opción de movilización. El sistema de transporte público de Santiago (Transantiago) tiene un gran costo para el estado, el que ha ido en aumento y no de manera directa con la calidad de servicio que muchos usuarios perciben día a día. Por este motivo es importante contar con un proceso de mejoramiento continuo, que dote al sistema de resiliencia y de las capacidades y competencias necesarias a fin de promover una constante optimización, lo que se traduzca tanto en una mejor calidad de servicio como también en un mejor aprovechamiento de los recursos.

En un proceso de optimización de un sistema de transporte público es importante considerar a los dos actores más importantes: operadores y usuarios. También es esencial tener claro la función objetivo y todos los elementos que influyen en su definición. Los sistemas de transporte tienen tres niveles de planificación, estratégica, táctica y operacional. Sobre las decisiones tácticas de mediano plazo, como por ejemplo la frecuencia de un servicio, se han desarrollado múltiples estudios con el objetivo de minimizar los costos totales; sin embargo, la mayor parte de los estudios publicados analizan condiciones de optimalidad para variables como frecuencia de operación, tamaño de vehículo, densidad de líneas y densidad de paraderos para un solo periodo de operación, mientras que los trabajos que se enfocan en dos o más periodos al mismo tiempo han recibido menos atención.

Esto abre una interesante línea de investigación ya que generalmente en los periodos fuera de punta se provee una frecuencia de operación (veh/h) menor a la de los periodos punta, debido a que los últimos son los que tienen mayor demanda. Sin embargo, esto podría estar ocasionando importantes perjuicios sobre los usuarios en los periodos menos demandados, como mayores tiempos de espera y de viaje, que no son posibles de cuantificar en estudios de

un solo periodo. Dichos costos, considerados correctamente, podrían llegar a justificar una frecuencia mayor que las observadas en la práctica, pudiendo incluso llegar a ser similar o igual a la de los periodos más demandados. Lo anterior se puede incentivar aún más, si se considera que la utilización de un intervalo único a lo largo de la mayor parte del día tiene otros beneficios, como la simplicidad de la información que recibe el usuario, elemento que queda fuera del alcance de esta tesis.

1.2. Motivación

1.2.1. Modelos teóricos y principales resultados

En los estudios multiperiodo de diseño de líneas de buses de transporte público que se han desarrollado no existe claridad bajo qué condiciones o escenarios, más allá de las diferencias en demanda, tienden a justificar una gran disparidad de frecuencia entre los distintos periodos, o qué criterios incentivan utilizar una misma frecuencia a lo largo de todo el día de operación. Estos resultados disimiles se pueden observar en la Tabla 1.1, donde se analizan distintos modelos teóricos multiperiodo, a través de dos indicadores, uno de demanda y otro de frecuencia que se explican a continuación.

La razón de demanda (Ecuación 1.1) de un periodo i se define como la razón entre la demanda por hora del periodo punta (Y_{peak}) ponderada por el largo promedio de los viajes viaje del periodo (l_{peak}), sobre la demanda del periodo i (Y_i) ponderada por el largo promedio de los viajes del periodo (l_i). Se construye de esta manera debido a que para una misma demanda por hora, viajes más largos aumentan la carga del recorrido y con esto la frecuencia requerida para servir dicha afluencia. Por su parte, la razón de frecuencia (Ecuación 1.2) de un periodo i , es la razón entre la frecuencia óptima del periodo punta (f_{peak}) sobre la del periodo i (f_i).

$$\frac{Y_{peak} \left(\frac{pax}{h} \right) \cdot l_{peak}(km)}{Y_i \left(\frac{pax}{h} \right) \cdot l_i(km)} \quad (1.1)$$

$$\frac{f_{peak} \left(\frac{veh}{h} \right)}{f_i \left(\frac{veh}{h} \right)} \quad (1.2)$$

Así, valores altos y bajos en ambas razones implican diferencias de demanda y frecuencias entre periodos, ya sea por un valor mayor en el periodo punta (razón mayor a uno) o en el otro periodo considerado (razón menor a uno).

Jansson (1980) desarrolla varios modelos para la minimización de costos en función de la frecuencia de operación y en éstos considera tanto la utilización de frecuencia diferenciada entre periodos, como la operación con la misma frecuencia a lo largo del día; sin embargo, no es conclusivo en las condiciones de demanda que llevan a que uno u otro caso sea el

más deseable. Otros modelos microeconómicos han encontrado que es óptimo operar con frecuencias similares en periodos punta y fuera de punta (Chang y Schonfeld, 1991; Tirachini, 2012), a pesar de haber diferencias considerables de demanda por hora entre periodos. Por otro lado, hay modelos que sí encuentran diferencias significativas en la frecuencia óptima ante reducciones de demanda en los periodos fuera de punta (e.g., Tirachini, 2014), sin embargo, hay discordancia en los resultados reportados, ya que por ejemplo, diferencias del orden de 40 % en la frecuencia del periodo fuera de punta se asocian a razones de demanda del orden de 3 en Tirachini (2012), mientras que en el caso de Delle Site y Filippi (1998) tales diferencias se justifican cuando la demanda del periodo punta es del orden de 2 veces la del fuera de punta, donde dicha razón significa que, por ejemplo, la demanda del periodo punta es el doble de la del fuera de punta, si en ambos períodos la distancia de viaje se mantiene constante.

Estudio	Supuestos de modelación		Función Objetivo	Supuestos demanda	Razón de demanda		Razón de frecuencias	
	Periodos	Variables ¹			Y_{PMA}/Y_{off}	Y_{PTA}/Y_{off}	f_{PMA}/f_{off}	f_{PTA}/Y_{off}
Jansson (1980)	2	f, K	Minimización de costos totales	Paramétrica	-	-	- ²	-
Chang y Schonfeld (1991)	3	f, g, t	MinC, MaxW, MaxProfit	Paramétrica ³	2,50		1,12	
Delle Site y Filippi (1998) ⁵	3	f, K, f bucle, $t, offset$	Maximizar beneficio neto ⁶	Elástica ⁴	2,52		1,11	
Tirachini (2012)	6	f, S	Minimización de costos totales	Paramétrica ⁷	2,60	2,17	1,63 ⁸	1,45
Tirachini (2014)	6	f, S, K , número de sitios	Minimización de costos totales	Paramétrica	3,07	2,93	1,39	1,39
				Paramétrica	4,11	4,06	2,75	2,75

Tabla 1.1: Análisis comparativo de distintos modelos multiperiodos.

¹ f : frecuencia, K : tamaño de bus, g : espacio entre líneas, t : tarifa, S : espacio entre paradas, $offset$: intervalo entre buses con recorrido completo y bucle.

²Jansson no resuelve su tercer modelo (no tiene solución analítica) por lo que no se reportan resultados.

³Función objetivo de minimizar costo total del sistema.

⁴Función objetivo de maximizar bienestar social (W)

⁵Modelo aplicado a caso hipotético, no obstante los valores de parámetros de oferta se obtienen se un operador de buses de Roma, Italia.

⁶Beneficio neto de usuarios menos el costo de los operadores no cubierto por tarifa.

⁷Delle Site y Filippi desarrollan modelo con demanda elástica, sin embargo también encuentran valores para demanda fija que se presentan en esta tabla.

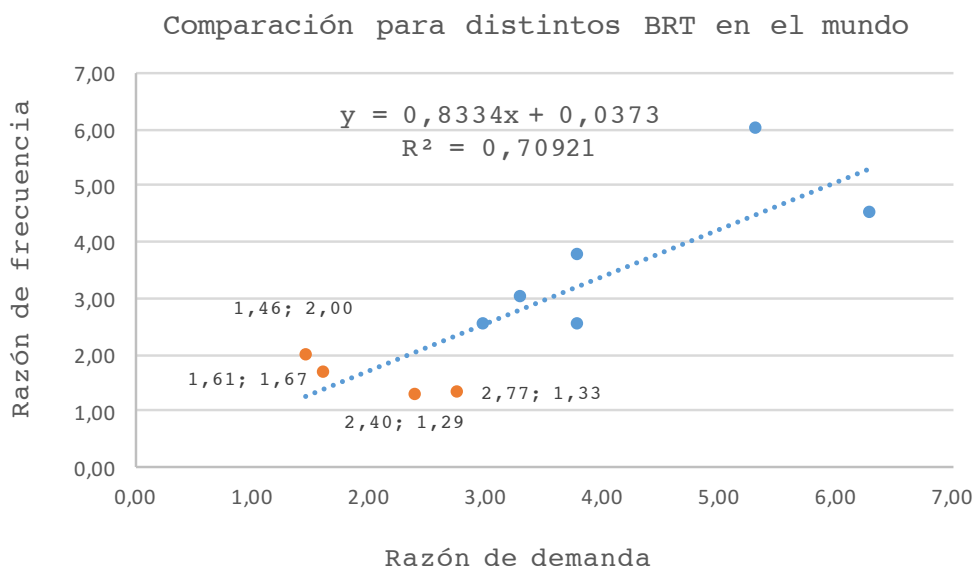
⁸Las frecuencias presentadas son un promedio ponderado de las frecuencias del recorrido completo y bucle (ciclo corto) por sus respectivas demandas.

Estas discrepancias en los resultados obtenidos con modelos de optimización lleva a preguntarse bajo qué condiciones o escenarios se deben utilizar frecuencias similares o distintas entre periodos.

1.2.2. Frecuencias en la práctica

En la práctica actual se observan distintos criterios de fijación de frecuencia para diferentes periodos. En la Figura 1.1 se muestran resultados de la razón entre frecuencia (veh/h) en periodo punta y fuera de punta (f_{peak}/f_{off}), para razones entre demanda (pax/h) en periodos punta y fuera de punta (Y_{peak}/Y_{off}). Aquí se muestra la relación para distintos sistemas Bus Rapid Transit (BRT) alrededor del mundo ⁹. Si bien hay una tendencia notoria a un mayor desbalance en la frecuencia entre periodos mientras mayor es el desequilibrio en la demanda, esta relación es muy variada. Por ejemplo, si se consideran los cuatro valores destacados en naranja de la serie de datos, se encuentra que la frecuencia en el periodo de más demanda es desde 1,3 hasta 2 veces la frecuencia del periodo fuera de punta, mientras la razón de demanda va desde 1,5 a 2,8.

Figura 1.1: Comparación de distintos BRT a partir de Wright y Hook (2007)

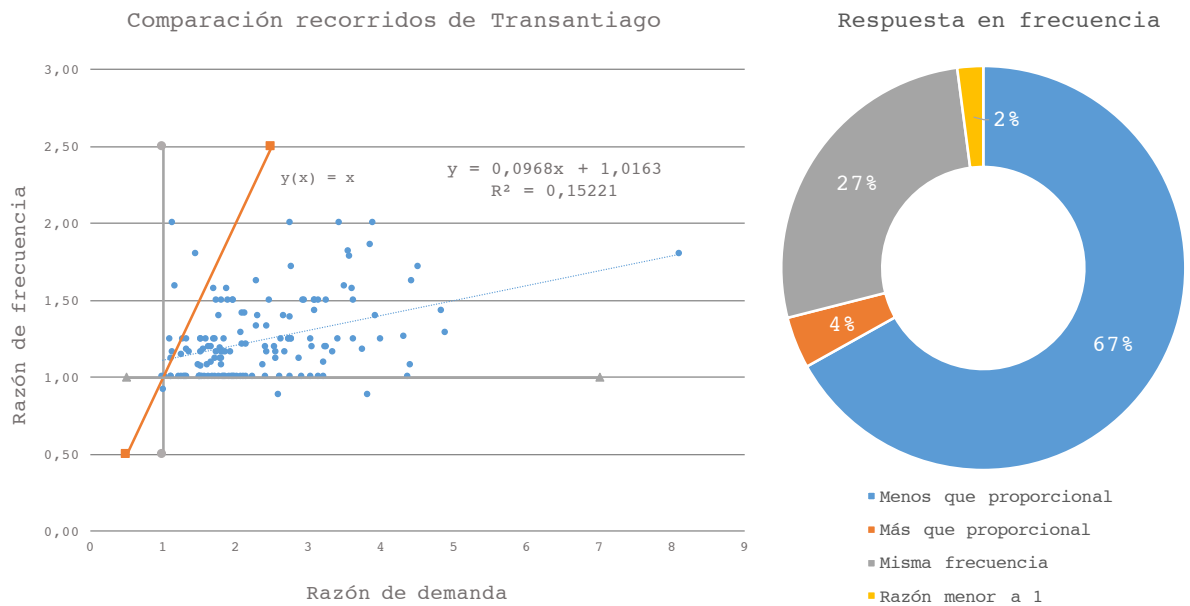


En el caso de Transantiago también se observan distintos criterios para determinar las frecuencias de sus recorridos. En la Figura 1.2 se observan las razones de demanda (ponderada por el largo promedio de los viajes) y de frecuencia programada de 145 recorridos-sentido para un día laboral promedio, utilizando datos de abril de 2013. En ésta figura también se observa una bisectriz (ecuación $y(x) = x$) en naranja, cuyo objetivo es poder facilitar la observación de recorridos-servicios que responden de manera más que proporcional o menos que proporcional a un cambio en la demanda. Los datos utilizados corresponden al Periodo

⁹Datos reportados en Wright y Hook (2007), sistemas BRT de 5 países para los cuales se informa demanda y frecuencia en periodos punta y fuera de punta: Colombia (Transmilenio), Ecuador (Metrovía, Trole, Ecovía, Central Norte), China (Beijing, Hangzhou, Kinming), Corea del Sur (Seul) y Francia (Rouen).

Punta Mañana (PMA), que va desde 06:30 a 8:29, con el Fuera de Punta Mañana (FPMA), de 09:30 a 12:29. En los recorridos considerados no se contemplan zonas pagas ni servicios que hagan uso de éstas, como tampoco recorridos con servicios complementarios, como variantes y expresos, de manera de construir un conjunto de recorridos en los cuales su frecuencia esté respondiendo exclusivamente a la demanda y no haya interferencias producto de la estructura del servicio.

Figura 1.2: Análisis de distintos recorridos de Transantiago



En la Figura 1.2 se observa una gran dispersión de las razones de frecuencia, sin embargo, consistente con la teoría y los distintos BRT del mundo, se aprecia una tendencia creciente, pero débil, a diferenciar la frecuencia entre periodos mientras mayor es la razón de demanda (variable estadísticamente significativa, $t = 5,06$). También se aprecia una gran cantidad de recorridos que responden de manera menos que proporcional ante cambios en la demanda (67%). Sin embargo, existen también recorridos-sentido que tienen razones de frecuencia menores a uno (D11R, G07I, G07R) y otros que responden de manera más que proporcional a la demanda (ej. I22R y C22R). Es decir, en el primer caso son recorridos que tienen mayor frecuencia en los periodos fuera de punta a pesar de tener una mayor demanda en el punta, y en el segundo, son servicios que ante cambios en la demanda tienden a justificar una variación más grande en frecuencia. A su vez, también se tiene un número considerable de recorridos que tienen una razón de frecuencia igual a uno (ej. B10I y B26R); es decir, a pesar de existir diferencias importantes de demanda entre periodos, éstos mantienen constante su frecuencia.

De esta manera, las diferencias encontradas en la determinación de la frecuencia tanto para los modelos teóricos como en distintos sistemas BRTs y recorridos de Transantiago, dan cuenta de un proceso complejo, el que no solo es explicado por la demanda. Por lo tanto, se hace necesario conocer otros elementos o escenarios que influyan en la determinación de la frecuencia bajo un enfoque multiperiodo.

1.3. Objetivos

En esta tesis se plantea un modelo microeconómico multiperiodo con una estructura que considera el costo de los operadores y usuarios. El objetivo es determinar qué condiciones o escenarios favorecen la utilización de frecuencias de operación similares a lo largo de todo el día. Para ello se plantea un problema que busca optimizar el valor de la frecuencia y el tamaño de bus óptimo, minimizando los costos del sistema. Algunos de los elementos estudiados son: la duración de los periodos punta, la consideración de hacinamiento, congestión, demanda absoluta, entre otros. Además se realiza un análisis de sensibilidad a distintos parámetros considerados dentro de la modelación. Lo anterior se modelará a través de una línea de bus simple, utilizando datos de demanda y modelos de tiempo de viaje calibrados para Santa Rosa, Santiago.

La tesis se organiza de la siguiente forma. En el Capítulo 1 se muestra una introducción y motivación a través de las diferentes respuestas que ha recibido tanto en la teoría como en la práctica esta pregunta de investigación. El Capítulo 2 muestra una revisión bibliográfica a los estudios más importantes en esta área, para luego en el Capítulo 3 describir detalladamente el modelo microeconómico desarrollado. En el Capítulo 4 se presenta con detalle el escenario de aplicación del modelo, para luego, en el Capítulo 5 mostrar los principales resultados encontrados. Finalmente en las conclusiones se sintetizan los resultados más relevantes de este trabajo.

Capítulo 2

Revisión bibliográfica

La optimización de la operación de sistemas de transporte es un problema que ha sido ampliamente estudiado en la literatura y nace de la necesidad por hacer una mejor utilización de los recursos, como también por mejorar la calidad de servicio que perciben los usuarios. En particular, la optimización de un corredor de transporte público es una de las investigaciones que más atención ha recibido en esta área de estudio y por tanto a lo largo de los años se ha resuelto desde diversos enfoques, utilizando distintas variables de diseño, funciones objetivos, restricciones y métodos de resolución. Por lo anterior, en este capítulo se presenta una revisión bibliográfica de los principales modelos de optimización de recorridos de transporte público, lo que permite tener una mayor comprensión y dimensión de la pregunta de investigación que en esta tesis se desarrolla.

2.1. Modelos de un periodo

Si bien existen múltiples estudios en los que se optimiza un recorrido de transporte público, la gran mayoría considera solo un periodo de operación, típicamente un periodo punta. De éstos, Mohring (1972) fue uno de los primeros trabajos realizados. En este se desarrollan dos modelos microeconómicos, que utilizando demanda paramétrica (Y) e incluyendo costos de operadores y usuarios, optimizan frecuencia (f) y el número de paradas (p).

El primer modelo desarrollado en Mohring (1972) solo optimiza la frecuencia, y en él se considera un costo constante (c) de los operadores en función del número de vehículos (B), y los costos asociados a los tiempo de viaje (t_v), espera (t_e) y acceso (t_a), ponderados por sus respectivos valores del tiempo (P_i), para el caso de los usuarios. De esta manera, la función de gasto del sistema queda definida como se aprecia en la Ecuación 2.1.

$$G(f) = Bc + P_e t_e Y + P_a t_a Y + P_v t_v Y \quad (2.1)$$

Sabiendo que el número de vehículos se relaciona con la frecuencia a través del tiempo de ciclo ($B = ft_c$) y asumiendo el tiempo de viaje y acceso constante, aplicando condiciones de

primer orden se obtiene la frecuencia óptima:

$$f^{opt} = \sqrt{\frac{P_e Y}{2t_c c}} \quad (2.2)$$

Esta fórmula, basada en principios primero propuestos por Vickrey (1955), es usualmente conocida como la “regla de la raíz cuadrada”, y en ella se observa que la frecuencia cambia proporcional a la raíz cuadrada de la demanda. Este modelo, sin embargo, tiene algunas limitaciones ya que considera el tiempo de ciclo y de viaje independientes del valor de la frecuencia. Dichos supuestos son razonables si los tiempos de detención en paraderos son constantes o independiente de la demanda y no lo serán en un escenario con alta variación de demanda en paraderos. Por esta razón, Jansson (1980) extiende el primer modelo de Mohring (1972) considerando que el tiempo de ciclo depende de la cantidad de personas que suban y/o bajen en cada paradero. De ésta manera, el tiempo de ciclo dependerá de la demanda, como se expresa en la Ecuación 2.3.

$$t_c = T + \frac{tY}{f} \quad (2.3)$$

Como el número de paraderos no es una variable de optimización del modelo, entonces el costo asociado al tiempo de acceso no se considera dentro de la función de gastos del sistema, como es posible ver en la Ecuación 2.4.

$$G(f) = t_c(f)fc + P_e \left(\frac{1}{2f}\right) Y + P_v t_c(f) \left(\frac{l}{L}\right) Y \quad (2.4)$$

De esta manera, aplicando condiciones de primer orden se encuentra la frecuencia que minimiza el gasto total del sistema:

$$f^{opt} = \sqrt{\frac{Y}{c \cdot T} \left(\frac{P_e}{2} + P_v t Y \frac{l}{L}\right)} \quad (2.5)$$

Esta fórmula es otra versión de la regla de la raíz cuadrada, donde la frecuencia de operación depende del tiempo promedio de viaje de los usuarios.

Las consideraciones del primer modelo de Jansson (1980) también fueron consideradas en un segundo modelo de Mohring (1972), pero con algunas otras consideraciones. En este segundo modelo cambia la formulación del tiempo de ciclo como se observa en la Ecuación 2.6:

$$t_c = T + \frac{2Yt}{f} + t_p(1 - e^{-n})p \quad (2.6)$$

donde T (constante) es el tiempo de viaje menos la operación en paraderos, t_p es un tiempo de aceleraciones y desaceleraciones que se multiplica por el número de paraderos y por la probabilidad de detenerse, el que supone una variable aleatoria de distribución *poisson* en el número de usuarios que desean ser servidos en un paradero. A su vez, el tiempo de ciclo también depende de la frecuencia a través de la cantidad promedio de subidas y bajadas por bus ($2Y/f$), la que se multiplica por el tiempo de subida o bajada (t).

Por otra parte, el modelo también propone un tiempo de viaje proporcional al tiempo de ciclo (Ecuación 2.7) y lo hace en función del largo promedio del viaje (l) y del largo del recorrido (L). Además, para el tiempo de acceso se asume un valor promedio en función del largo el recorrido, el número de paraderos y la velocidad promedio de caminata (v_a). De esta manera la función de gastos queda como se aprecia en la Ecuación 2.8.

$$t_v = t_c \left(\frac{l}{L} \right) \quad (2.7)$$

$$G(f, p) = t_c(f, p)fc + P_e \left(\frac{1}{2f} \right) Y + P_a \left(\frac{L}{2pv_a} \right) Y + P_v t_c(f, p) \left(\frac{l}{L} \right) Y \quad (2.8)$$

Si bien la Ecuación 2.8 no tiene solución analítica, iterando, Mohring (1972) encuentra que la frecuencia es directamente proporcional a la demanda elevada a un exponente que es cercano y superior a 0,5. Este segundo modelo no solo es importante por considerar en el análisis los costos de operadores y usuarios y por ser de los primeros estudios en considerar que el tiempo de ciclo depende de la frecuencia de operación, sino que además lo desglosa en tiempo de operación fuera de los paraderos, de aceleración y desaceleración, además de los tiempos de transferencia de pasajeros. Esto le permite ser de los primeros estudios en considerar estrategias de operación, pues analiza escenarios con paradas fijas en estructura de alimentador y otro de operación normal con paradas en función de la demanda.

Extendiendo las investigaciones en la dimensión espacial, Tirachini et al. (2011) y Cortés et al. (2011) desarrollan un modelo microeconómico utilizando demanda paradero a paradero, para estudiar la posición óptima de una estrategia de bucles y el impacto que tiene en los costos de operadores y usuarios. Para esto se desarrolla un modelo microeconómico que determina la frecuencia y el tamaño de bus óptimo que minimizan los costos del sistema. Así, bajo ciertas condiciones se determinan expresiones analíticas para la frecuencia óptima del recorrido, dentro y fuera de bucle, lo que permite analizar la influencia que distintos elementos tienen en el problema. El modelo se aplica en distintas estructuras de demanda, determinando que los beneficios (en usuarios y operadores) dependen en gran medida del desbalance y concentración que tiene. También en la literatura se han estudiado otras estrategias con el uso de modelos matemáticos. Leiva et al. (2010) calcula el valor de la frecuencia y tamaño de vehículo óptimo que minimizan los costos sociales de un sistema de múltiples servicios con paradas limitadas. Este estudio además analiza el impacto de otras estrategias como servicios normales, expresos y *deadheading*.

Como Leiva et al. (2010), muchas otras investigaciones han pasado del estudio de un corredor o recorrido de transporte público a considerar varios servicios o el estudio de redes

más complejas, donde el problema no solo consiste en obtener valores óptimos de variables de operación para cada ruta, sino que también determinar la asignación que tendrán los usuarios en la red. dell'Olio et al. (2006) desarrolla una optimización de dos niveles, donde en el superior utiliza un modelo microeconómico que minimiza la suma de los costos de operadores, usuarios (tiempo de viaje) y el costo de construcción de paradas, y determina así la frecuencia y el número óptimo de paraderos dentro de un conjunto posible. Establecida la operación del sistema, en el nivel inferior se utilizan modelos de comportamiento de usuarios que permiten asignar éstos a la red de transporte público. La optimización en dos niveles se ha hecho cada vez más completa, considerando por ejemplo los cambios que puede sufrir la demanda a distintas configuraciones de paradas además de la interacción con transporte privado (Ibeas et al., 2010), la posibilidad de asignar buses de distintos tamaños con restricciones de capacidad (dell'Olio et al., 2012), o la consideración de demanda elástica y modelos de asignación con congestión (Ibeas et al., 2013).

Además de avanzar en el estudio de estrategias y de redes complejas, se ha desarrollado otros estudios donde se consideran mayores y mejores elementos dentro de la estructura de costos. Continuando el trabajo iniciado por Mohring (1972), Jara-Díaz y Gschwender (2003b) extienden un modelo desarrollado por Jansson (1980) que considera un tiempo de ciclo como función de la frecuencia, e incorporan el hacinamiento como costo percibido por los usuarios dentro del modelo microeconómico que determina valores óptimos de la frecuencia y tamaño de vehículo que minimizan los costos totales del sistema. Para esto consideran un valor del tiempo de viaje que depende de la tasa de ocupación y resolviendo el problema presentan una regla de la raíz cuadrada más completa, mostrando que los valores de la frecuencia óptima son mayores si se considera hacinamiento debido a que así se reducen los costos de usuarios.

2.2. Modelos multiperiodo

Si bien se ha desarrollado varios estudios de optimización de recorridos de transporte público para decisiones de nivel táctico, los modelos multiperiodo han recibido menos atención que aquellos donde solo se considera un periodo. Esto es interesante pensando en los importantes costos que los usuarios podrían percibir en periodos fuera de punta, los que además son más largos que los periodos más demandados y por tanto es importante incorporarlos dentro del análisis.

Jansson (1980) desarrolla tres modelos microeconómicos para estudiar la minimización de costos de una línea de bus simple. El primer modelo desarrollado, analizado en la sección anterior, si bien analiza solo un periodo de operación y considera la frecuencia como única variable de diseño, es importante por las consideraciones que hace. No obstante lo anterior, este modelo tiene algunas limitaciones en su estructura de costos. Por una parte considera un costo agregado en los operadores, pasando por alto los distintos valores que se pueden tener a lo largo del día, y por tanto los distintos requerimientos de flota que se pueden tener en diversos periodos de operación, y por otro, no considera una dependencia del costo al tamaño de los vehículos seleccionados. El segundo modelo, por tanto, busca hacerse cargo de la primera de estas limitaciones, razón por la que se estudia la frecuencia óptima para distintos periodos del día (punta y fuera de punta), lo que sin embargo, requiere un análisis

más detallado en la estructura de costos.

El segundo modelo de Jansson (1980) estudia los costos incrementales (CI) de añadir un nuevo bus tanto para el periodo punta como fuera de punta. Para esto hace dos análisis, el primero considerando más buses en el periodo punta ($B_{peak} > B_{off}$) y el otro, considerando más buses en el periodo fuera de punta ($B_{off} > B_{peak}$). Esto es necesario debido a que, por ejemplo, el costo de añadir un bus en el periodo fuera de punta dependerá de cuál de éstos periodos determine el tamaño de la flota. Así, bajo ciertas condiciones en el tratamiento de los costos, Jansson (1980) determina que el valor incremental de añadir un bus en el periodo fuera de punta es entre $1/3$ y $2/3$ el costo de incorporarlo en el periodo punta. Luego de un análisis a los costos y beneficios de incorporar buses en los distintos periodos, Jansson (1980) concluye que bajo ciertas condiciones es óptimo mantener la misma flota en periodos punta y fuera de punta, lo que permite incluso ofrecer mayores frecuencias en los periodos menos demandados, debido a la menor congestión percibida en dichos periodos. También establece, sin embargo, que este resultado no es universalmente válido, y determina que si la demanda en el periodo fuera de punta es inusualmente menor respecto de la demanda en los periodos punta, entonces la frecuencia en el periodo punta podría ser mayor que en el menos demandado, pero sin llegar a establecer un umbral que fundamente dicha decisión. No obstante lo anterior, en el segundo modelo Jansson (1980) asume la misma frecuencia y tamaño de flota (determinado por las condiciones del periodo punta) para ambos periodos. Con todo esto, la estructura de gastos queda como se presenta en la Ecuación 2.9.

$$G(f) = f t_c(f) CI + P_e \left(\frac{1}{2f} \right) \bar{Y} E + P_v t_c(f) \left(\frac{l}{L} \right) \bar{Y} E \quad (2.9)$$

Esta estructura de gastos difiere levemente de las anteriormente mencionadas. Por una parte se utiliza una demanda por hora (\bar{Y}) que corresponde a un promedio ponderado de ambos periodos considerados (Ecuación 2.10), además de considerar una cantidad E de horas de operación, que corresponden a la suma de las horas de ambos periodos. Por otra parte, el tiempo de ciclo está determinado por las condiciones del periodo más demandado, como se observa en la Ecuación 2.11.

$$\bar{Y} = \frac{E^{peak} Y^{peak} + E^{off} Y^{off}}{E^{peak} + E^{off}} \quad (2.10)$$

$$t_c = T^{peak} + t \frac{Y^{peak}}{f} \quad (2.11)$$

En las ecuaciones anteriores se establece Y^{peak} y E^{peak} como la demanda por hora y la cantidad de horas del periodo punta, respectivamente, lo que es análogo para Y^{off} y E^{off} del periodo fuera de punta. El resto de las variables son como aquellas ya definidas en esta tesis.

De esta manera, aplicando condiciones de primer orden se obtiene el valor de la frecuencia óptima que minimiza los costos del sistema:

$$f^{opt} = \sqrt{\frac{\bar{Y}E}{T^{peak} CI} \left(\frac{P_e}{2} + P_v t Y^{peak} \frac{l}{L} \right)} \quad (2.12)$$

Este segundo modelo es importante al ser de los primeros intentos por extender el análisis de una línea de bus de transporte público a más de un periodo de operación. Si bien el resultado obtenido es en esencia la regla de la raíz cuadrada, se debe destacar que este resultado solo es válido para aquellos casos en que se tiene la misma frecuencia y número de vehículos circulando en ambos periodos. A pesar de lo anterior, es importante notar que la frecuencia no solo depende de las condiciones de demanda del periodo punta, sino que también del fuera de punta. Lo anterior es interesante sabiendo que generalmente se consideran de manera separada ambos periodos de operación para el diseño de transporte público.

Una de las variables de operación más importantes de analizar en la estructura de costos de los operadores es el tamaño de bus con los que se provee la oferta. Esto se debe no solo a los distintos costos que tienen buses de diferentes capacidades, sino también a la baja tasa de ocupación promedio que suelen tener las líneas de transporte público. Por esta razón, el tercer modelo de Jansson (1980) no solo optimiza la frecuencia considerando dos periodos de operación, sino que también optimiza el tamaño de bus (K) a través del número de asientos, considerando que los costos del operador dependen de este último a través de la siguiente formulación:

$$CI = a_1 + b_1 K \quad (2.13)$$

Análogo a los casos anteriores, se construye una función de gastos que incluye la perspectiva de operadores y usuarios, pero esta vez el problema no es irrestricto en la capacidad debido a la utilización del tamaño de vehículo como variable de decisión. Cuando $B^{peak} > B^{off}$ el modelo no tiene solución analítica; por ello, y a pesar de que es un caso particular, se considera la misma flota en ambos periodos para de esta manera obtener una expresión matemática. Así, tomando la función de gastos de la Ecuación 2.9 y planteando el nuevo problema de optimización, éste se resuelve obteniendo la siguiente expresión para la frecuencia óptima:

$$f^{opt} = \sqrt{\frac{1}{a_1 T^{peak}} \left(E\bar{Y} \left\{ \frac{P_e}{2} + P_v Y^{peak} \left(\frac{l}{L} \right) t \right\} + \frac{b_1 (Y^{peak})^2 t}{\phi_{max} L} \right)} \quad (2.14)$$

donde ϕ_{max} es un factor de seguridad de carga máxima. Este valor de la frecuencia óptima difiere a la encontrada por los anteriores dos modelos debido a la incorporación de una tercera componente. Sin embargo, la importancia de este modelo es la incorporación del tamaño de vehículo como una variable de optimización bajo un enfoque multiperiodo. Si bien Jansson (1980) realiza un análisis multiperiodo, justificando escenarios en los que es óptimo utilizar la misma frecuencia en periodos punta y fuera de punta, éste no es concluyente en las condiciones de demanda que lo hacen más deseable.

Los modelos anteriores desarrollados por Jansson (1980) han considerado desde uno, a dos periodos de operación, además de considerar la frecuencia y el tamaño de vehículo como varia-

bles de optimización. Chang y Schonfeld (1991) extienden el análisis considerando además de la frecuencia, el espaciamiento entre líneas (g) como variables de decisión. Para esto estudian recorridos del tipo alimentador en un área de ancho W y largo L , de manera que la cantidad de rutas de transporte público corresponderá a W/g . En una primera instancia, Chang y Schonfeld (1991) consideran solo un periodo de operación además de tiempos de ciclo y viaje independientes de la frecuencia, de modo que planteando y resolviendo la correspondiente ecuación de gasto, se obtiene la siguiente expresión para la frecuencia óptima:

$$f^{opt} = \left(\frac{v_a P_e^2 Y}{W t_c c P_a} \right)^{1/3} \quad (2.15)$$

Contrario a lo que pasa con los modelos descritos anteriormente, en este caso la frecuencia no cambia de manera proporcional a la raíz cuadrada de la demanda, sino que lo hace a través de la raíz cúbica. Esto se debe al hecho de incorporar el número de recorridos como variable de decisión. De esta manera, la frecuencia tiene una menor respuesta ante cambios en la demanda debido a que el modelo ahora también puede aumentar o disminuir el número de recorridos ofrecidos. En su segundo modelo, Chang y Schonfeld (1991) extienden este estudio a múltiples periodos de operación (superíndice t), considerando costos de operadores, tiempos de viaje, ciclo, duración de los periodos, entre otros parámetros, como función del periodo de estudio. De esta manera se determina la siguiente función de gastos:

$$G(f) = \frac{W}{g} \sum_t f^t t_c^t E^t + \frac{P_e}{2} \sum_t \frac{Y^t E^t}{f^t} + P_v \sum_t t_v^t Y^t E^t + P_a \left(\frac{g + L/p}{4v_a} \right) \sum_t Y^t E^t \quad (2.16)$$

Minimizando la función respecto de la frecuencia se obtiene la siguiente expresión para dicha variable:

$$f_t^{opt} = \left(\frac{v_a P_e^2 X}{W P_a} \right)^{1/3} \left(\frac{Y^t}{t_c^t c^t} \right)^{1/2} \quad (2.17)$$

donde X se define como:

$$X = \frac{\sum_t \sqrt{t_c^t c^t Y^t}}{\sum_t E^t Y^t} \quad (2.18)$$

De esta manera, bajo ciertos supuestos como la consideración de un tiempo de ciclo independiente del valor de la frecuencia, se tiene una expresión de la frecuencia óptima para múltiples periodos. Por otra parte, Chang y Schonfeld (1991) extienden sus modelos con el uso de demanda elástica para estudiar el efecto que tiene la maximización del bienestar social y la maximización de la utilidad de operadores en las variables de diseño consideradas, lo que a su vez permite realizar un estudio tarifario además de encontrar expresiones para la frecuencia y el espaciamiento entre líneas de transporte público.

Como Chang y Schonfeld (1991), varias son las investigaciones que han incorporado el análisis de múltiples líneas de buses y con ello el estudio de la estructura espacial con que es servida la demanda (e.g., Jara-Díaz y Gschwender, 2003a). Delle Site y Filippi (1998) desarrolla un modelo para la optimización de la operación de una ruta de bus, donde además de estudiar la frecuencia y tamaño de vehículo se estudia la tarifa y la estrategia de bucles. Para esto se modela un corredor con paradas establecidas servido por dos líneas de buses, una operando el recorrido completo y otra solo una parte (bucle), determinando la frecuencia de ambos servicios y encontrado diferencias del orden del 60% entre periodos punta y fuera de punta, y en donde la demanda del primero es 2,6 veces la del segundo (Tabla 1.1). Considerando el estudio de estructuras más agregadas y complejas, Fernández et al. (2008) plantea el problema de diseñar una red de transporte público, donde se propone una optimización de dos niveles, con un diseño topológico de la red en el primero y la definición del diseño operacional en el segundo. En este último se determina el valor de la frecuencia óptima en periodos punta y fuera de punta con el objetivo de minimizar los costos sociales del sistema, sin embargo no hay indicación del valor de las frecuencias en los distintos periodos.

Además de la frecuencia, el tamaño de vehículo y el número de líneas de transporte público, existen diversos estudios que han tomado en cuenta otras consideraciones y variables de optimización. Estudios como Medina et al. (2013) y Tirachini (2014) plantean modelos multiperiodos para determinar el espacio óptimo entre paraderos y la frecuencia que minimizan los costos totales del sistema. En el caso del primero se plantea un modelo multiperiodo de aproximación continua que se resuelve en dos etapas, en una primera instancia se resuelve la frecuencia óptima, para luego determinar la densidad de paraderos. En el caso de Tirachini (2014) se desarrolla un modelo microeconómico multiperiodo para determinar no solo el número, sino también tamaño de los paraderos, además del valor óptimo de la frecuencia y tamaño de vehículo que minimizan el costo total del sistema (operadores y usuarios). Para esto, también reconsidera la utilización del modelo de probabilidad de detención que asume una distribución *poisson* en la llegada de los usuarios, determinando que el modelo sobrestima el número de paradas debido a que las decisiones de viaje de los usuarios no siempre son independientes y que muchas de éstas se dan en zonas que concentran la generación/atracción de viajes como escuelas, centros comerciales, entre otras. Dada la complejidad del modelo planteado, este se resuelve de manera numérica encontrando importantes diferencias de frecuencias entre periodos punta y fuera de punta, las que se hacen aún más notorias en la medida que aumenta la demanda total del escenario.

Los anteriores estudios dan cuenta de los diversos objetivos y variables de decisión que se han utilizado para resolver el problema de optimización un recorrido de bus, sin embargo también existe otro tipo de literatura donde se optimiza la frecuencia de distintos periodos de operación pero utilizando como enfoque el estudio tarifario y la evaluación de políticas públicas. Basso y Silva (2014) desarrolla un modelo representativo de calle considerando dos modos de transporte en periodos punta y fuera de punta. De esta manera, a pesar de no ser el objetivo principal del estudio, se define la frecuencia para dichos periodos en conjunto con la evaluación del uso de tres políticas comúnmente utilizadas: pistas solo bus, subsidio al transporte público y tarificación por congestión, determinando que éstas tienen su mayor impacto en periodos punta, provocando un aumento de la frecuencia y con ello una mayor diferencia de frecuencia entre periodos.

Todos estos trabajos dan cuenta de la gran variedad de enfoques, funciones objetivos, variables de diseño, restricciones y métodos de resolución que se pueden considerar para el problema de optimización de un recorrido de transporte público. Esto refuerza el análisis presentado en la Tabla 1.1, el que muestra que no existe una respuesta única en frecuencia para cambios en demanda y por tanto es importante realizar un análisis multiperiodo que permita conocer variables y/o escenarios que influyen en la determinación de la frecuencia óptima de operación, como también la manera en que lo hacen.

Capítulo 3

Descripción del modelo

En la consideración de los costos de un sistema de transporte, es esencial contar con la perspectiva de los operadores y de los usuarios, ya que estos últimos no solo hacen uso del servicio, sino que además proveen al sistema de su tiempo, lo que es vital para el desarrollo de la actividad. Con ambas estructuras de costos incorporadas se pretende determinar la frecuencia y el tamaño de los vehículos que minimicen el costo total del sistema, y a través de esto estudiar los escenarios o elementos que influyan en la consideración de frecuencias similares en distintos periodos de operación.

El recorrido de bus se modela como una línea de bus simple, con N paraderos ($N - 1$ secciones) funcionando en ambos sentidos de operación y con numeración fija, como se observa en la Figura 3.1. La dirección 1 de operación va desde el paradero 1 al N y la dirección 2 del paradero N al 1. Debido a esta estructura, la codificación de todo el modelo se realizará paradero a paradero, como ya se ha hecho en la literatura (Tirachini et al., 2011), considerando el día completo de operación dividido en P periodos, incluyendo punta mañana y tarde y sin considerar efectos por transición entre periodos.

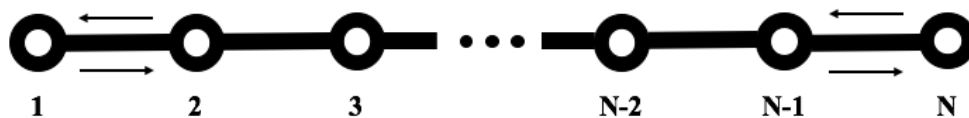


Figura 3.1: Modelo del recorrido de bus.

3.1. Modelación de la demanda

Para que el modelo sea coherente, tanto la demanda como los tiempos de viaje deben hacerse con una estructura que sea compatible con la modelación propuesta. Por esta razón la demanda utilizada son matrices origen/destino (O/D) que se construyen paradero a paradero con subidas observadas y bajadas estimadas para el eje Santa Rosa, con metodología

reportada en Munizaga y Palma (2012), además de otras consideraciones que se muestran en el Capítulo 4.

Con las matrices se obtiene λ_{kl}^p , que corresponde a la tasa de personas que van desde el paradero k al l en el periodo p (pax/h). Con lo anterior se definen dos variables, $S_i^{d,p}$ y $B_i^{d,p}$, que son la cantidad de pasajeros por hora que suben y bajan, respectivamente, en paradero i para el periodo p y dirección d :

$$S_k^{1,p} = \sum_{l=k+1}^N \lambda_{kl}^p \quad ; \quad S_k^{2,p} = \sum_{l=1}^{k-1} \lambda_{kl}^p \quad (3.1)$$

$$B_k^{1,p} = \sum_{l=1}^{k-1} \lambda_{lk}^p \quad ; \quad B_k^{2,p} = \sum_{l=k+1}^N \lambda_{lk}^p \quad (3.2)$$

3.2. Modelación del tiempo de viaje

Uno de los elementos más importantes en los costos del sistema son los tiempos de viaje, los que se modelarán a través de una estructura de tres componentes, tiempo de cruce, demoras en intersecciones, y demoras por operación en paraderos, con una estructura coherente a la modelación.

En esta tesis se utilizarán los modelos de tiempo de cruce y demoras en intersecciones estimadas en Gibson et al. (2015) para Santa Rosa, Santiago, Chile, además de los tiempos de demora en paraderos estimados en Tirachini et al. (2015). Es importante destacar que los modelos en Gibson et al. (2015) solo son estimados para la dirección 1, sin embargo se replican los parámetros estimados para la dirección 2 (e.g., asumiendo parámetros de PAM en dirección 1 como PTA en la dirección 2), lo que es razonable dada la estructura de los viajes como la similar infraestructura que tienen las direcciones del eje de estudio. Además, los tiempos de dichos modelos se calculan en s/km , por lo que dichos valores se aplican según las secciones consideradas en este estudio.

3.2.1. Tiempo de cruce

El tiempo de cruce corresponde al tiempo de viaje de los buses sin considerar ningún tipo de demora, por lo que puede estar influenciado por el flujo de vehículos como también por las características geométricas del eje. El tiempo de cruce, según Gibson et al. (2015), se define como:

$$T_{cr}^{d,i,p} = a_0^d + a_{1b}^d \gamma_{1b}^d + a_1^{d,i,p} \gamma_1^{d,i,p} \quad (3.3)$$

donde:

- $T_{cr}^{d,i,p}$ es el tiempo de crucero para la sección definida entre los paraderos i e $i + 1$.
- a_0^d es el tiempo de crucero básico.
- $a_{1_b}^d$ es un parámetro que reduce el tiempo de crucero básico en presencia de corredor segregado de buses.
- $a_1^{d,i,p}$ es un parámetro que reduce el tiempo de crucero básico dependiendo de particularidades propias de la sección i y periodo p considerado.

Todas éstas, multiplicadas por sus respectivas variables 0 - 1 (γ_1).

3.2.2. Demoras en intersección

El modelo de demoras en intersección utilizado (Gibson et al., 2015) tiene tres componentes, demora uniforme, demora por aleatoriedad y sobresaturación (presente en casos de altos grados de saturación), además de un factor de ahorros en demoras uniformes por coordinación de redes de semáforos. Todo esto se detalla en la Ecuación 3.4.

$$T_I^{d,i,p} = \left(a_2^{d,i} \frac{c^{d,i,p}}{2} \left(1 - \frac{v^{d,i,p}}{c^{d,i,p}} \right) + \left(a_3^d + a_3^{d,i,p} \gamma_3^{d,i,p} \right) F_{rc}^{d,i,p} \right) \frac{N_I^{d,i}}{L^{d,i}} + a_4^{d,i,p} \gamma_4^{d,i,p} \quad (3.4)$$

donde:

- $T_I^{d,i,p}$ es la demora por intersecciones para la sección definida entre los paraderos i e $i + 1$.
- $a_2^{d,i}$ es la probabilidad promedio de parada uniforme por sección.
- $c^{d,i,p}$ es el tiempo de ciclo para la sección i y el periodo p .
- $v^{d,i,p}$ es el tiempo de verde promedio para la sección i y el periodo p .
- a_3^d es la reducción promedio uniforme por coordinación de semáforos para cada intersección.
- $a_3^{d,i,p}$ es la reducción promedio de demora por intersección particular de cada sección-periodo.
- $F_{rc}^{d,i,p}$ es un factor que contiene distintas variables que explican los ahorros en demora por coordinación de semáforos, explicitado en la Ecuación 3.5.
- $L^{d,i}$ es el largo de la sección i .
- $N_I^{d,i}$ es número de intersecciones semaforizadas por sección.
- $a_4^{d,i,p}$ es parámetro que representa sobresaturación para la sección i en el periodo p .

Al igual que en la Ecuación 3.3, las variables $\gamma^{i,p}$ son variables *dummy* que toman valor 1 para cada sección-periodo que cumpla con las condiciones del parámetro asociado.

$$F_{rc}^{d,i,p} = \frac{N_s^{d,i,p}}{N_I^{d,i}} \left(1 - \frac{n_B^{d,i,p}}{N_I^{d,i}} \right) \frac{v^{d,i,p}}{c^{d,i,p}} \quad (3.5)$$

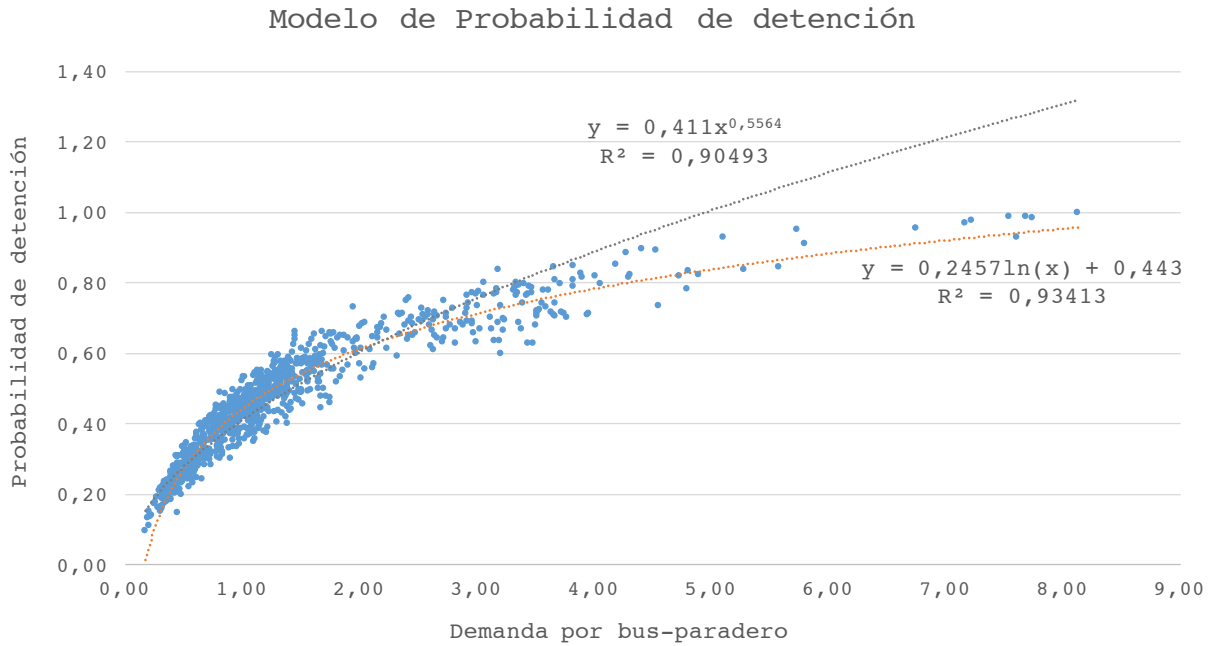
Además de las variables ya explicadas, el factor de ahorro por coordinación de semáforos depende de:

- $N_s^{d,i,p}$, número de semáforos coordinados por sección-periodo.
- $n_B^{d,i,p}$, el mínimo entre N_I^i y el número promedio de detenciones de un bus por sección.

En los modelos desarrollados en Gibson et al. (2015), el número promedio de detenciones de un bus por sección es un parámetro, sin embargo en escenarios con distintos niveles de demanda el número promedio de detenciones no puede ser constante, pues depende de la demanda de pasajeros por kilómetro de una línea (Tirachini, 2014). Por esta razón se construye el número promedio de detenciones por bus y por sección con una probabilidad de detención por paradero que depende de su nivel de demanda (subidas y bajadas por bus).

Esta probabilidad de detención se construye con información de Santa Rosa, Santiago, Chile.¹ Para esto, se estima la probabilidad de detención de un bus por paradero en función de la demanda (subidas y bajadas) por bus y por paradero. Como se aprecia en la Figura 3.2, se utilizaron dos modelos, uno logarítmico y otro potencial, siendo finalmente utilizado el primero (Ecuación 3.6) debido a su mejor ajuste.

Figura 3.2: Modelo de probabilidad de detención de un bus por paradero.



$$Prob_{det}^{d,i,p} = \min \left(1 ; \max \left(0 ; 0,443 + 0,2457 \cdot \ln \left(\frac{(S_i^{d,p} + B_i^{d,p})}{f^p} \right) \right) \right) \quad (3.6)$$

¹Data proporcionada por Jaime Gibson a través de comunicación personal

3.2.3. Demoras en paraderos

Los tiempos en paradero dependen tanto de la cantidad de personas que suben y bajan en cada uno de los paraderos, como también del tiempo marginal de subida y bajada de los pasajeros. Este último elemento depende de múltiples factores, como el tipo de bus, número de puertas, sistema de pago, entre otros. En esta investigación se utilizará un modelo de tiempo de detención en paradero normal, con tiempos de subida y bajada en función del número de puertas del bus, reportado en Tirachini et al. (2015). Como no todos los buses se detienen en todos los paraderos, el modelo se modifica multiplicando la constante c_0 , asociada a todas aquellos elementos no recogidos por las subidas y bajadas, por la probabilidad de detención que se muestra en la ecuación 3.6. De esta manera, los tiempos de detención en paraderos quedan de la siguiente forma:

$$T_s^{d,i,p} = b_{L_b} \cdot \frac{S_i^{d,p}}{f^p} + al_{L_b} \cdot \frac{B_i^{d,p}}{f^p} + c_0 \cdot Prob_{det}^{d,i,p} \quad (3.7)$$

donde:

- $T_s^{d,i,p}$ es el tiempo de operación en el paradero i .
- b_{L_b} y al_{L_b} tiempo de subida y tiempo de bajada (s/pax), respectivamente.
- c_0 constante, medida en segundos, asociada entre otros elementos al abrir y cerrar puertas.

De esta manera el tiempo de ciclo queda establecido de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^{N-1} (T_{cr}^{1,i,p} + T_{cr}^{2,i,p} + T_I^{1,i,p} + T_I^{2,i,p}) + \sum_{i=1}^N (T_s^{1,i,p} + T_s^{2,i,p}) + \alpha \quad (3.8)$$

donde α es un tiempo de holgura para posicionar el bus de una dirección a otra, dar descanso a los conductores y acomodarse a un itinerario de despacho, si lo hubiere.

3.3. Estructura de costos

Con la demanda y los tiempos de viaje modelados, se procede a describir la estructura de costos considerada, la que incluye tanto a operadores como a usuarios.

3.3.1. Costo de usuarios

La estructura de costo de usuarios cuenta con tres componentes, las que se asocian a los tiempos de espera y de viaje, además del hacinamiento, los que se detallan a continuación.

No se considera el tiempo de acceso debido a que el espaciamiento entre paraderos no es una variable de optimización en este modelo.

Costo del tiempo de espera

El costo del tiempo de espera (C_w) se define como el valor del tiempo de espera (P_w) por el tiempo total de espera. Este último se calcula en base a tres supuestos: que los buses llegan a los paraderos con una distribución *poisson*, que los pasajeros se suben al primer bus que pasa (lo que se logra con la restricción de capacidad que incluye el modelo) y tercero, que los usuarios llegan uniformemente al paradero. De esta manera, el tiempo promedio de espera es el intervalo y el costo asociado queda como sigue:

$$C_w = \sum_{p=1}^P P_w D_p \left(\sum_{k=1}^N \frac{S_k^{1,p}}{f^p} + \sum_{k=1}^N \frac{S_k^{2,p}}{f^p} \right) \quad (3.9)$$

donde $S_k^{d,p}$ corresponde a los pasajeros por hora que se suben en el paradero $k \in N$ en el periodo $p \in P$ para el sentido d , y f^p y D^p corresponde a la frecuencia y duración del periodo p , respectivamente.

Costo del tiempo de viaje

El costo de tiempo en vehículo (C_v) se determina como el valor del tiempo de viaje (P_v) por el tiempo total de viaje, el que está compuesto por tres elementos: el tiempo de crucero, demoras en intersecciones y tiempo de detención en paraderos. Este costo queda definido en la siguiente ecuación:

$$C_v = \sum_{p=1}^P \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{l=k+1}^N \left[\sum_{i=k}^{l-1} P_v (\delta_{L_b}^{1,i,p}) \left(T_{cr}^{1,i,p} + T_I^{1,i,p} + b_{L_b} \frac{S_i^{1,p}}{f^p} + a l_{L_b} \frac{B_i^{1,p}}{f^p} + c_0 \cdot Prob_{det}^{d,i,p} \right) \right] \lambda_{kl}^p D^p \right\} +$$

$$\sum_{p=1}^P \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^{k-1} \left[\sum_{i=l+1}^k P_v (\delta_{L_b}^{2,i-1,p}) \left(T_{cr}^{2,i-1,p} + T_I^{2,i-1,p} + b_{L_b} \frac{S_i^{2,p}}{f^p} + a l_{L_b} \frac{B_i^{2,p}}{f^p} + c_0 \cdot Prob_{det}^{d,i,p} \right) \right] \lambda_{kl}^p D^p \right\} \quad (3.10)$$

donde:

- $P_v(\delta_{L_b}^{d,i,p})$ es el valor del tiempo de viaje que depende de la densidad promedio del bus explicada en la ecuación 3.14.

Costo del Hacinamiento

El valor que las personas asignan al tiempo de viaje depende de sus características. Variados trabajos en la literatura han encontrado que un alto nivel de hacinamiento en vehículos y estaciones aumenta la disposición a pagar de los usuarios por disminuir su tiempo de viaje (e.g., Wardman y Whelan, 2011; Tirachini et al., 2013). Por esta razón, es importante incorporar el hacinamiento como variable dentro del modelo, y así captar en plenitud el costo que el sistema impone a los usuarios.

El valor del tiempo de viaje para distintos valores de densidad promedio de pasajeros ha sido estimada para Santiago en Batarce et al. (2015) a través de una encuesta de preferencias declaradas, utilizando una función lineal por tramos discontinua (líneas negras en Figura 3.3.1). Sin embargo, debido a la necesidad de contar con un valor del tiempo de viaje continuo, se ajusta una función cuadrática (ecuación 3.11) a dichos valores, como se observa en la Figura 3.3.1.

$$P_v(\delta_{L_b}^{d,i,p}) = 2,158 + 77,77\delta_{L_b}^{d,i,p} + 94,09(\delta_{L_b}^{d,i,p})^2 \quad (3.11)$$

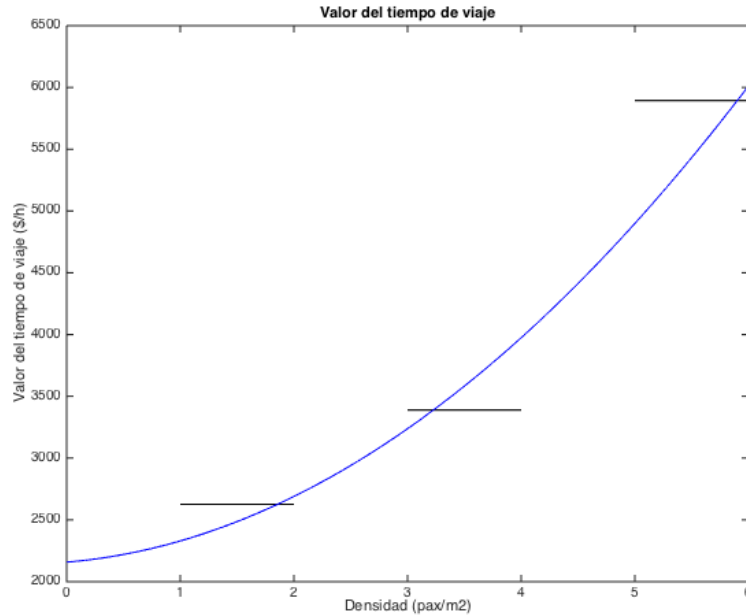


Figura 3.3: Valor del tiempo de viaje.

Para establecer la densidad promedio del bus por sección y periodo es necesario determinar la carga del bus, que corresponde a la cantidad de pasajeros que lleva en promedio cada uno de éstos. Lo anterior se construye a través de las subidas y bajadas como se muestra en las siguientes cuatro ecuaciones:

$$k_{1,p}^1 = \frac{S_1^{1,p}}{f^p} \quad ; \quad k_{i,p}^1 = k_{i-1,p}^1 + \frac{S_i^{1,p}}{f^p} - \frac{B_i^{1,p}}{f^p} \quad (3.12)$$

$$k_{N-1,p}^2 = \frac{S_{N-1}^{2,p}}{f^p} \quad ; \quad k_{i,p}^2 = k_{i+1,p}^2 + \frac{S_{i+1}^{2,p}}{f^p} - \frac{B_{i+1}^{2,p}}{f^p} \quad (3.13)$$

donde:

- $k_{1,p}^1$ y $k_{N-1,p}^2$ corresponden a la carga de la sección 1 y $N - 1$ para la dirección 1 y 2, respectivamente.
- $k_{i,p}^d$ es la carga para la sección i en la dirección d y periodo p

De esta manera, y conociendo la cantidad de metros cuadrados útiles ($m_{L_b}^2$) para cada tipo de bus (L_b), se construye la densidad de la siguiente manera:

$$\delta_{L_b}^{d,i,p} = \frac{k_{i,p}^d}{m_{L_b}^2} \quad (3.14)$$

3.3.2. Costo de operadores

Los costos de los operadores es otro elemento importante de considerar dentro del modelo microeconómico; éstos típicamente se dividen en cuatro componentes: el costo por remuneraciones de los conductores, costo de capital, costo operacional (combustible, mantenimiento, lubricantes, etc.) y otros costos, como los de arriendo y administración. Todos éstos se detallan a continuación.

Costo de capital

El costo de capital de los operadores se asocia en gran medida al costo de los buses. Por ésta razón es importante definir el requerimiento de flota de cada uno de los periodos considerados, ya que será el más restrictivo el que determine la flota necesaria del operador y con esto, el costo de capital de los buses. Todo esto se explica en las Ecuaciones 3.15 y 3.16.

$$B^p = f^p T_c^p \quad (3.15)$$

$$C_{cap} = c_1(L_b) \cdot \eta \cdot \max_p \{B^p\} \quad (3.16)$$

donde:

- B^p es el tamaño de flota para el periodo p .
- $c_1(L_b)$ es el costo en \$/bus-día para un bus de tipo L_b .
- η es el porcentaje de flota que se reserva para eventualidades y mantenciones programadas.

- T_c^p es el tiempo de ciclo durante el periodo p detallado en la Ecuación 3.8.

Costo de tripulación

Las remuneraciones de conductores en uno de los ítemes más importantes en la estructura de costos de una empresa de transporte público. En el escenario base este costo se establecerá asumiendo total flexibilidad, es decir, con la capacidad de contar con los conductores estrictamente necesarios en cada uno de los periodos considerados. Esto se muestra en la Ecuación 3.17.

$$C_{trip} = c_2 \cdot \sum_{p=1}^P D^p f^p T_c^p \quad (3.17)$$

donde c_2 es el costo en $\$/h$ de cada uno de los conductores.

Más adelante en la Sección 5.6 se probará un escenario donde los costos de la tripulación se calculan en base a tres turnos, cada uno de éstos de ocho horas.

Costo operacional

El costo operacional se compone de todos aquellos elementos cuyo gasto aumenta con la mayor utilización de los buses. Es decir, se relaciona directamente con los kilómetros recorridos. Dentro de este costo se incluye combustible y aditivos, mano de obra asociada a mantenimiento, lubricantes, repuestos, filtros, neumáticos y baterías, elementos que son considerados en DTPM (2013). De esta manera, el costo operacional se define como sigue:

$$C_{op} = 2 \cdot \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^{N-1} c_3(L_b) D^p f^p l^i \quad (3.18)$$

donde $c_3(L_b)$ es el costo operacional en $\$/km$ que depende del tipo de bus (L_b). Este costo se construye en función de los kilómetros recorridos para cada periodo, los que son iguales en cada una de las dos direcciones consideradas, razón por la cual dicho costo se construye de manera simétrica. Es importante mencionar que $c_3(L_b)$ depende también de la velocidad de los buses, elemento que es ignorado por simplicidad.

Otros costos

La estructura de costos de una empresa de buses de transporte público no solo está compuesta por el costo de capital, de tripulación y de operación, también existen otros costos asociados a administración, arriendos, seguros, entre otros. Por esta razón, y basado en ATC

(2006), se construye un cuarto elemento como porcentaje del costo operacional (θ). De esta manera, al utilizar el modelo en distintos escenarios de demanda aumenta el gasto en dicho componente, lo que es natural pensando en el distinto gasto en que incurre pequeñas y grandes empresas en éste ítem. En el proceso de calibración se busca que los costos del caso base se asemejen a la estructura promedio de un operador de Transantiago, la que se reporta en DTPM (2013). Este proceso se muestra en la Sección 5.1.1.

3.4. Restricciones

El modelo tiene dos grupos de restricciones. El primero son restricciones de frecuencia mínima y máxima, donde la primera se impone por política para asegurar una calidad mínima en el sistema de transporte, y la segunda permite evitar el problema de congestión en paraderos. Para este último valor se suponen paraderos de al menos tres sitios (Tirachini, 2014). Este primer grupo de restricciones se muestran en la Ecuación 3.19.

El segundo grupo de restricciones (de capacidad), se construye de manera que todos los pasajeros sean capaces de abordar el primer bus que vean. Esto se explicita en la Ecuación 3.20.

$$f_{min} \leq f^p \leq f_{max} \quad (3.19)$$

$$q_{max}^p \leq \kappa K(L_b) f^p \quad (3.20)$$

donde:

- f_{min}^p y f_{max}^p son la frecuencia mínima y máxima para el periodo p , respectivamente.
- q_{max}^p es la carga máxima por tramo en el periodo p .
- κ es un factor de seguridad por variabilidad en la demanda (e.g., 0, 9).
- $K(L_b)$ es la capacidad en *plazas/h* de un bus de tipo L_b .

3.5. Resumen del modelo

De esta manera el modelo queda establecido de la siguiente manera:

$$Min_{f, L_b} \quad C_{tot} = C_w + C_v + C_{cap} + C_{trip} + C_{op}(1 + \theta) \quad (3.21)$$

$$s.a \quad f_{min} \leq f^p \leq f_{max} \quad , \forall p \quad (3.22)$$

$$q_{max}^p \leq \kappa K(L_b) f^p, \forall p \quad (3.23)$$

El problema de optimización (3.21)-(3.23) se resuelve utilizando la función *fmincon* del programa matemático MATLAB, en conjunto con el algoritmo de optimización *interior-point*. Este algoritmo, sin embargo, no asegura óptimos globales, por lo que se utiliza un procedimiento sugerido en el manual del programa ². De esta documentación se decide utilizar el enfoque propuesto por *Global Search*, el que resuelve el problema de optimización a partir de diversos puntos iniciales. Además, se configuran distintos parámetros para permitir al algoritmo alcanzar una solución a los distintos escenarios utilizados, los que se muestran en la Tabla 3.1 junto con las funciones y características de la instancia de optimización.

Parámetro	Valor	Descripción
Software	MATLAB R2015a	-
Algoritmo	<i>interior-point</i>	Algoritmo de optimización.
Función	<i>fmincon</i>	Optimización no lineal con restricciones.
TolCon	$1e - 10$	Tolerancia a violación de restricciones.
TolX	$1e - 12$	Tolerancia de término de variables de opt.
MaxIter	100,000	Max. iteraciones permitidas.
MaxFunEvals	100,000	Max. evaluaciones de función objetivo.
Nº Puntos Iniciales	500	Puntos iniciales evaluados con <i>Global Search</i> .

Tabla 3.1: Características de la instancia de solución del problema.

Para comprobar la utilidad del marco de optimización descrito anteriormente, como también para conocer más las propiedades del problema de optimización, en la Sección 5.1.3 se resuelve el problema para una instancia de dos periodos. Estos resultados se comparan con unos obtenidos por enumeración, con el fin de comprobar la efectividad del proceso propuesto.

²<https://www.mathworks.com/help/gads/how-globalsearch-and-multistart-work.html> (Accedido el 08/11/2016)

Capítulo 4

Aplicación

En el siguiente capítulo se describe el escenario de aplicación del modelo microeconómico desarrollado. Para esto se establecerán las características del eje considerado, como su extensión, ubicación, nivel de segregación, entre otras, además de enunciar las características y supuestos de los tiempos medios de viaje y la demanda utilizada.

4.1. Características del eje

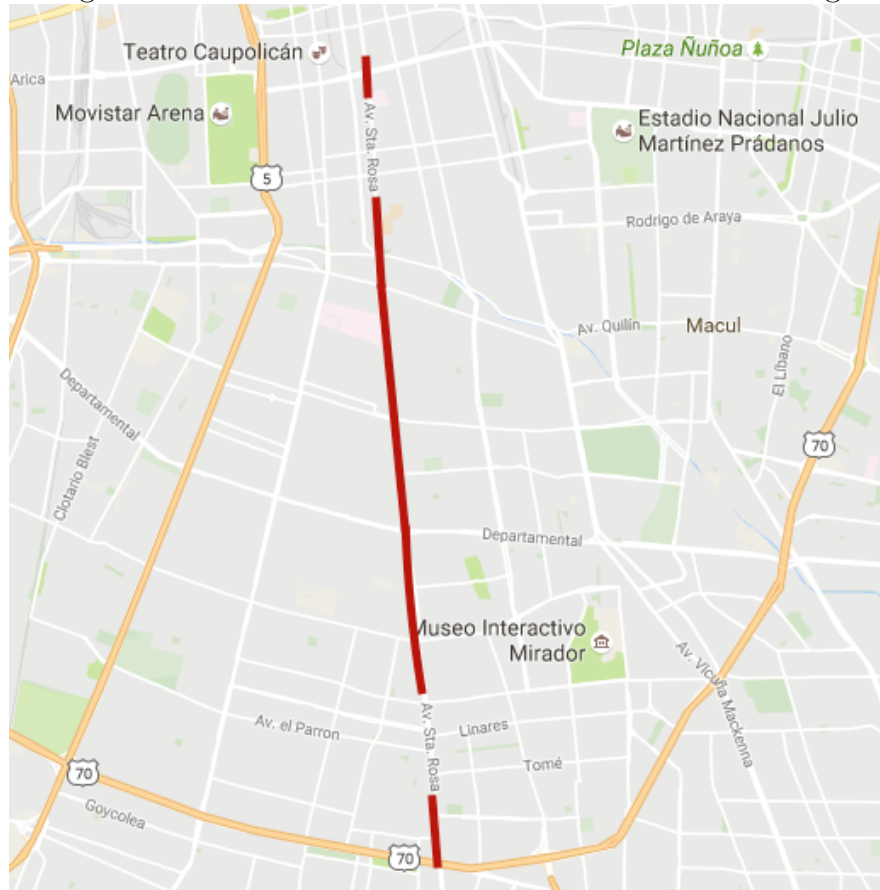
El modelo se aplica sobre un tramo de aproximadamente 8,8 kilómetros de Av. Santa Rosa, Santiago, Chile. La porción de eje considerado va desde Av. Américo Vespucio hasta Porvenir, como es posible ver en la Figura 4.1, y tiene la particularidad de contar con distintos niveles de segregación para buses, pasando de dos pistas en tráfico mixto en sus tramos iniciales, a corredor segregado, para terminar con tres pistas en tráfico mixto. Lo anterior se da en ambas direcciones consideradas, 1 y 2, que se definen de sur a norte y norte a sur, respectivamente.

En gran parte de la extensión del recorrido se tienen ambos sentidos de circulación, a excepción desde Isabel Riquelme hasta Porvenir, donde se separa el flujo de Santa Rosa y ésta queda solo con flujo en dirección 1. Por esta razón, se utilizará información de calle San Francisco, paralela a Santa Rosa, con sentido contrario e igual número de pistas y segregación para buses.

Los recorridos que hacen uso del tramo de estudio funcionan con un esquema de paradas divididas, de manera que se decide agregarlas para contener la información de demanda de todos los servicios que hacen uso del eje de estudio. En particular la dirección 1 tiene 46 paraderos, mientras que en la dirección 2 hay 44. Por esta razón, se incorpora la data de dos paraderos al norte de las secciones consideradas, de manera de tener 46 paraderos en ambas direcciones y establecer así un conjunto de 23 paraderos coherentes con la modelación propuesta en la Figura 3.1. Con estos 23 paraderos definidos, quedan determinadas 22 secciones, cuya extensión se mide respecto del primer paradero del conjunto de paradas divididas.

A continuación se muestran las características que tienen la demanda y los tiempos medios

Figura 4.1: Análisis de distintos recorridos de Transantiago



de viaje utilizados en este escenario de aplicación.

4.2. Tiempo de viaje

4.2.1. Generalidades

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, en esta investigación se utilizan tiempos de viajes estimados con modelos calibrados para el eje de Santa Rosa (Gibson et al., 2015), ubicado en Santiago de Chile. En dicho estudio se consideran periodos de media hora comprendidos entre las 07:30 y 21:00 horas, contrario a este estudio que utiliza 12 periodos que abarcan todo el día de operación, que son los periodos definidos por Transantiago, como se aprecia en la Tabla 4.1.

Los tiempos medios de viaje están compuestos por tres elementos: tiempo de cruce, demoras en intersecciones y tiempo de operación en paraderos, sin embargo para este último se utiliza un modelo reportado en Tirachini et al. (2015). Para ser utilizadas las dos primeras componentes, se deben realizar supuestos debido a dos inconsistencias entre los modelos. Por una parte se tiene un nivel de agregación distinto en tiempo, lo que requiere hacer supuestos

Periodos	Horario	Duración (h)
1	00:00 - 00:59	1,0
2	01:00 - 05:29	4,5
3	05:30 - 06:29	1,0
PMA	06:30 - 08:29	2,0
5	08:30 - 09:29	1,0
6	09:30 - 12:29	3,0
7	12:30 - 13:59	1,5
8	14:00 - 17:29	3,5
PTA	17:30 - 20:29	3,0
10	20:30 - 21:29	1,0
11	21:30 - 22:59	1,5
12	23:00 - 23:59	1,0

Tabla 4.1: Periodos considerados en el escenario de aplicación.

respecto de las condiciones de tiempo de cruce y demoras en intersecciones que tendrán los periodos: 1, 2, 3, 11 y 12; y por otra parte Gibson et al. (2015) solo calibra un sentido del eje.

4.2.2. Tiempo de cruce

El tiempo de cruce no solo depende de variables temporales, sino que también del nivel de segregación que tiene el flujo, diseño geométrico y diferencias que tienen las vías, por lo que es fácil extender los parámetros estimados por Gibson et al. (2015) a aquellos periodos que no fueron considerados en el estudio. Por otro lado, este trabajo considera un tiempo de cruce básico (a_0^d) que corresponde a un tiempo en condiciones de dos pistas en tráfico mixto. Por esta razón considera otras variables que aumentan o disminuyen este tiempo en función de las características espaciales y temporales de las secciones del eje. Uno de los parámetros es a_{1b}^d que reduce el tiempo de cruce básico en presencia de corredor segregado. Dados los mejores tiempos de viaje en periodos nocturnos y al hecho de que estos no son considerados en el estudio, se asume en los periodos 1, 2 y 12 un parámetro de reducción de tiempo de cruce del 75 % de a_{1b}^d , mientras que para el periodo 11 (21:30 a 22:59) se usará un parámetro cuyo valor será del 60 % de aquel asociado a la presencia de corredor segregado. Por otra parte se asume que el periodo 3 (05:30 a 06:29) tendrá las mismas condiciones de tiempo de cruce que el periodo 10 (20:30 a 21:29), dado su calidad de periodo no demandado y contiguo a un periodo punta.

Respecto de la dirección de operación no considerada en el estudio se asumirán condiciones análogas a las encontradas para la dirección calibrada. Es decir, se asumirá que el periodo PTA en la dirección sur (no estudiada en Gibson et al. (2015)) tendrá las mismas condiciones que el periodo PMA del sentido norte, lo que será análogo para los 12 periodos considerados. Este supuesto es razonable considerando la estructura de demanda que tiene el eje, dado que en el periodo PMA la mayor cantidad de viajes y flujo se hace en sentido norte, mientras en la tarde se realiza en la dirección opuesta.

4.2.3. Demoras en intersecciones

Las demoras en intersecciones dependen de tres elementos: una demora uniforme, otra por aleatoriedad y sobresaturación y un factor de ahorro en demoras por coordinación de semáforos. Los modelos desarrollados en Gibson et al. (2015) contemplan el uso de múltiples variables para captar el efecto que las intersecciones semaforizadas tienen en los tres elementos mencionados anteriormente y por consiguiente en los tiempos medios de viaje. Las demoras uniformes y el factor por coordinación de semáforos dependen del tiempo de ciclo y del tiempo de verde, más el número de semáforos coordinados en el caso del factor por coordinación, para lo cual Gibson et al. (2015) consideran un valor promedio para cada sección y periodo. Para aquellos periodos que no son considerados en Gibson et al. (2015) pero sí en esta tesis, se asume que luego del periodo 10 (20:30 a 21:29) y hasta el 3 (05:30 a 06:29) las condiciones de los semáforos se mantienen constante.

Gibson et al. (2015) considera la demora uniforme como se observa en la Ecuación 4.1; construyendo la razón de verde efectivo (u) con el tiempo de verde (v) como *proxy* al tiempo de verde efectivo. Por otra parte el parámetro a_2 que corresponde a la probabilidad uniforme de parada (que depende del flujo a través del grado de saturación) corresponde a un parámetro a estimar en el modelo, y se hace sección-específico, es decir como una probabilidad promedio uniforme de parada para todas las intersecciones y periodos de cada sección. Esto último permite que se puedan extender fácilmente los parámetros estimados de demora uniforme a aquellos periodos no considerados en el estudio.

$$dem_u = \frac{c(1-u)^2}{2(1-ux)} = a_2 \frac{c}{2} (1-u) = a_2 \frac{c}{2} \left(1 - \frac{v}{c}\right) \quad (4.1)$$

En el caso de las demoras por sobresaturación, estas sí dependen exclusivamente de las condiciones temporales que tiene cada sección a lo largo del día en función de la estructura de la demanda y el flujo. Debido a que la congestión es visible particularmente en los periodos diurnos más demandados, no es necesario hacer supuestos para los periodos nocturnos que no fueron considerados en el análisis de Gibson et al. (2015). Sin embargo, debido al distinto nivel de agregación temporal, no es directo el uso de los parámetros reportados. Por lo anterior se utilizan valores promedios ponderados por la duración de los periodos de aquellos reportados en Gibson et al. (2015) para la confección de parámetros en los periodos considerados en este estudio.

Finalmente, al igual que para los tiempos de cruce se asume que el sentido sur tiene una operación análoga de la calibrada en el eje de Santa Rosa para la dirección norte.

4.3. Demanda

Existe un gran número de recorridos de buses de transporte público que hacen uso del tramo considerado, por lo que es importante determinar aquellos que serán considerados en este estudio. En este caso, solo se consideran aquellos que utilizan el eje en su totalidad,

dejando fuera a aquellos que usan solo una parte del tramo. Los recorridos considerados son los siguientes: 203, 203e, 205, 205e, 206, 206e, 207e, 209, 209e, y 230, para ambos sentidos de circulación.

La información de demanda utilizada corresponde a una semana de abril de 2013, y con esto se modela un día laboral promedio. Como se mencionó en el Capítulo 3, se hace a través de matrices O/D construidas paradero a paradero con subidas observadas y bajadas estimadas con metodología reportada en Munizaga y Palma (2012).

Para la confección de las matrices O/D no se consideraron validaciones hechas en zonas pagas, debido a que éstas no tienen un paradero de bajada asignado. Por otra parte, las subidas observadas tienen asociado un factor de expansión por todas aquellas validaciones en que no fue posible estimar un paradero de bajada como también por aquellos viajes en que no se conoce ni su origen ni su destino.

Otro elemento importante de mencionar es que no solo se utilizaron aquellas validaciones hechas desde y hacia el interior del eje considerado, sino que también todas aquellas que utilizaron el tramo para las que se utiliza el siguiente procedimiento:

- **Viajes con origen antes del tramo y bajada al interior:** En este caso se asume que el viaje se genera en el paradero 1, y se mantiene su paradero de bajada.
- **Viajes con origen dentro del tramo y bajada posterior a éste:** A los viajes con éstas características se le mantiene su paradero de subida, pero se asume bajan en el paradero número N.
- **Viajes con origen y destino fuera del tramo:** Para este tipo de validaciones se asume que el paradero de origen es el primero y su paradero de bajada es el n-ésimo.

Con las consideraciones anteriores, quedan definidas las matrices O/D, y con esto es posible caracterizar la demanda para cada una de las direcciones consideradas, calculando la demanda por hora, la carga y el largo promedio de los viajes.

4.3.1. Demanda desagregada

En la Tabla 4.2 se observan las demandas (pac/h) del caso base para cada una de las direcciones y periodos considerados. El periodo con mayor demanda por hora es el Periodo Punta Mañana (PMA) con aproximadamente 6.300 pasajeros por hora, seguidos por Periodo 5 y el Periodo Punta Tarde (PTA) con cerca de 5.000 pasajeros cada uno. El periodo menos demandado es el Periodo 2, que va desde las 01:00 a 05:29 y tiene una demanda de 68 pac/h .

El desbalance de la demanda por periodo tiene su origen tanto en las características del eje como en la de los viajes que se realizan en él, esto queda más claro a través de la Figura 4.2. En ella es posible observar que la dirección más cargada durante la mañana es la dirección 1, y en los periodos de la tarde es la dirección 2. Esto se debe a que durante la mañana la mayoría de los viajes que se realizan son de propósito obligado (estudio y trabajo), y dichas actividades se encuentran concentradas en el sector centro-oriente de la ciudad, por esta razón y debido a la orientación norte-sur del eje, se tiene dicha estructura de demanda.

Periodo	Dirección		Total (<i>pax/h</i>)
	1 (SN)	2 (NS)	
1	20	215	235
2	56	12	68
3	2.283	289	2.572
4 (PMA)	4.674	1.584	6.258
5	3.783	1.232	5.015
6	1.807	1.038	2.845
7	1.507	1.459	2.966
8	1.198	1.877	3.075
9 (PTA)	1.443	3.537	4.980
10	670	2.080	2.750
11	333	1.407	1.740
12	118	590	708
Total		65.399 (<i>pax/día</i>)	

Tabla 4.2: Demanda desagregada por dirección y periodo.

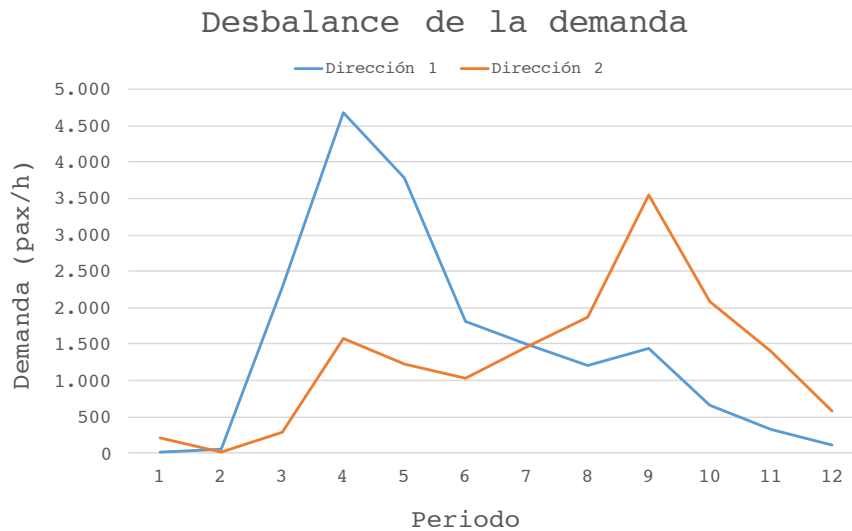


Figura 4.2: Desbalance espacial y temporal de la demanda.

4.3.2. Largo promedio de los viajes

Otro elemento importante para caracterizar la demanda es conocer el largo promedio de los viajes, ya que de esto y de la demanda dependerá el perfil de carga de las secciones, es decir, la cantidad de personas que finalmente se moverán entre cada uno de los paraderos. Por esta razón se utiliza una demanda ponderada por el largo promedio de los viajes como indicador de demanda para el análisis posterior de los distintos escenarios. En la Tabla 4.3 se observa que los viajes en el eje son de gran extensión, representando incluso un 54 % y hasta un 93 % del largo total del eje, para el periodo con menor y mayor largo promedio de viajes, respectivamente, lo que es coherente con la estructura de las validaciones en el tramo.

Periodo	Largo promedio de los viajes (<i>km</i>)		
	Sentido 1	Sentido 2	Total
1	4,69	5,28	5,23
2	8,23	8,11	8,21
3	7,29	4,09	6,93
4 (PMA)	6,13	3,61	5,49
5	5,07	3,65	4,72
6	5,48	4,12	4,98
7	5,07	4,72	4,90
8	4,78	5,33	5,12
9 (PTA)	4,27	6,29	5,70
10	4,91	6,37	6,01
11	4,57	6,55	6,17
12	4,12	6,69	6,26

Tabla 4.3: Largo promedio de los viajes para cada periodo.

4.3.3. Perfiles de carga

Como se mencionó, no solo es importante conocer la demanda por hora, sino que también la carga que con ésta se genera, es decir, la cantidad de personas que se mueven entre cada uno de los paraderos. Su importancia radica en el hecho de que el modelo establece como restricción que la frecuencia al menos satisfaga la carga máxima en cada uno de los periodos (con un factor de seguridad κ), de manera de asegurar una oferta mínima a los usuarios.

Periodo	Dirección	
	1	2
1	14	178
2	55	12
3	2.051	193
4 (PMA)	3.418	915
5	2.737	654
6	1.295	694
7	1.068	959
8	858	1.214
9 (PTA)	998	2.597
10	421	1.550
11	205	1.084
12	76	482

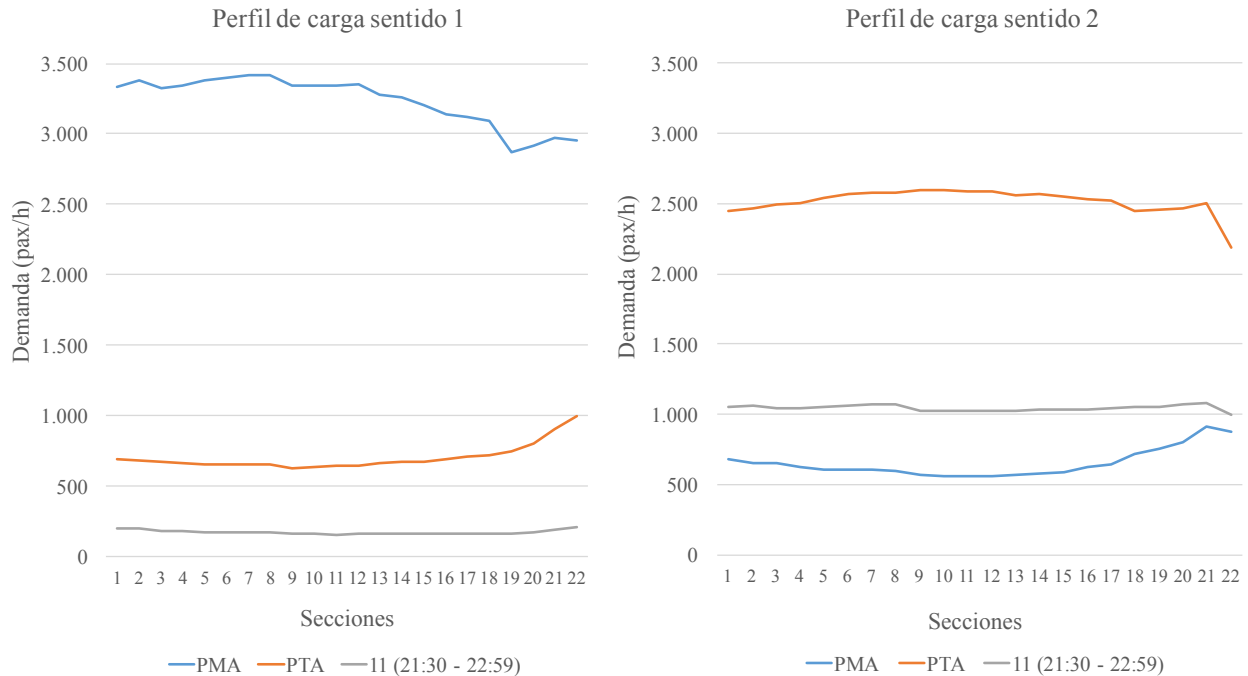
Tabla 4.4: Carga máxima de los tramos por dirección y periodo.

Las cargas de cada una de las secciones se construyen con las Fórmulas 3.12 y 3.13 presentadas en el Capítulo anterior. En la Tabla 4.4 se observa que las cargas máximas para los periodos de la mañana se dan en la dirección 1, mientras que en los periodos de la tarde es

en el sentido opuesto, consistente con la estructura de flujo del eje.

También es posible construir los perfiles de carga, correspondientes a la evolución de la carga a través de las 22 secciones consideradas, como se muestran en la Figura 4.3.3. En dicha figura se aprecia el perfil de carga para ambos sentidos de viaje para tres periodos, Punta Mañana (PMA), Punta Tarde (PTA) y el periodo 11, comprendido entre las 21:30 y las 22:59.

Figura 4.3: Perfiles de carga (pax/h) para ambas direcciones de estudio.



4.4. Otras consideraciones

En el escenario de aplicación se supondrá la posibilidad de determinar el tamaño óptimo de los buses dentro de un conjunto de cuatro posibles, los que tienen distintas características, capacidades y costos asociados, como se aprecia en la Tabla 4.5. El costo operacional de los buses (c_3) se obtiene de DTPM (2013), mientras que el costo de capital (c_1) se construye con datos de dicho estudio y utilizando un procedimiento reportado en Tirachini et al. (2010), para el cual se supone una vida útil de los buses de 12 años, un valor residual al final del periodo de evaluación de 0%, una tasa de descuento del 6% y 294 días laborales en promedio por año calendario.

Bus	Tipo	Largo (m)	Asientos	K ($plazas$)	c_1 ($\$/bus - dia$)	c_3 ($\$/bus - km$)
1	A1	8	20	50	15.302	206
2	A2	10	25	60	21.423	265
3	B2	12	25	90	33.664	308
4	C2	18	35	160	49.986	578

Tabla 4.5: Características de los tipos de buses considerados en el escenario.

4.5. Resumen

El modelo se aplica sobre un tramo de 8,8 kilómetros de extensión ubicado en Av. Santa Rosa, Santiago, Chile. El segmento utilizado tiene tres tramos con distintos nivel de segregación para la operación de los buses. El primer tramo cuenta con dos pistas en tráfico mixto por sentido, el segmento central con corredor segregado de buses con dos pistas por sentido, y el tramo final tiene tres pistas en tráfico mixto para cada sentido de operación. Los recorridos que hacen uso del eje utilizan un esquema de paradas divididas, las que se agregan para contener la información de demanda, quedando definidas finalmente 23 paradas que sirven en ambos sentidos de operación.

En relación a los tiempos de viaje estos están compuestos por tres elementos: tiempo de crucero, demoras en intersecciones semaforizadas y tiempo de operación en paraderos. Para las dos primeras componentes se utilizan modelos calibrados por Gibson et al. (2015), mientras que para el último se utiliza un modelo desarrollado en Tirachini et al. (2015). Si bien en el estudio de Gibson et al. (2015) se utilizan periodos de operación de media hora comprendidos entre 07:30 a 21:00, en esta investigación se utilizan 12 periodos que abarcan todo el día de operación.

En relación a la demanda se utilizan matrices O/D paradero a paradero, construidas a partir de subidas observadas y bajadas estimadas para el eje de estudio con metodología reportada en Munizaga y Palma (2012).

Capítulo 5

Resultados

En éste capítulo se presentan los principales resultados de la aplicación del modelo microeconómico. Para determinar la influencia de diversos elementos en la optimización de la frecuencia bajo un enfoque multiperiodo, se utiliza un escenario base y sobre él se analiza el efecto que tienen distintos escenarios de demanda, hacinamiento, duración de periodos punta, niveles de congestión, entre otros. De esta manera se busca realizar un análisis detallado que permita identificar los elementos y también la medida en que impactan en la determinación de la frecuencia tanto en periodos punta como fuera de punta.

5.1. Caso base

Antes de aplicar el modelo microeconómico en distintos escenarios, se requiere analizar los resultados que se obtienen del caso base. Para esto es necesario determinar el porcentaje de los costos operaciones que representan los costos de administración como también, una vez resuelto el modelo en el escenario descrito en el Capítulo 4, comparar los tiempos medios de viaje obtenidos con los reportados en Gibson et al. (2015) para validar su uso.

5.1.1. Calibración de costos de administración

Como se mencionó en el Capítulo 3, los costos de los operadores no solo están compuestos por costo de capital, tripulación y costos operacionales, sino que existen otros asociados generalmente a gastos de administración como arriendos y seguros, que requieren ser determinados correctamente. Como el modelo se probará para distintas instancias de demanda, la cantidad de vehículos necesarios en cada una de éstas será distinta, por lo que el gasto asociado a dicho componente debe necesariamente cambiar con el tamaño de la flota. Para calibrar el porcentaje que representan los costos de administración en los de operación se prueban con distintos porcentajes (como se aprecia en la Tabla 5.1), y se contrasta la estructura de costo resultante con una estructura promedio para un operador de Transantiago, reportada en DTPM (2013). En la Tabla 5.1 se aprecia la estructura de costos resultante para distintos

porcentajes de los costos de administración como parte de los costos operacionales. Además se utiliza el error porcentual absoluto medio (MAPE) para determinar el escenario que mejor se ajusta a la estructura promedio de Transantiago.

Estructura de Costos	Promedio	Diferencia con estructura promedio					
		40 %	42 %	44 %	46 %	48 %	50 %
Operacionales	37,8 %	37,5 %	37,2 %	36,9 %	36,6 %	36,3 %	36,1 %
Tripulación	33,6 %	36,7 %	36,5 %	36,2 %	35,9 %	35,7 %	35,4 %
Capital	12,2 %	10,8 %	10,8 %	10,7 %	10,6 %	10,6 %	10,5 %
Otros	16,4 %	15,0 %	15,6 %	16,2 %	16,8 %	17,4 %	18,0 %
MAPE		7,5 %	6,7 %	5,9 %	6,4 %	7,4 %	8,4 %

Tabla 5.1: Diferencia entre estructura de costos promedio y la del modelo.

Con las diferencias presentadas en la Tabla 5.1 se decide utilizar un porcentaje de 44 %. Es decir, los costos de administración se incluyen en el modelo como un 44 % de los costos operacionales.

5.1.2. Validación de los modelos de tiempo de viaje

Debido a la utilización de valores promedios ponderados de los parámetros reportados en Gibson et al. (2015), es necesario validar su uso para de ésta manera dejar definido el caso base sobre el cual se probarán los diversos escenarios. Por la diferencia de periodización considerada en dicho estudio respecto del modelo, se comparan los tiempos medios de viaje (suma de los tiempos de crucero, intersección y operación en paradero) con los reportados en Schneider (2014) para dos periodos con relativa coincidencia, en dirección centro. Los tiempos medios de viaje del modelo se obtienen sin optimizar, imponiendo un tamaño de bus y utilizando flujo observado (y frecuencia programada en periodos sin datos) inferido a partir de gráficos reportados en Schneider (2014) (Tabla 5.2), con el fin de hacer los escenarios comparables.

Primero es importante recalcar, como ya ha sido mencionado, que el modelo contempla $N - 1$ secciones, siendo N el número de paraderos considerados. Esta cantidad es mayor a la utilizada en Gibson et al. (2015), por lo que para fines comparativos se agregan los resultados del modelo en las mismas siete secciones consideradas en dicho estudio.

Las diferencias entre los tiempos medios de viaje del modelo y aquellos reportados en Schneider (2014) se presentan en la Tabla 5.3. Si bien las diferencias entre ambos no superan el 15 %, se observa una constante subestimación de los tiempos por parte del modelo, excepto en la primera sección. Esto se debe a una sobreestimación de las subidas en el primer paradero, debido a que se incorporan en él las validaciones que se hacen antes del tramo, y tienen bajada estimada dentro o fuera de él.

Las diferencias observadas se deben principalmente a dos fuentes. Las demoras en intersecciones consideradas en el modelo utilizan una probabilidad de detención que depende de

Periodo	Frecuencia Observada (<i>veh/h</i>)
1	26
2	5
3	66
PMA	120
5	100
6	80
7	70
8	70
PTA	100
10	83
11	52
12	27
Tipo de bus	12 <i>m</i>

Tabla 5.2: Frecuencias observadas y bus utilizado para efectos de comparación.

la demanda, elemento que no es considerado en Gibson et al. (2015), y por otra parte, no se utiliza el modelo de tiempo de paradero de dicho estudio, sino el reportado en Tirachini et al. (2015). Respecto del nivel de agregación de los tiempos, en el caso de Gibson et al. (2015) se estiman parámetros para periodos de hasta media hora; sin embargo, en el caso del modelo matemático desarrollado se utiliza un nivel de agregación mucho mayor, utilizando 12 periodos para abarcar todo el día de operación. Esta razón lleva a utilizar valores promedios ponderados de los parámetros estimados en Gibson et al. (2015), lo que corresponde a una segunda fuente de diferencia en los tiempos medios de viaje.

Tramo/Periodo	10:00 a 14:00			14:00 a 17:30 ¹		
	Schneider (2014)	Modelo ²	Δ	Schneider (2014)	Modelo	Δ
1	199	208	5 %	192	215	12 %
2	171	161	-6 %	169	159	-6 %
3	110	99	-10 %	111	104	-7 %
4	117	99	-15 %	124	110	-11 %
5	111	98	-12 %	117	108	-7 %
6	169	156	-8 %	167	152	-9 %
7	227	203	-11 %	202	198	-2 %

Tabla 5.3: Comparación tiempos medios de viaje (*s/km*) con Schneider (2014).

Las fuentes de diferencia entre los modelos se confirman haciendo un análisis de las tres componentes que forman los tiempos medios de viaje. Mientras en el caso de los tiempos de crucero (Tabla 5.4) no se observan diferencias para los periodos comparados, debido a que los parámetros asociados dependen en general solo de las condiciones geométricas de

¹Periodo en Schneider (2014) es desde 14:00 a 17:00

²Se utiliza un promedio ponderado para construir periodo considerado

las secciones y no del tiempo. En el caso de las demoras en intersecciones y paradero si se observan diferencias importantes.

Tramo/Periodo	10:00 a 14:00			14:00 a 17:30		
	Schneider (2014)	Modelo	Δ	Schneider (2014)	Modelo	Δ
1	133	133	0 %	133	133	0 %
2	133	133	0 %	133	133	0 %
3	79	79	0 %	79	79	0 %
4	79	79	0 %	79	79	0 %
5	79	79	0 %	79	79	0 %
6	133	133	0 %	133	133	0 %
7	133	133	0 %	133	133	0 %

Tabla 5.4: Comparación tiempos de cruceo (s/km) con Schneider (2014).

En relación a las demoras en intersecciones (Tabla 5.5), los tramos interiores (2 a 6) presentan una diferencia máxima de 22 %, lo que a pesar de ser importante es términos porcentuales, éstas no son tan significativas considerando la baja magnitud de los tiempos. Por otra parte sí se observan disparidades mayores en los tramos 1 y 7. Todas estas diferencias se explican por la utilización de valores promedios para los parámetros y también por la incorporación de un modelo de probabilidad de detención que depende de la demanda (subidas y bajadas) por bus en cada paradero. Esto último explica por qué las mayores diferencias se presentan en las secciones extremas, pues son en éstas donde se sobreestiman las subidas y bajadas para incorporar validaciones que se hacen antes del tramo y tienen bajada estimada dentro o fuera, como también aquellas que se hacen al interior pero su bajada es posterior al tramo de estudio.

Tramo/Periodo	10:00 a 14:00			14:00 a 17:30		
	Schneider (2014)	Modelo	Δ	Schneider (2014)	Modelo	Δ
1	48	31	-35 %	43	48	13 %
2	23	21	-10 %	22	20	-10 %
3	18	16	-9 %	21	22	3 %
4	16	13	-20 %	24	25	5 %
5	16	13	-15 %	23	24	7 %
6	10	9	-10 %	9	7	-22 %
7	66	47	-29 %	42	44	6 %

Tabla 5.5: Comparación demoras en intersecciones (s/km) con Schneider (2014).

Las mayores diferencias en los tiempos medios de viaje se obtienen en la componente de la operación en paradero (Tabla 5.6), donde se aprecia una constante subestimación de los tiempos a excepción del tramo 1. Las razones de dicha disparidad está en que se utilizan distintos modelos para la determinación de esta componente y a la incorporación de subidas y bajadas en las secciones extremas, como se mencionó en la Sección 4.3.

Las diferencias presentadas en algunos componentes de los tiempos medios de viaje se encuentran justificadas por la incorporación de modelos y demanda que no ha sido considerada en los estudios con los que se compara. Con esto en consideración, los valores obtenidos son coherentes y cercanos en términos de magnitud a los estimados en Schneider (2014), razón por la cual se decide utilizar dichos modelos de tiempos de viajes en el escenario de aplicación del modelo microeconómico de oferta óptima de una línea de transporte público.

Tramo/Periodo	10:00 a 14:00			14:00 a 17:30		
	Schneider (2014)	Modelo	Δ	Schneider (2014)	Modelo	Δ
1	18	44	149 %	16	34	105 %
2	15	7	-53 %	14	6	-56 %
3	12	3	-74 %	11	3	-77 %
4	21	7	-67 %	21	6	-72 %
5	16	5	-68 %	15	4	-71 %
6	26	14	-47 %	25	13	-50 %
7	29	24	-18 %	28	21	-23 %

Tabla 5.6: Comparación demoras en paradero (s/km) con Schneider (2014).

5.1.3. Optimización de instancia menor

En esta sección se resolverá el problema de optimización descrito en el Capítulo 3 para una instancia ficticia de dos periodos de operación, para esto se considera la demanda de los periodos 3 (05:30 a 06:29) y el Periodo Punta Mañana (06:30 a 08:29), a los que se les asocian los tiempos de viaje de los periodos 1 y 2, respectivamente. El objetivo es poder comparar la solución obtenida a través del modelo propuesto en la Sección 3.5, con una enumeración de soluciones dentro del espacio factible. De esta manera, se comprobará la efectividad de la solución encontrada, como también permitirá conocer más acerca de las propiedades del problema.

Para la optimización de la instancia de dos periodos se mantuvieron los valores de los parámetros que utiliza el modelo, excepto por el número de periodos considerados. Por su parte, para la enumeración de soluciones se programó un *script* en MATLAB y de esta manera se calculó el valor de la función objetivo (Ecuación 3.21) utilizando valores de frecuencia entera desde $fmin$ hasta $fmax$ para los cuatro tamaño de vehículos considerados. Así, el *script* calcula la función de gasto para todas las combinaciones de frecuencia y tamaño de vehículo, y elige la que tiene el menor costo total para el sistema.

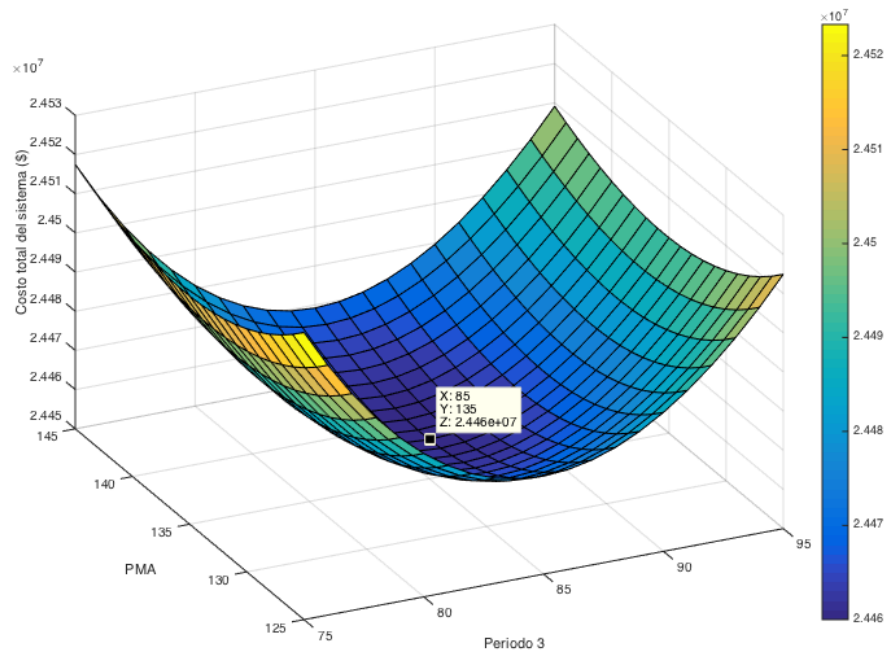
Las frecuencias encontradas en ambos procedimientos, así como también los costos totales del sistema se presentan en la Tabla 5.7. En ella se puede apreciar el valor prácticamente idéntico que se obtiene en términos de frecuencia para cada periodo. A pesar de lo anterior, la solución encontrada a través del proceso de optimización siempre es mejor, debido al uso de valores entero en el proceso de enumeración de soluciones.

Con lo anterior es posible confirmar la validez del procedimiento propuesto en la Sección

Tamaño de vehículo	Optimización			Enumeración		
	f_{P_3}	f_{P_4}	Costo Total	f_{P_3}	f_{P_4}	Costo Total
8m	85,5	135,0	\$ 24.459.950	85	135	\$ 24.459.976
10m	70,4	108,7	\$ 24.783.705	70	109	\$ 24.783.769
12m	62,7	92,1	\$ 25.509.250	63	92	\$ 25.509.270
18m	43,8	64,5	\$ 27.760.567	44	65	\$ 27.761.036

Tabla 5.7: Comparación proceso de optimización con enumeración para dos periodos.

Figura 5.1: Gráfico de la función objetivo entorno a la solución óptima para dos periodos.



3.5 para encontrar el óptimo global del problema. A su vez, utilizando las facilidades que entrega una instancia de solo dos periodos, se grafica la función objetivo entorno al óptimo para conocer más sobre la propiedades de problema.

Como es posible ver en la Figura 5.1, se tiene una función convexa, y por lo tanto es posible asegurar que el mínimo encontrado corresponde al óptimo global. Sin embargo, es importante destacar que la función objetivo es robusta en entorno al óptimo, ya que el valor de la función objetivo no cambia de gran manera dentro del espacio graficado.

5.1.4. Optimización: Caso Base

Dada la multiplicidad de periodos considerados en este estudio, se construirán indicadores de demanda y frecuencia que permitirán analizar de mejor manera los resultados. La razón de demanda (Ecuación 5.1) de un periodo i se define como la razón entre la demanda por

hora ponderada por el largo promedio de los viajes del periodo punta, sobre la demanda ponderada por el largo promedio de los viajes del periodo el i . Por su parte la razón de frecuencia (Ecuación 5.2) de un periodo i , es la razón entre la frecuencia óptima del periodo punta sobre la del periodo i . De esta manera, valores altos y bajos en ambas razones implican diferencias de demanda y frecuencias entre periodos, ya sea por un valor mayor en el periodo punta (razón mayor a uno) o en el otro periodo considerado (razón menor a uno). Para efectos de esta tesis todos los periodos se compararán respecto del periodo Punta Mañana (PMA) por ser el más demandado.

$$\text{Razón de demanda} = \frac{Y_{peak} \left(\frac{pax}{h} \right) \cdot l_{peak}(km)}{Y_i \left(\frac{pax}{h} \right) \cdot l_i(km)} \quad (5.1)$$

$$\text{Razón de frecuencia} = \frac{f_{peak} \left(\frac{veh}{h} \right)}{f_i \left(\frac{veh}{h} \right)} \quad (5.2)$$

Los resultados de la optimización del modelo para el caso base se presentan en la Tabla 5.8. Es importante notar que se obtienen resultados coherentes con los niveles de demanda y esperados respecto de las razones de frecuencia. Se observan menores valores en la frecuencia óptima en la medida que aumenta la razón de demanda, es decir, conforme crece la diferencia de demanda con el periodo Punta Mañana (Figura 5.2).

Periodo	Horario	Demanda por día: 65.399			
		Razón demanda	f (veh/h)	f_{PMA}/f	t_c (min)
1	00:00 - 00:59	27,94	12,8	9,67	39,3
2	01:00 - 05:29	61,52	6,6	18,93	38,7
3	05:30 - 06:29	1,93	85,7	1,45	41,0
PMA	06:30 - 08:29	1,00	124,0	1,00	49,2
5	08:30 - 09:29	1,45	109,8	1,13	51,1
6	09:30 - 12:29	2,42	64,2	1,93	45,4
7	12:30 - 13:59	2,37	62,5	1,99	45,8
8	14:00 - 17:29	2,18	67,0	1,85	47,9
PTA	17:30 - 20:29	1,21	120,1	1,03	47,1
10	20:30 - 21:29	2,08	73,5	1,69	42,4
11	21:30 - 22:59	3,20	52,6	2,36	41,5
12	23:00 - 23:59	7,75	26,8	4,62	39,9
Tipo vehículo		8m			
Costo total		\$ 54.288.937			
Kilómetros recorridos		13.269			

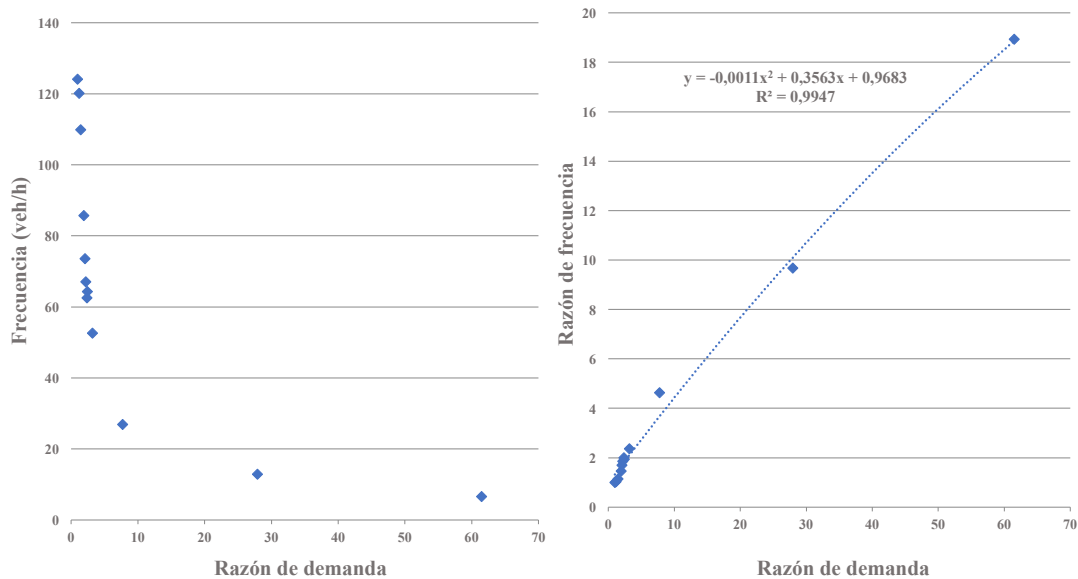
Tabla 5.8: Resultados de frecuencia y tamaño de vehículo para caso base.

Si bien existen diferencias en las razones de frecuencia en función de la demanda, esta disparidad no es constante, y en general las diferencias de frecuencia entre periodos no son muy significativas (a excepción de los periodos nocturnos). Lo anterior es posible de observar

en la Figura 5.2, donde se grafica la frecuencias y razones de frecuencia en función de la razón de demanda para los 12 periodos estudiados. En esta se aprecia la existencia de 8 periodos cuyas razones de frecuencia son menores a 2 a pesar de que la demanda del periodo PMA es hasta 2,4 veces la del fuera de punta. Visto de otro modo, para el caso base, solo desde una razón de demanda mayor a 3,2 se justifica reducir la frecuencia a más de la mitad respecto del periodo Punta Mañana.

Por otra parte, se resuelve el modelo de frecuencia óptima para los cuatro tamaños de vehículos disponibles, como se observa en la Figura 5.3. En este escenario, y bajo las características del modelo desarrollado, los buses de 8m resultan ser los de menor costo para el sistema. No obstante lo anterior, es importante destacar que las diferencias entre los distintos tamaños de buses resultan no ser muy significativas, a excepción de los buses de 18m que tienen un costo mucho mayor a los otros considerados.

Figura 5.2: Gráfico de razón de frecuencia y frecuencia en función de la demanda.

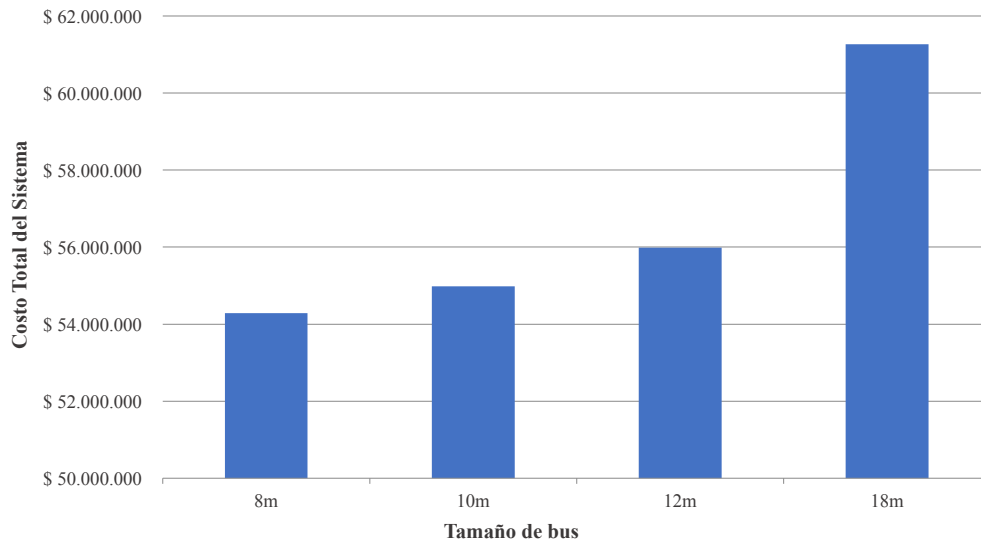


Estos resultados reflejan la idea de que la determinación de la frecuencia óptima en modelos multiperiodo son procesos complejos que requieren análisis acabados para determinar condiciones o escenarios que influyen en él.

Es también interesante comparar los resultados obtenidos en el caso base con la aplicación de la regla de la raíz cuadrada. Por las similitudes en las consideraciones del modelo, como también por simplicidad, se utiliza la regla de la raíz cuadrada propuesta en el primer modelo de Jansson (1980) (Ecuación 2.5). Es decir, se utilizará un modelo de un solo periodo con parámetros dedicados a cada uno de los 12 periodos considerados. No se utiliza uno de sus modelos multiperiodo debido a que éstos asumen el mismo tamaño de flota en periodo punta y fuera de punta, con el fin de obtener una expresión analítica.

Los parámetros utilizados para la aplicación de la regla de la raíz cuadrada, como los tiempos y el valor del tiempo de viaje, se obtienen del caso base optimizado. En el caso del primero, el parámetro T corresponde a todo el tiempo empleado por el bus fuera de la

Figura 5.3: Comparación de los costos totales del sistema a distintos tamaños de buses



operación en paradero, por lo que se sumó los tiempos de cruce e intersección de todas las secciones por cada periodo. En el caso del valor del tiempo de viaje (P_v), se utilizó un promedio de todas las secciones (considerando ambas direcciones) para cada uno de los periodos. El tiempo de subida y bajada del bus (s/pax) corresponde a la suma de los tiempos de subida y bajada para el tamaño de bus óptimo en el escenario base. Por otra parte, para la demanda por hora, como también el largo del recorrido y el largo promedio de viaje, se utilizan los mismos valores que en el caso base. Respecto del costo (c) de los vehículos, al igual que en la expresión propuesta por Jansson (1980), se utiliza un costo en $\$/h$, el que se obtiene de los parámetros utilizados en el escenario base. Con lo anterior, los resultados de aplicar el primero modelo de Jansson (1980) se observan en la Tabla 5.9.

En la Tabla 5.9 se observa el valor de la frecuencia y la razón de frecuencia tanto para el modelo propuesto como también para la regla de la raíz cuadrada. En ella se puede observar que para los periodos más demandados (PMA y PTA) la regla de la raíz determina una menor frecuencia que aquella obtenida a través del modelo propuesto. Este valor podría ser aún menor tomando en cuenta que solo se está considerando el costo en $\$/h$ de los vehículos. En términos de razón de frecuencia es interesante notar que para los periodos fuera de punta nocturnos, como también para aquellos comprendidos entre 09:30 a 17:29, se tiene una menor razón de frecuencia al utilizar la regla de la raíz cuadrada, impulsado por el valor de la frecuencia en dichos periodos.

A pesar de la simpleza del modelo propuesto por Jansson (1980), en la Tabla 5.9 es posible ver que los resultados de frecuencia son coherentes con aquellos resultantes del modelo propuesto y no son muy diferentes en términos de magnitud, lo que es ayudado por cierto, por el hecho de utilizar valores de parámetros que resultan de la optimización del caso base.

Periodo	Modelo		Jansson (1980)	
	f (veh/h)	f_{PMA}/f	f (veh/h)	f_{PMA}/f
1	12,8	9,67	15,7	7,65
2	6,6	18,93	8,2	14,55
3	85,7	1,45	68,5	1,75
PMA	124,0	1,00	119,8	1,00
5	109,8	1,13	92,3	1,30
6	64,2	1,93	65,8	1,82
7	62,5	1,99	67,5	1,78
8	67,0	1,85	67,8	1,77
PTA	120,1	1,03	101,4	1,18
10	73,5	1,69	69,2	1,73
11	52,6	2,36	50,7	2,36
12	26,8	4,62	29,1	4,11

Tabla 5.9: Comparación de modelo propuesto y regla de la raíz cuadrada.

5.2. Efecto de niveles de demanda

A continuación se presentan los resultados obtenidos de aplicar el modelo microeconómico a distintos niveles de afluencia. En la Tabla 5.10 se presentan las razones de frecuencia de seis periodos en nueve escenarios de demanda contruidos a partir del caso base, donde se amplifica la demanda de manera uniforme por factores que van desde 0,03 hasta 3.

Escenario	Demanda (pax/día)	Tamaño bus	Razón de frecuencia					
			2	PMA	5	7	PTA	10
1	1.962	8m	4,53	1,00	1,04	1,23	0,96	1,26
2	6.540	8m	9,10	1,00	1,04	1,32	0,96	1,32
3	19.620	8m	11,85	1,00	1,04	1,56	0,98	1,48
Base	65.399	8m	18,93	1,00	1,13	1,99	1,03	1,69
5 (*)	98.098	8m	18,30	1,00	1,03	1,72	1,00	1,42
6 (*)	117.717	10m	18,26	1,00	1,02	1,74	1,00	1,46
7 (*)	163.496	12m	16,20	1,00	1,02	1,47	1,00	1,23
8 (*)	183.116	12m	15,22	1,00	1,02	1,33	1,00	1,10
9 (*)	196.196	12m	14,64	1,00	1,02	1,25	1,00	1,04
Razón de demanda			61,5	1,0	1,5	2,4	1,2	2,1

Tabla 5.10: Razón de frecuencia y tamaño de bus para distintos nivel de demanda.

De la Tabla 5.10 es importante mencionar los valores de razón de frecuencia que se obtienen para el periodo PTA, especialmente desde el Periodo 5 al Periodo 9, donde es igual a 1,00. Esto se debe a que en dichos periodos la restricción de frecuencia máxima para los periodos PMA y PTA se encuentra activa (simbolizado con (*)) en la Tabla 5.10) y por tanto su valor no responde netamente al cambio de demanda de un escenario a otro.

En el Periodo 2 se observan las mayores razones de frecuencia de todos los periodos estudiados, lo que se debe a la diferencia que existe entre su demanda y la del periodo PMA. A pesar de lo anterior, es importante destacar los bajos valores de razón de frecuencia que se tiene en los escenarios 1, 2 y 3, considerando la importante razón de demanda que este periodo tiene, y a pesar de que cuente con una restricción de frecuencia mínima activa para el Escenario 1. En éstos tres escenarios se justifica una diferencia de máximo 11,85 veces respecto del periodo punta, mientras que en un escenario con mayor afluencia (e.g., Escenario 9) la frecuencia del periodo punta es 14,64 veces la del Periodo 2. Lo anterior, a pesar de que la restricción de frecuencia máxima se encuentre activa en los Escenarios 5 a 9, da indicios de la distinta respuesta que tienen mercados de baja y alta demanda.

De la Tabla 5.10 también se advierte que cuando la demanda del periodo punta es hasta 1,5 veces la del fuera de punta, no se justifican mayores diferencias de frecuencia entre periodos; mientras que en otros, donde se aprecian mayores disimilitudes, éstas llegan a 99% solo cuando la demanda del periodo punta es 2,4 veces la demanda del periodo fuera de punta. Otro elemento interesante de mencionar es la poca diferencia que existe entre la frecuencia del periodo PMA y la del periodo 5. En éste último se observan razones de frecuencia prácticamente constante entorno a uno, lo que se debe a que a pesar de ser un periodo fuera de punta, sus características lo hacen similar a uno punta, con una demanda y carga máxima solo superadas por la del periodo PMA, además de un alto tiempo de ciclo asociado.

Para entender mejor el efecto que tienen los distintos niveles de afluencia, en Tabla 5.11 se presentan los resultados de imponer un mayor tamaño de bus en periodos con restricción de frecuencia máxima activa.

Escenario	Demanda (pax/día)	Bus	Razón de frecuencia					
			2	PMA	5	7	PTA	10
5	98.098	18m	15,00	1,00	1,02	1,67	0,94	1,50
6	117.717	18m	15,05	1,00	1,02	1,71	0,94	1,51
7	163.496	18m	18,32	1,00	1,02	1,79	0,95	1,55
8	183.116	18m	19,20	1,00	1,02	1,81	0,97 (*)	1,56
9 (*)	196.196	18m	19,03	1,00	1,02	1,76	1,00	1,51
Razón de demanda			61,5	1,0	1,5	2,4	1,2	2,1

Tabla 5.11: Razones de frecuencia para niveles de demanda sin restricciones activa.

Lo más importante de destacar dice relación con las diferencias presentadas en los distintos escenarios de demanda. En la Tabla 5.10, para mercados de baja afluencia, para razones de demanda menores a 2,5, no se observan importantes diferencias de frecuencia entre periodos. Por ejemplo, se observa que en los Escenarios 1 y 2 no justifica una diferencia más grande que 32% respecto del Periodo PMA para los Periodos 7 y 10. Mientras que estos mismos periodos, con la misma diferencia de demanda respecto del periodo PMA, pero en un escenario de mayor demanda absoluta, en la Tabla 5.11 se observa que justifican una diferencia de frecuencia de hasta 88%. Es decir, se aprecia que en la medida que aumenta la afluencia del escenario también lo hace la razón de frecuencia, lo que va en la línea de los resultados encontrados en la literatura (Tirachini, 2014). Esto se debe a que los beneficios percibidos por los usuarios

en un aumento de frecuencia para un periodo fuera de punta (menor tiempo de espera y de viaje), son mayores en un mercado de baja demanda. Dicho de otra manera, al ser menores los beneficios de los usuarios por aumentos de frecuencia en mercados de alta demanda, la ponderación de los ahorros de los costos de los operadores por disminución de la frecuencia aumenta.

La diferencia que tiene aumentar la frecuencia en mercados de baja y alta demanda es posible de observar a través del estudio de las ecuaciones presentes en la Sección 3.3. Para esto se analizará cómo cambia el beneficio, en términos de costo de usuarios y operadores, al aumentar la frecuencia desde f a $f + 1$ en periodos fuera de punta. Para esto se considerará una sección i y un paradero k en un periodo de operación p .

Utilizando la definición del costo de tiempo de espera de la Ecuación 3.9, a continuación se presenta la disparidad en el costo de tiempo de espera al aumento de la frecuencia en una unidad:

$$\Delta C_w = \frac{P_w D^p S_k^{1,p}}{2(f+1)} - \frac{P_w D^p S_k^{1,p}}{2f} = \frac{-P_w D^p S_k^{1,p}}{2f(f+1)} \quad (5.3)$$

De la Ecuación 5.3 se aprecia que ΔC_w disminuye de manera no lineal con $1/f(f+1)$, de modo que el beneficio en tiempo de espera disminuirá conforme aumenta el valor de la frecuencia. Por otra parte es importante destacar el valor negativo de la diferencia, lo que se debe a que los costos de tiempo de espera se reducen con el aumento de frecuencia.

La diferencia de costo de tiempo en vehículo al aumentar la frecuencia en una unidad se muestra a continuación. Se utiliza la definición de la Ecuación 3.10, además de suponer por simplicidad que el tiempo de intersección, el valor del tiempo de viaje y la probabilidad de detención en paradero es independiente de la frecuencia.

$$\Delta C_v = P_v \left[T_{cr} + T_I + \frac{bS_k^{1,p}}{(f+1)} + \frac{alB_k^{1,p}}{(f+1)} + C_0 \cdot Prob \right] - \quad (5.4)$$

$$P_v \left[T_{cr} + T_I + \frac{bS_k^{1,p}}{f} + \frac{aB_k^{1,p}}{f} + C_0 \cdot Prob \right]$$

Reduciendo la expresión:

$$\Delta C_v = P_v \left[\frac{-bS_k^{1,p}}{f(f+1)} + \frac{-alB_k^{1,p}}{f(f+1)} \right] = \frac{-P_v}{f(f+1)} [bS_k^{1,p} + alB_k^{1,p}] \quad (5.5)$$

Al igual que el costo de tiempo de espera, la diferencia en el costo del tiempo de viaje disminuye de forma no lineal con $1/f(f+1)$, es decir, se tendrán mayores beneficios de reducción de tiempo de viaje al aumentar la frecuencia el mercados con valores bajos de ésta, que en aquellos donde es alto.

Además de los costos de los usuarios es importante analizar el cambio que tienen los costos de los operadores ante un cambio en la frecuencia, por lo que se estudian los costos de operación y tripulación. Como se analiza un aumento de frecuencia en un periodo fuera de punta, y generalmente quienes determinan el tamaño de flota son los periodos punta, se asume que el vehículo extra requerido ya está considerado dentro del tamaño de flota, por lo que no se estudia el cambio de costo de capital. La diferencia de costo de operación (incluyendo el gasto en administración) al aumentar la frecuencia en una unidad se presenta en las Ecuaciones 5.6 - 5.7.

$$\Delta C_{op} = (1 + \theta) c_3 D^p l^i (f + 1) - (1 + \theta) c_3 l^i D^p f = (1 + \theta) c_3 D^p l^i (f + 1 - f) \quad (5.6)$$

$$\Delta C_{op} = (1 + \theta) c_3 (L_b) D^p l^i \quad (5.7)$$

Es decir, la diferencia en el gasto de operación de aumentar la frecuencia en una unidad es constante, y no habrá diferencias de hacer dicho incremento en mercados de baja o alta demanda. La diferencia del costo de tripulación, definido según la Ecuación 3.17, se muestra a continuación:

$$\Delta C_{trip} = c_2 D^p (f + 1) T_c|_{f+1} - c_2 D^p f T_c|_f \quad (5.8)$$

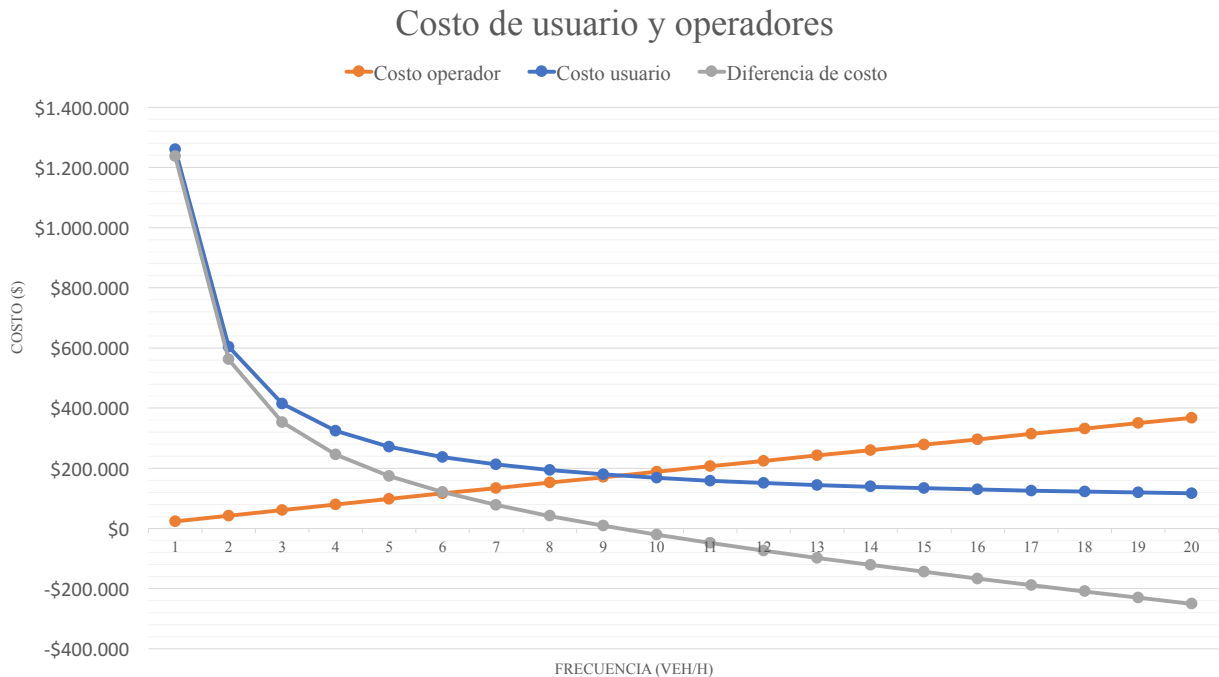
$$\Delta C_{trip} = c_2 D^p f \left(T_c|_{f+1} - T_c|_f + \frac{T_c|_{f+1}}{f} \right) \quad (5.9)$$

Para entender la Ecuación 5.9 es necesario conocer el comportamiento del tiempo de ciclo, definido en la Ecuación 3.8. Sabiendo que el tiempo de crucero es constante y asumiendo tal condición para el tiempo en intersección, entonces se tendrá un tiempo de ciclo monotonamente decreciente con el valor de f , y lo hará de manera no lineal con $1/f$. Entonces, conforme aumenta la frecuencia, mientras el tercer término del paréntesis de la Ecuación 5.9 tiende a cero, la diferencia de tiempo de ciclo ($T_c|_{f+1} - T_c|_f$) se hará cada vez más pequeña. De esta manera, si bien aumenta el costo de tripulación conforme lo hace la frecuencia, lo hará de manera decreciente debido al término del paréntesis. Es decir, la diferencia de costo de tripulación producto de un aumento en la frecuencia de una unidad será mayor en mercados donde ésta es menor.

Con todo esto se tiene que $\Delta C_{usuario}$ es decreciente con el valor de la frecuencia, mientras que en el caso de los operadores se tiene por una parte una diferencia de costo constante (independiente de la frecuencia) y otra que crece a tasa decrecientes. Por esta razón, conforme aumenta el valor de la frecuencia, disminuye el peso relativo del beneficio de los usuarios y la ponderación de los costos de los operadores aumenta, provocando que los beneficios percibidos por los usuarios en un aumento de frecuencia para un periodo fuera de punta (menor tiempo de espera y de viaje), sean mayores en un mercado de baja demanda, que son aquellos con menores frecuencias asociadas.

La diferencia de respuesta en mercados de alta y baja demanda también se observa en la Figura 5.4, donde se grafica el gasto de los usuarios, operadores y la diferencia de éstos, a distintos valores de frecuencia para el periodo PMA en un escenario de baja demanda (Escenario 1). En la Figura se observa que conforme aumenta la frecuencia, el gasto de los usuarios disminuye a tasas decrecientes, mientras que el de los operadores aumenta a tasa prácticamente constante. Lo anterior provoca que en mercados de alta demanda (y frecuencia asociada) se tenga una mayor ponderación de los ahorros en el costo de los operadores por disminución de frecuencia, mientras que en mercados de baja demanda esta ponderación disminuye producto del mayor beneficio que obtienen los usuarios al aumento de frecuencia.

Figura 5.4: Costo de operadores y usuarios a distintos valores de frecuencia.

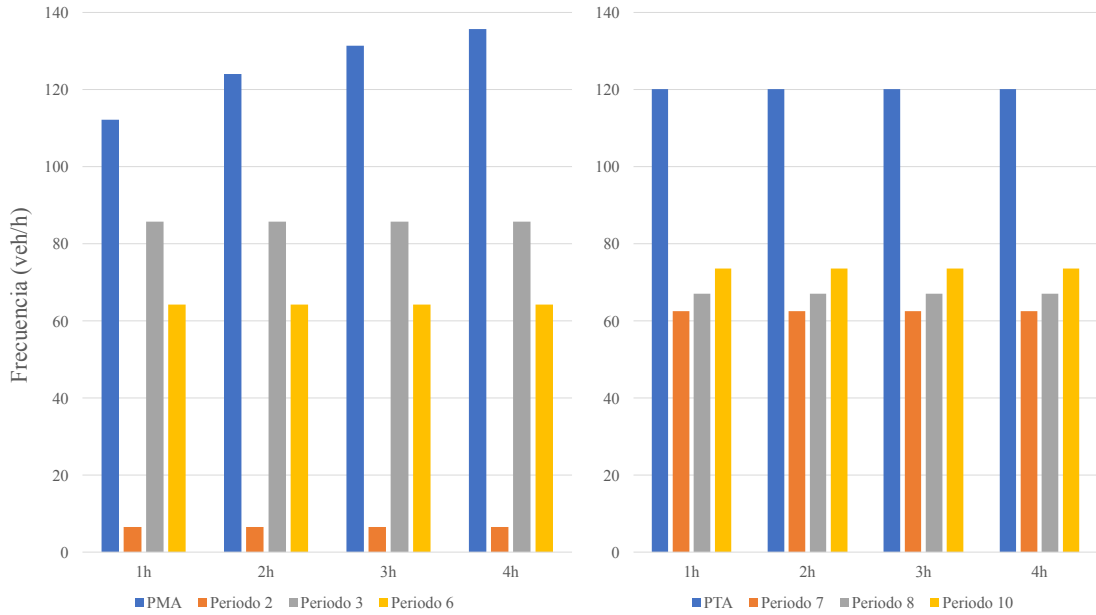


5.3. Efecto de la duración de periodos

Un elemento que no ha sido estudiado en la literatura es el efecto que provoca la duración de los periodos en la determinación de la frecuencia óptima bajo un esquema multiperiodo. Es decir, la influencia que tiene la demanda absoluta de un periodo en particular. Para determinar las consecuencias que esto tiene, se calcula la frecuencia óptima para duraciones de los periodos punta que van desde una hasta cuatro horas, manteniendo constante el número de pasajeros por hora (pax/h) mientras se aumenta o reduce, según el caso, la duración de los periodos fuera de punta aledaños.

En la Figura 5.5 se observa la frecuencia de diversos periodos para las distintas duraciones de los periodos punta. En ésta se aprecia que la frecuencia de los periodos fuera de punta y del periodo PTA, se mantiene prácticamente constante, mientras que el Periodo PMA aumenta su frecuencia en la medida que lo hace la duración del periodo. Esto se debe a que al aumentar

Figura 5.5: Cambio de frecuencia (veh/h) a distinta duración (h) de periodos punta.



la duración del periodo más demandado, y que determina el tamaño de flota del sistema, se incrementa el peso relativo de dichas horas en el total del día, y por tanto el modelo responde aumentando la frecuencia con el fin de reducir los costos de los usuarios del periodo.

Lo anterior tiene importantes consecuencias en las razones de frecuencias, ya que al mantenerse constante la variable para periodos fuera de punta y aumentar en el periodo más demandado, aumenta la razón de frecuencia de los periodos. Es decir, escenarios con periodos puntas más largos tienden a justificar una mayor diferencias de frecuencia de los periodos fuera de punta respecto del punta. Lo anterior es fácil observar en la Tabla 5.12, donde por ejemplo la razón de frecuencia del Periodo 6 pasa de 1,7 a 2,1 conforme aumentan las horas del período PMA.

5.4. Efecto de implementar una medida de prioridad

Uno de los principales problemas que enfrentan los buses del sistema de transporte público es el alto nivel de congestión, el que no solo impacta en los tiempos, sino que también en los costos de operadores y usuarios. Por esta razón se crean tres escenarios con distinto nivel de congestión para determinar el impacto que tiene en la pregunta de esta investigación. Los escenarios se describen a continuación:

1. **Escenario caso base:** Corresponde al escenario descrito en el Capítulo 4, obtenido de Gibson et al. (2015). Considera dos tramos de tráfico mixto, con 2,4 km de extensión cada uno, además de un tramo central con corredor segregado de buses de dos pistas y 4,8 km de extensión.
2. **Escenario corredor segregado:** En este escenario se asume un corredor segregado de

Periodo	Duración periodo PMA			
	1h	2h	3h	4h
1	8,7	9,7	10,2	10,6
2	17,2	18,9	20,1	20,7
3	1,3	1,4	1,5	1,6
PMA	1,0	1,0	1,0	1,0
5	1,0	1,1	1,2	1,2
6	1,7	1,9	2,0	2,1
7	1,8	2,0	2,1	2,2
8	1,7	1,9	2,0	2,0
PTA	1,0	1,0	1,1	1,1
10	1,5	1,7	1,8	1,8
11	2,1	2,4	2,5	2,6
12	4,2	4,6	4,9	5,1

Tabla 5.12: Razon de frecuencia a distintas duraciones del periodo PMA.

dos pistas a lo largo de todo el eje. Para esto se replican en todo el tramo los parámetros estimados en Gibson et al. (2015) para el corredor segregado de avenida Santa Rosa.

3. **Escenario congestionado:** Para confeccionar un escenario con alta congestión se replican los parámetros estimados en Gibson et al. (2015) para el último tramo de avenida Santa Rosa, es decir, se asume tres pistas en tráfico mixto para toda la extensión del eje.

Periodo	Escenario: Congestión		Escenario: Base		Escenario: Corredor	
	f (veh/h)	f_{PMA}/f	f (veh/h)	f_{PMA}/f	f (veh/h)	f_{PMA}/f
1	12,0	7,14	12,5	6,86	12,7	6,75
2	6,2	13,88	6,5	13,23	6,6	12,97
3	53,3	1,60	56,0	1,52	57,3	1,49
PMA	85,5 (*)	1,00	85,5 (*)	1,00	85,5 (*)	1,00
5	68,9	1,24	75,3	1,13	78,9	1,08
6	48,2	1,77	52,4	1,63	54,9	1,56
7	49,0	1,74	53,2	1,61	55,8	1,53
8	49,7	1,72	53,9	1,59	56,3	1,52
PTA	78,3	1,09	85,7	1,00	89,1	0,96
10	51,3	1,67	53,9	1,59	55,1	1,55
11	38,3	2,23	40,3	2,12	41,2	2,08
12	22,3	3,83	23,4	3,65	23,8	3,59

Tabla 5.13: Resultados de frecuencia a distintos niveles de congestión.

De esta manera se tienen tres escenarios con distinto nivel de congestión; corredor segregado, caso base y caso congestionado. Estos tres escenarios se optimizan en el modelo sin considerar un valor del tiempo de viaje sensible a la tasa de ocupación del bus, sino que se considera un valor del tiempo de viaje constante e igual a \$2.626 pesos por hora para los

periodos fuera de punta y un valor constante e igual a \$3.389 pesos por hora para los periodos punta. Estos valores, reportados en Batarce et al. (2015), se asocian a densidades de 1 a 2 pax/m^2 y de 3 a 4 pax/m^2 , respectivamente.

En la Tabla 5.13 se muestran las frecuencias óptimas para los distintos escenarios, y en ella se aprecia un aumento de la frecuencia en todos los periodos en la medida que el nivel de congestión disminuye, esto ocurre debido a que con la segregación de los buses disminuyen los costos de operadores y usuarios, posibilitando un aumento de frecuencia. La única excepción a lo anterior es el periodo PMA, donde la frecuencia se mantiene constante a lo largo de los escenarios debido a la restricción de capacidad activa (*). Lo anterior tiene como consecuencia una disminución de la razón de frecuencia en la medida que se reducen los tiempos de viaje. Para conocer el efecto que provoca esta medida sin una restricción de capacidad activa, se fija el tamaño de bus en 12m.

Periodo	Escenario: Congestión		Escenario: Base			Escenario: Corredor		
	f (veh/h)	f_{PMA}/f	f (veh/h)	f_{PMA}/f	Δ	f (veh/h)	f_{PMA}/f	Δ
1	10,5	5,39	10,8	5,81	3 %	11,0	5,99	1 %
2	5,5	10,33	5,7	11,12	4 %	5,7	11,46	1 %
3	46,1	1,23	47,9	1,32	4 %	48,7	1,35	2 %
PMA	56,5	1,00	63,0	1,00	11 %	65,8	1,00	5 %
5	55,2	1,02	61,5	1,02	12 %	66,7	0,99	8 %
6	42,0	1,34	44,9	1,40	7 %	46,5	1,42	4 %
7	42,7	1,32	45,6	1,38	7 %	47,3	1,39	4 %
8	43,5	1,30	46,3	1,36	6 %	47,9	1,37	3 %
PTA	59,5	0,95	66,7	0,94	12 %	70,2	0,94	5 %
10	44,4	1,27	46,1	1,37	4 %	46,8	1,41	2 %
11	33,3	1,70	34,7	1,82	4 %	35,2	1,87	2 %
12	19,5	2,90	20,2	3,12	4 %	20,4	3,22	1 %

Tabla 5.14: Frecuencias óptimas a distintos niveles de congestión sin restricción activa.

En la Tabla 5.14 se tienen las frecuencias óptimas y también sus diferencias respecto del caso previo (Δ) para distintos niveles de congestión en escenarios sin restricción de capacidad activa. En ésta se aprecia un aumento de la frecuencia en todos los periodos conforme disminuye la congestión percibida por los buses. Al igual que en el caso anterior, esto se debe a que un aumento en la velocidad comercial de los buses reduce tanto los costos de los operadores como también el tiempo de viaje de los usuarios; ante esto, el mayor peso relativo del costo asociado al tiempo de espera es compensado con un aumento de frecuencia. Es importante observar que, contrario a lo que pasa cuando la restricción de capacidad es activa (Tabla 5.13), la razón de frecuencia aumenta en la medida que se reduce la congestión. Esto se debe a que si bien un aumento de velocidad incentiva un incremento de frecuencia en todos los periodos, es en aquellos más congestionados donde se percibe una mayor disminución del tiempo de ciclo, provocando los mayores impacto en términos de frecuencia. Lo anterior es fácil de observar en la Tabla 5.14, donde los mayores cambios de frecuencia se observan en los periodos punta y también en los contiguos a ellos, mientras que los menores se dan en los periodos nocturnos.

Otro elemento interesante de destacar es el hecho de que el periodo 5 tenga más frecuencia que el periodo PMA en el caso de corredor segregado. Para los escenarios congestionado y base, es el periodo 5 el que tiene mayor tiempo de ciclo, y por tanto es éste el que determina la flota como también el que percibe mayores ahorros conforme disminuye la congestión. Esto explica que sea éste periodo el que percibe mayores aumentos en términos de frecuencia a lo largo de los tres escenarios, pasando a ser mayor que la frecuencia del periodo PMA en un escenario con corredor segregado. Lo anterior también se produce en el periodo PTA, donde a pesar de tener el mismo tamaño de flota que el periodo PMA, un menor tiempo de ciclo asociado permite ofrecer una mayor frecuencia.

De esta manera, si no existen restricciones de capacidad activa, en un escenario donde se ejecuta una medida que permita reducir la congestión se tenderá a aumentar la frecuencia óptima en todos los periodos pero en mayor proporción en aquellos más congestionados, por tanto se justificará una mayor diferencia de frecuencia entre periodos respecto de la situación base, lo que va en la línea de los resultados encontrados en la literatura (Basso y Silva, 2014). Estos resultados, sin embargo, no se obtienen necesariamente al utilizar un modelo donde el valor del tiempo de viaje es sensible a la tasa de ocupación del bus. El estudio de las distintas variables que inciden en este proceso, por tanto, es materia de investigación futura.

5.5. Efecto de un P_v sensible al hacinamiento

Los usuarios de un sistema de transporte público perciben importantes costos en su uso, por lo que no solo es esencial incorporarlos dentro del análisis, sino que es básico para el buen desarrollo del sistema. Tanto la consideración de éstos en un enfoque multiperiodo, como las implicancias que tienen en la pregunta de investigación, son una de las principales motivaciones para el desarrollo de esta tesis, razón por la cual se incorpora en los costos de los usuarios el hecho de que el valor del tiempo de viaje aumenta conforme lo hace el hacinamiento, es decir, mientras peor es la calidad del viaje, mayor es la disposición a pagar por reducir el tiempo de traslado. El efecto del nivel de hacinamiento en el valor del tiempo en vehículo ha sido mostrado en diversos estudios (e.g., Wardman y Whelan, 2011; Tirachini et al., 2013). En el caso de Santiago, en este estudio se utilizará los resultados de Batarce et al. (2015), quienes estiman el valor del tiempo de viaje para distintos niveles de densidad de pasajeros a través del uso de datos de preferencias declaradas y reveladas.

Como el modelo en su caso base incorpora hacinamiento en el valor del tiempo de viaje (ver Figura 3.3.1 en Sección 3.3.1), para conocer el efecto que éste tiene en la determinación de la frecuencia óptima, se crea un escenario donde el valor del tiempo de viaje es fijo e insensible al nivel de hacinamiento en el vehículo. Para esto se utiliza un valor del tiempo de viaje reportado en Batarce et al. (2015), el que está asociado a bajas densidades de pasajeros ($1 - 2 \text{ pax}/\text{m}^2$) y que tiene un valor de \$2,626 por hora. Así, los valores de frecuencia y tamaño de bus óptimo para este escenario se presentan en la Tabla 5.15.

Lo primero que se destaca en la Tabla 5.15 es la mayor frecuencia obtenida en todos los periodos cuando se considera un valor del tiempo de viaje sensible a la tasa de ocupación del bus. Lo anterior también se traduce en una mayor oferta (plazas/h) ofrecida por el sistema

Periodo	Escenario: Caso Base			Escenario: $P_v = Cte.$		
	f (veh/h)	f_{PMA}/f	plazas/h	f	f_{PMA}/f	plazas/h
2	6,6	18,93	328	6,5	13,23	323
3	85,7	1,45	4285	56,0	1,52	2.802
PMA	124,0	1,00	6.202	85,5	1,00	4.273
5	109,8	1,13	5.489	75,3	1,13	3.766
7	62,5	1,99	3.124	53,2	1,61	2.661
PTA	120,1	1,03	6.007	78,8	1,08	3.942
11	52,6	2,36	2.628	40,3	2,12	2.015
12	26,8	4,62	1.341	23,4	3,65	1.170
Tipo bus	8m			8m		
Costo total	\$ 54.288.937			\$ 55.528.275		
Kilómetros recorridos	13.629			10.078		

Tabla 5.15: Resultados de escenario con valor constante del tiempo de viaje.

en cada uno de los periodos considerados. Esto se debe a un mayor valor del tiempo de viaje en los periodos punta respecto de aquel considerado en un escenario constante.

Periodo	Escenario: P_v sensible	$P_v = Cte.$
2	\$ 2.240	
3	\$ 2.951	
PMA	\$ 3.139	
5	\$ 2.781	\$ 2.626
7	\$ 2.395	
PTA	\$ 2.252	
11	\$ 2.193	
12	\$ 2.175	

Tabla 5.16: P_v fijando frecuencia de escenario constante en Dirección 1.

Para confirmar lo anterior, en la Tabla 5.16 se calcula el valor del tiempo de viaje promedio de todas las secciones en la Dirección 1 (sur a norte) para cada uno de los periodos considerados, fijando la frecuencia a aquella obtenida en el escenario con valor del tiempo de viaje constante. Es interesante notar que si bien, en un escenario con el valor del tiempo de viaje sensible a la tasa de ocupación de bus se obtienen mayores frecuencias en todos los periodos, el valor del tiempo de viaje (para la misma frecuencia) es solo superior al caso constante en tres (Periodo 3, PMA y Periodo 5). El nivel de demanda que presentan dichos periodos en la dirección considerada genera el mayor valor del tiempo de viaje, y por consiguiente el modelo responde aumentando la frecuencia para reducir los costos del sistema. Dado que es el periodo PMA el que determina la flota, una mayor frecuencia en éste genera un menor costo marginal de aumentar la frecuencia en los periodos fuera de punta, lo que explica los valores observados.

Por otra parte, en la Tabla 5.15 también es posible observar una mayor razón de frecuencia

en un escenario donde el valor del tiempo de viaje es sensible a la tasa de ocupación del bus. Como se acaba de mencionar, es en los periodos más demandados donde el hacinamiento incrementa el valor del tiempo de viaje por sobre el utilizado en el caso constante; efecto que predomina por sobre la reducción en el costo marginal de aumentar la frecuencia en el resto de los periodos, acrecentando la diferencia de frecuencia entre periodos. La excepción a lo anterior se produce en los Periodos 3 y PTA, donde se obtiene una razón de frecuencia mayor en el caso constante. Esto se debe a que en este último escenario, la restricción de capacidad se encuentra activa para el periodo PMA (ennegrecido en Tabla 5.15), por lo que el valor de su frecuencia es mayor al óptimo.

Periodo	Escenario: Caso Base		Escenario: $P_v = Cte.$	
	f (veh/h)	f_{PMA}/f	f	f_{PMA}/f
2	5,7	14,33	5,7	10,43
3	63,3	1,29	47,9	1,23
PMA	81,5	1,00	59,0	1,00
5	79,4	1,03	57,9	1,02
7	49,5	1,65	45,6	1,29
PTA	85,9	0,95	62,5	0,94
11	39,8	2,05	34,7	1,70
Tipo bus	12m		12m	
Costo total	\$ 55.989.251		\$ 58.905.857	
Kilómetros recorridos	10.075		8.207	

Tabla 5.17: Resultados de escenario con valor constante del tiempo de viaje.

Para obviar el efecto de la restricción de capacidad activa, en la Tabla 5.17 se presenta la frecuencia óptima de ambos escenarios considerando un mayor tamaño de vehículo (12 m). Como era esperado, se observan mayor razones de frecuencia en todos los periodos del Caso Base, debido al mayor impacto que tiene la consideración de la tasa de ocupación en los periodos más demandados. Por otra parte, para el escenario con valor del tiempo de viaje constante se aprecia una menor razón de frecuencia en comparación con aquella obtenida sin fijar el tamaño de bus (Tabla 5.15), debido a que en este último escenario la restricción de capacidad para el periodo PMA se encontraba activa, y por tanto el valor de la frecuencia era mayor al óptimo.

Los anteriores resultados se obtienen de comparar un escenario donde el valor del tiempo de viaje varía en función de la tasa de ocupación de los buses, con uno donde el valor del tiempo de viaje es constante e igual a un valor asociado a densidades de 1 a 2 pasajes por metro cuadrado. Para complementar este análisis, es importante saber las implicancias que tienen distintos valores del tiempo de viaje en el caso constante, razón por la que se crean dos nuevos escenarios. El primer caso utiliza un valor del tiempo de viaje de \$ 2.158 por hora, que corresponde al intercepto de la curva estimada para el valor de tiempo de viaje (Ecuación 3.11), es decir, corresponde a un valor del tiempo asociado a densidades de cero pasajeros por metro cuadrado. El segundo escenario utiliza un valor del tiempo de \$ 3.389 por hora, y corresponde a un valor promedio del tiempo de viaje asociado a densidades de 3 a 4 pasajeros por metro cuadrado (Batarce et al. (2015)).

Debido a que la restricción de capacidad es activa en los tres escenarios con valor del tiempo de viaje constante, en la Tabla 5.18 se muestran los valores de frecuencia y razón de frecuencia imponiendo un tamaño de vehículo, obviando dicho efecto.

Periodo	Caso Base		$P_v = 2,158$		$P_v = 2,626$		$P_v = 3,389$	
	$f(veh/h)$	f_{PMA}/f	f	f_{PMA}/f	f	f_{PMA}/f	f	f_{PMA}/f
2	5,7	14,33	5,6	9,83	5,7	10,43	5,7	11,17
3	63,3	1,29	45,6	1,22	47,9	1,23	51,5	1,23
PMA	81,5	1,00	55,5	1,00	59,0	1,00	63,4	1,00
5	79,4	1,03	54,5	1,02	57,9	1,02	62,1	1,02
7	49,5	1,65	44,0	1,26	45,6	1,29	48,3	1,31
PTA	85,9	0,95	58,9	0,94	62,5	0,94	67,2	0,94
11	39,8	2,05	33,5	1,65	34,7	1,70	36,4	1,74
Tipo bus	12m							

Tabla 5.18: Frecuencia óptima para distintos valores de $P_v = Cte$.

En la Tabla 5.18 se observan menores razones de frecuencia en todos los escenarios con valor del tiempo de viaje constante, lo que se debe principalmente al mayor impacto que tiene la consideración de la tasa de ocupación en los periodos más demandados y por otro, al aumento en el peso relativo del valor del tiempo de espera cuando se considera un valor tiempo de viaje constante, lo que genera un incentivo para aumentar la frecuencia en periodos fuera de punta. Por otra parte, se observan razones de frecuencia crecientes conforme lo hace el valor del tiempo de viaje constante. Esto se debe a que un mayor valor del tiempo de viaje aumenta el peso relativo de los periodos más demandados, debido a los costos que en éstos se observan, justificando un aumento de frecuencia y acrecentando la diferencia de frecuencia entre periodos. Es decir, para el caso constante, menores valores el tiempo de viaje incentiva menores diferencias de frecuencias entre periodos punta y fuera de punta.

A lo largo de esta sección se ha mostrado que la utilización de un valor del tiempo de viaje variable es un elemento importante a considerar dentro de la determinación de la frecuencia óptima, especialmente en un escenario multiperiodo. La consideración de la tasa de ocupación en el valor del tiempo de viaje genera, en primer lugar, un aumento en el valor de la frecuencia en todos los periodos respecto del caso constante. Esto se debe al mayor valor del tiempo de viaje que genera su consideración, especialmente en los periodos más demandados que son quienes determinan el tamaño de flota y por consiguiente, la disminución en el costo marginal de aumentar la frecuencia en los periodos menos demandados, acrecentando el efecto. No obstante lo anterior, el aumento de frecuencia en los periodos más demandados predomina por sobre el efecto de aumento en los periodos fuera de punta, lo que genera una mayor diferencia de frecuencia entre periodos en un caso que considera la tasa de ocupación de los buses. También es importante notar el efecto que provoca la consideración de distintos valores del tiempo de viaje en un escenario constante, debido a que un mayor valor del tiempo de viaje aumenta el peso relativo de los periodos más demandados y por consiguiente se genera una mayor diferencia de frecuencia entre periodos.

5.6. Efecto turno de conductores

Un supuesto implícito en la estructura de costos del modelo es la total flexibilidad para determinar la cantidad de conductores en cada periodo, lo que tiene como consecuencia un costo por hora constante a lo largo de todo el día de operación. Lo anterior puede no ser totalmente cierto dependiendo de las restricciones laborales que se deban cumplir y podría tener importantes implicancias en la pregunta de esta investigación. Para determinar el efecto que provoca dicha consideración se crea un escenario opuesto al descrito; es decir, uno donde se tienen tres turnos de trabajo, y por tanto el costo de la tripulación para cada periodo está determinado por aquel más cargado dentro del turno que lo contiene.

Por simplicidad se utilizan sin modificar los periodos considerados en el modelo. Esto tiene como consecuencia la creación de tres turnos, como se observa en la Tabla 5.19, donde dos de ellos tienen duración levemente distinta a ocho horas. Sin embargo, lo anterior no tiene implicancias dentro de la formulación ya que ningún periodo demandado (que determinan los costos de tamaño de flota) se encuentra al inicio o término de dichos turnos, por lo que multiplicando su costo por ocho horas funcionan en la práctica como tres turnos con igual duración.

Turno	Periodos	Horario	Duración (h)
T1	3, PMA, 5, 6, 7	05:30 - 13:59	8,5
T2	8, PTA, 10	14:00 - 21:29	7,5
T3	11, 12, 1, 2	21:30 - 05:29	8,0

Tabla 5.19: Turnos para conductores considerados.

De esta manera, el costo asociado a la tripulación (Ecuación 3.17) cambia, quedando como se observa en la Ecuación 5.10, donde c_2 es el costo en $\$/h$ de cada uno de los conductores. Así, aplicando este escenario se obtienen resultados para frecuencia óptima que se muestran en la Tabla 5.20.

$$C_{trip} = c_2 \cdot 8h \cdot (Max_{T1} \{f^p T_c^p\} + Max_{T2} \{f^p T_c^p\} + Max_{T3} \{f^p T_c^p\}) \quad (5.10)$$

En la Tabla 5.20 se aprecia una disminución de la frecuencia óptima para los periodos más demandados de cada turno. También se observa un aumento en la frecuencia de todos los periodos fuera de punta (a excepción del Periodo 5), lo que sumado a lo anterior provoca una importante disminución de las razones de frecuencia respecto de aquellas obtenidas en el caso base. Por ejemplo, para los periodos 6, 7 y 8 que en el caso base justificaban diferencias de frecuencia de hasta prácticamente un 100 %, en un escenario donde los costos de la tripulación se definen por tres turnos, éstas diferencias llegan solo a un 34 %, a pesar de que la demanda del periodo PMA es entre 2,18 y 2,42 veces la de dichos periodos. Esto ocurre por dos efectos simultáneos; por una parte se tiene un aumento de los costos de los operadores, provocando la disminución de frecuencia en los periodos más cargados, y por otra, este esquema de costos genera una mayor disponibilidad de conductores en los periodos fuera de punta, lo que provoca un menor costo marginal de aumentar la frecuencia en dichos periodos. El Periodo

Periodo	Turno	Escenario: Case base		Escenario: Turno		
		f (veh/h)	f_{PMA}/f	f (veh/h)	Δf	f_{PMA}/f
1	T3	12,8	9,67	16,0	24 %	6,59
2	T3	6,6	18,93	8,2	25 %	12,88
3	T1	85,7	1,45	103,0	20 %	1,02
PMA	T1	124,0	1,00	105,2	-15 %	1,00
5	T1	109,8	1,13	102,3	-7 %	1,03
6	T1	64,2	1,93	79,9	24 %	1,32
7	T1	62,5	1,99	78,2	25 %	1,34
8	T2	67,0	1,85	84,1	26 %	1,25
PTA	T2	120,1	1,03	97,8	-19 %	1,08
10	T2	73,5	1,69	89,4	22 %	1,18
11	T3	52,6	2,36	35,4	-33 %	2,97
12	T3	26,8	4,62	32,8	22 %	3,21
Tipo de bus		8m		8m		
Costo total		\$ 54.288.937		\$ 56.474.414		

Tabla 5.20: Resultados para escenario de turno de conductores.

5 ve disminuida su frecuencia ante un esquema rígido en el costo de los conductores debido a que este escenario provoca una disminución importante en la variable de operación del periodo PMA, con ello, es el periodo fuera de punta en que pasa a definir el tamaño de flota del turno que los contiene, lo que incentiva una reducción de la frecuencia de dicho periodo. Todo esto se desarrolla en las iteraciones propias del método de resolución del problema de optimización, terminando con un tamaño de flota similar en ambos periodos.

De ésta manera, una estructura de costos rígida donde los costos de los conductores dependen de los periodos más demandados de cada turno, justificará menores razones de frecuencia que un esquema totalmente flexible. Esto es interesante de notar dado que en la realidad se tiene una situación entre medio de los dos escenarios estudiados, ya que no es flexible como se asume en el modelo, pero tampoco completamente rígida dado que se tiene la posibilidad, hasta cierto grado, de utilizar conductores *part-time*.

5.7. Otras consideraciones

En las secciones anteriores se ha estudiado el efecto que provocan los distintos niveles de demanda, la duración de los periodos punta, el nivel de congestión, la consideración de hacinamiento y las diferencias entre una estructura de costos de tripulación flexible y rígida. Adicionalmente, hay algunas otras consideraciones que se quisieran estudiar para conocer el impacto que tienen en la determinación de la frecuencia óptima bajo un enfoque multiperiodo. Éstas son: intervalos regulares del tiempo entre buses y periodos con distinta valoración del tiempo de espera.

5.7.1. Distribución del intervalo entre buses

Una de las principales motivaciones para el desarrollo de esta tesis dice relación con los importantes costos que los usuarios perciben en periodos fuera de punta debido a las menores frecuencias provistas. Si dichos costos son correctamente internalizados, lleva en múltiples escenarios a justificar mayores frecuencias en los periodos fuera de punta, llegando en algunos casos a justificar frecuencias similares a la de aquellos periodos más demandados.

Lo anterior nos demuestra lo importante de realizar un análisis de sensibilidad a cualquier elemento que pueda afectar la determinación de la frecuencia bajo un enfoque multiperiodo. Por esta razón, en esta sección se estudia el impacto que tiene uno de los principales supuestos con los que se construye el costo asociado al tiempo de espera de los usuarios (Ecuación 3.9), y es que la llegada de los buses a los paraderos se rigen por un proceso *poisson*, es decir, que la distribución del tiempo entre buses es exponencial. Con lo anterior, el tiempo promedio de espera esperado corresponde al intervalo, sin embargo en esta sección se estudia el impacto que tiene la utilización de intervalos regulares entre buses y por tanto un tiempo promedio de espera de la mitad del intervalo.

Para saber el efecto que tienen intervalos de tiempo regulares entre buses, el costo asociado al tiempo de espera se modifica como se aprecia en la Ecuación 5.11.

$$C_w = \sum_{p=1}^P P_w D_p \left(\sum_{k=1}^N \frac{S_k^{1,p}}{2f^p} + \sum_{k=1}^N \frac{S_k^{2,p}}{2f^p} \right) \quad (5.11)$$

Aplicar esta nueva distribución para el llegada de los buses reduce incertidumbre a la posibilidad de abordar o no un bus debido a que la carga promedio de éstos pasa a ser constante (manteniendo el supuesto de llegada uniforme de los usuarios). Por esto, se reduce el factor de seguridad (κ) en la restricción de capacidad (Ecuación 3.23) de 0,8 a 0,9. Lo anterior, sin embargo, no tiene mayor relevancia dado que para el escenario de demanda base ningún periodo presenta una restricción de capacidad activa. Los resultados de aplicar este escenario en el modelo se observan en la Tabla 5.21.

En la Tabla 5.21 se aprecia una disminución de la frecuencia de todos los periodos cuando se utilizan intervalos de tiempo regulares entre buses. Notar que estas diferencias no son constantes y difieren dependiendo del nivel de demanda del periodo. Para los periodos más demandados (PMA, 5 y PTA) se tiene una reducción de frecuencia de entre 3% y 5%, mientras que en periodos fuera de punta nocturno se tienen disminuciones que van desde 8% hasta 27%. Lo anterior se debe a que este nuevo esquema genera una disminución en el tiempo promedio de espera de los usuarios, y con esto, un menor costo asociado, provocando una mayor ponderación del costo de los operadores y así una disminución de la frecuencia. Como ya se ha mencionado, los mayores beneficios por reducción del tiempo promedio de espera se dará en los periodos con frecuencias más bajas, por lo que será en éstos (periodos nocturnos) los que percibirán una ponderación mayor de los costos de los operadores y por consiguiente, verán reducidas sus frecuencias en un valor mayor en comparación con el resto de los periodos. Para ilustrar este punto, considerar que el beneficio en ahorro de tiempo de espera es mayor cuando la frecuencia aumenta de 3 a 4 *veh/h*, que cuando lo hace de 19 a

Periodo	Escenario: Case base		Escenario: Int. Regulares		
	f (veh/h)	f_{PMA}/f	f (veh/h)	Δf	f_{PMA}/f
1	12,8	9,67	9,8	-24 %	12,35
2	6,6	18,93	4,8	-27 %	25,15
3	85,7	1,45	82,1	-4 %	1,47
PMA	124,0	1,00	120,7	-3 %	1,00
5	109,8	1,13	104,4	-5 %	1,16
6	64,2	1,93	58,1	-10 %	2,08
7	62,5	1,99	55,7	-11 %	2,17
8	67,0	1,85	60,9	-9 %	1,98
PTA	120,1	1,03	115,1	-4 %	1,05
10	73,5	1,69	68,8	-6 %	1,75
11	52,6	2,36	48,1	-8 %	2,51
12	26,8	4,62	22,9	-14 %	5,26
Tipo de bus	8m		8m		
Costo total	\$ 54.288.937		\$ 52.122.514		

Tabla 5.21: Frecuencias óptimas utilizando intervalos regulares entre buses.

20 veh/h. Lo anterior se traduce en mayores razones de frecuencia de los periodos, es decir, se tendrán mayores diferencias de frecuencias respecto del periodo punta en un escenario con intervalos de tiempo regulares entre buses.

5.7.2. Sensibilidad al valor del tiempo de espera

La disposición a pagar de los usuarios por disminuir en una unidad su tiempo de viaje depende en gran medida de la etapa del viaje y de la actividad que se espera realizar. Tiempos de espera, donde en general no se realiza ninguna actividad más que aguardar por el bus ni se tiene seguridad del arribo de éste (aumentando el tiempo percibido por el usuario), generan una mayor valoración del tiempo, especialmente si la actividad que se hará al final del viaje tiene restricciones duras de tiempo, como trabajo o estudio. Por lo anterior, es necesario realizar un análisis de sensibilidad al valor del tiempo de espera, y así incorporar en el análisis costos que de otra forma se podrían estar subestimando.

Para analizar el efecto que tiene un mayor valor del tiempo de espera en la pregunta de esta investigación, se crean dos escenarios con valores de un 15 % y un 30 % más (en periodos punta), que el reportado en Batarce et al. (2015).

En la Tabla 5.22 se observan aumentos de frecuencia en ambos periodos punta debido al incremento en el valor del tiempo de espera, lo que difiere con la respuesta que se tiene en el resto de los periodos. Esto se debe a que un mayor valor del tiempo de espera genera aumentos en los costos asociados a dichos periodos, mientras que las condiciones de viaje en el resto se mantienen iguales. Así, el modelo compensa aumentando la frecuencia para reducir costos. De esta manera, considerar un valor mayor en el tiempo de espera para periodos punta

Periodo	Escenario: Base		$VT_e = \$5,638$			$VT_e = \$6,374$		
	f (veh/h)	f_{PMA}/f	f (veh/h)	Δf	f_{PMA}/f	f (veh/h)	Δf	f_{PMA}/f
1	12,8	9,67	12,8	0,0 %	9,74	12,8	0,0 %	9,82
2	6,6	18,93	6,6	0,0 %	19,08	6,6	0,0 %	19,23
3	85,7	1,45	85,7	0,0 %	1,46	85,7	0,0 %	1,47
PMA	124,0	1,00	125,0	0,8 %	1,00	126,0	1,6 %	1,00
5	109,8	1,13	109,8	0,0 %	1,14	109,8	0,0 %	1,15
6	64,2	1,93	64,2	0,0 %	1,95	64,2	0,0 %	1,96
7	62,5	1,99	62,5	0,0 %	2,00	62,5	0,0 %	2,02
8	67,0	1,85	67,0	0,0 %	1,87	67,0	0,0 %	1,88
PTA	120,1	1,03	121,6	1,2 %	1,03	123,1	2,5 %	1,02
10	73,5	1,69	73,5	0,0 %	1,70	73,5	0,0 %	1,71
11	52,6	2,36	52,6	0,0 %	2,38	52,6	0,0 %	2,40
12	26,8	4,62	26,8	0,0 %	4,66	26,8	0,0 %	4,70

Tabla 5.22: Resultados a distintos valores del tiempo de espera en periodos punta.

hará aumentar la frecuencia de éstos, mientras el resto se mantiene prácticamente constante, justificando una mayor diferencia de frecuencia entre periodos.

5.8. Análisis de costos

Para ciudades como Santiago, donde en muchas localidades el sistema de transporte público puede tener un servicio deficiente, es necesario estudiar las frecuencias desde un enfoque multiperiodo que permita considerar los costos, en términos de tiempos de espera y en vehículo, que tienen los usuarios en periodos menos demandados. Sin embargo es también responsable, dado los millonarios montos que el sistema inflige al estado, estudiar los costos que tienen los diversos escenarios.

A continuación se analizarán los resultados obtenidos de la optimización del caso base, presentados en la Sección 5.1.4, con los de un escenario en donde se impone una frecuencia similar a la del periodo que determina el tamaño de flota de cada turno. De esta manera se podrá cuantificar el costo de mantener un régimen de éste tipo versus uno tradicional, como es el caso base. Para el escenario con frecuencias similares entre periodos se consideraron los turnos de conductores definidos en la Sección 5.6, como se aprecia en la Tabla 5.23.

En esta tabla es posible ver una disminución importante en la razón de frecuencia de todos los periodos, lo que trae consigo una reducción considerable del costo percibido por los usuarios, como también una facilidad de uso del sistema, pues solo se consideran tres frecuencias distintas a lo largo de todo el día de operación. Todo lo anterior, a cambio de un aumento del 7% en el costo total del sistema. Ahorros como el último mencionado, sin embargo, no son captados por el modelo como beneficios, lo que podría hacer la diferencia entre escenarios aún menor.

Periodo	Escenario: Caso base		Frecuencia Similar	
	f (veh/h)	f_{PMA}/f	f (veh/h)	f_{PMA}/f
1	12,8	9,67	53,0	2,34
2	6,6	18,93	53,0	2,34
3	85,7	1,45	124,0	1,0
PMA	124,0	1,00	124,0	1,0
5	109,8	1,13	124,0	1,0
6	64,2	1,93	124,0	1,0
7	62,5	1,99	124,0	1,0
8	67,0	1,85	120,0	1,03
PTA	120,1	1,03	120,0	1,03
10	73,5	1,69	120,0	1,03
11	52,6	2,36	53,0	2,34
12	26,8	4,62	53,0	2,34
Tipo de bus	8m		8m	
Costo total	\$ 54.288.937		\$ 58.327.258 ($\Delta 7\%$)	

Tabla 5.23: Comparación caso base y escenario con frecuencias similares entre periodos.

En la tabla 5.24 se presenta el desglose de los costos totales del sistema para el Caso Base y también para aquel con frecuencias similares entre periodos. Como se aprecia en ésta, existe un aumento del 7% en los costos totales del sistema para un escenario con el uso de solo tres frecuencias de operación durante el día, lo que se debe al aumento del 46% que percibe el operador. Lo anterior contrasta con la situación de los usuarios, que ven reducido su costo en un 7% debido a la importante reducción en términos de tiempo de espera (32%).

Es decir, en este caso, pasar desde un esquema como el del escenario base a uno con frecuencias similares entre periodos, genera un aumento de solo un 7% en el sistema, a pesar del 46% de aumento en el costo de los operadores. Esto se debe al importante beneficio que genera un esquema con frecuencias similares en el costo percibido por los usuarios.

5.9. Resumen de resultados

En las secciones anteriores se han estudiado múltiples escenarios con el fin de determinar sus implicancias en la determinación de la frecuencia óptima bajo un enfoque multiperiodo, encontrando casos que incentivan a utilizar frecuencias similares entre periodos y otros en los que se justifican mayores diferencias de frecuencia entre periodos punta y fuera de punta. En la Tabla 5.25 se hace un resumen de las implicancias que tiene cada uno de los casos estudiados, asumiendo un aumento o el uso de cada escenario, según corresponda, y tomando como punto de comparación el caso base estudiado.

Es importante destacar que los resultados en términos de razón de frecuencia pueden variar en el caso de implementar una medida que aumente la velocidad comercial de los buses,

Estructura de costos	Escenario: Caso base	Frecuencias similares	Δ
Costo total	\$ 54.288.937	\$ 58.327.458	7 %
Costo tiempo de espera	\$ 4.138.844	\$ 2.827.786	-32 %
Costo tiempo de viaje	\$ 34.889.092	\$ 33.285.259	-5 %
Costo de usuarios	\$ 39.027.936	\$ 36.113.046	-7 %
Costo operacional	\$ 5.628.454	\$ 8.655.344	54 %
Costo tripulación	\$ 5.523.001	\$ 8.070.943	46 %
Costo capital	\$ 1.633.026	\$ 1.679.773	3 %
Costo administración	\$ 2.476.520	\$ 3.808.352	54 %
Costo operador	\$ 15.261.001	\$ 22.214.412	46 %

Tabla 5.24: Comparación de costos para escenario con frecuencias similares.

dependiendo si la restricción de capacidad del periodo más demandado se encuentra activa o no. Una restricción de capacidad activa puede inhibir el efecto de reducción en los tiempos medios de viaje de los buses, generando mayores similitudes de frecuencia entre periodos punta y fuera de punta. Mientras que si no existen restricciones de capacidad activa, serán los periodos más congestionados aquellos que perciban mayores beneficios por la reducción en el tiempo de ciclo, acrecentando por tanto la diferencia de frecuencia entre periodos.

Escenario	¿Favorece Frecuencias Similares?
Mercados de baja demanda	✓
Incremento de la duración (h) periodo punta	✗
Utilización de corredor segregado	-
Uso de P_v sensible al nivel de hacinamiento	✗
Consideración de turnos de conductores	✓
Intervalos de tiempo regulares entre buses	✗
Incremento de P_w en periodos punta	✗

Tabla 5.25: Resumen de las implicancias de los distintos escenarios.

Capítulo 6

Conclusión

Los sistemas de transporte público son vitales para la movilidad de la ciudad, y una de las principales decisiones tácticas que se deben tomar es la frecuencia con que se proveerá el servicio. Este problema es uno de los que más atención ha recibido en la literatura; sin embargo, la gran mayoría solo consideran los periodos punta, sin tomar en cuenta los periodos menos demandados en el análisis. Esto último llama la atención considerando la menor frecuencia de operación que se suele ofrecer en periodos fuera de punta, lo que podría estar provocando importantes perjuicios a los usuarios debido a los mayores costos de tiempos de espera y viaje, los que si son considerados en el análisis, podrían llegar a justificar frecuencias similares entre periodos punta y fuera de punta, e incluso una única frecuencia de operación durante todo el día, si es que además los beneficios de un esquema como éste, como la simplicidad al usuario, son incorporados correctamente.

En esta tesis se desarrolló un modelo microeconómico multiperiodo para la optimización de la frecuencia de operación (veh/h) y el tamaño de bus. Con éste se estudian condiciones o escenarios que justifican o incentivan frecuencias similares entre periodos punta y fuera de punta. Para esto es necesario incorporar correctamente dentro del modelo los costos de los usuarios, ya que una de las principales motivaciones de este estudio es conocer el impacto que tienen los costos percibidos por los usuarios en periodos fuera de punta; los que podrían llegar a justificar mayores frecuencias e incluso similares en periodos menos exigidos, a pesar de existir diferencias significativas de demanda. Los costos incorporados en el modelo incluyen el costo de capital, operación, tripulación además de otros costos como arriendos, seguros y administración, por el lado de los operadores, y costos asociados a los tiempos de viaje, espera, además de utilizar un valor del tiempo de viaje sensible al nivel de hacinamiento, por el lado de los usuarios.

Para lo anterior, el modelo se aplica en un escenario base creado a partir de datos observados y tiempos estimados para un tramo del eje Santa Rosa, ubicado en Santiago de Chile. No obstante lo anterior, se crean distintos escenarios para conocer el efecto que éstos tienen en la pregunta de investigación, como distintos niveles de demanda, distintas duraciones de periodos punta, diversos grados congestión, se prueba una estructura de gastos rígida en el costo de la tripulación, además del efecto que tiene la utilización (o no) de hacinamiento como variable que influye en el valor del tiempo de viaje, entre otras consideraciones.

Dada la multiplicidad de periodos considerados en este estudio, se construye un indicador de demanda y otro de frecuencia que permite analizar de mejor manera los resultados. La razón de demanda (Ecuación 5.1) de un periodo i se define como la razón entre la demanda por hora ponderada por el largo promedio de los viajes del periodo punta, sobre la demanda ponderada por el largo promedio de los viajes del periodo el i . Por su parte la razón de frecuencia (Ecuación 5.2) de un periodo i , es la razón entre la frecuencia óptima del periodo punta sobre la del periodo i . De esta manera, valores altos y bajos en ambas razones implican diferencias de demanda y frecuencias entre periodos, ya sea por un valor mayor en el periodo punta (razón mayor a uno) o en el otro periodo considerado (razón menor a uno). Para efectos de esta tesis todos los periodos se comparan respecto del periodo Punta Mañana (PMA) por ser el más demandado.

6.1. Contribuciones principales

Dentro de la formulación del modelo se considera un grupo de restricciones de capacidad (para cada periodo), construidas a partir de la carga máxima (pax/h) de entre todos los tramos considerados, y cuyo objetivo es asegurar que los usuarios se suban al primer bus que observan en el paradero. Respecto de los resultados es importante destacar la influencia que tiene dicha restricción cuando es activa. Frecuencias mayores a las óptimas en los periodos punta provocan una mayor diferencia de frecuencia entre periodos. Mientras que en escenarios donde la restricción no es activa se observan mayores similitudes en términos de frecuencia entre periodos punta y fuera de punta.

Uno de los principales resultados encontrados en esta investigación es la diferente respuesta que tienen mercados de baja demanda (en esta investigación bajo 7.000 pax/dia) y alta demanda (sobre 100.000 pax/dia). Para una misma razón de demanda, los primeros justifican menores diferencias de frecuencia entre periodos. Esto se debe a los mayores beneficios percibidos por los usuarios en tiempo de viaje y de espera, ante un aumento de la frecuencia. Por otra parte, mercados de alta demanda tienden a mostrar mayores razones de frecuencia, ya que al ser menores los beneficios de los usuarios, aumenta el peso relativo de los ahorros en el costo de operadores.

También es importante destacar los resultados que se obtienen para diferentes duraciones de los periodos punta. En escenarios donde la restricción de capacidad no está activa, una mayor duración de los periodos punta (y correspondiente disminución de los fuera de punta), provocan un aumento de la frecuencia de los periodos más demandados, mientras aquellas asociadas a los periodos fuera de punta se mantienen prácticamente constante. Periodos punta más largos incrementan la demanda absoluta de usuarios y con esto el peso relativo de estas horas. Así, el modelo aumenta la frecuencia de dichos periodos reduciendo los costos de los usuarios, justificando una mayor diferencia de frecuencia entre periodos.

Por otra parte, considerando un modelo con un valor del tiempo de viaje insensible a la tasa de ocupación de los buses y según se tenga o no una restricción de capacidad activa, se observan diferentes resultados en el análisis de escenarios de congestión. Medidas que disminuyan la congestión de los buses permiten aumentar su velocidad comercial, y así reducir

tanto los costos de operadores como el tiempo de viaje de los usuarios. El mayor peso relativo del costo asociado al tiempo de espera es compensado aumentando la frecuencia, sin embargo este aumento no es constante en los periodos y es mayor en aquellos más demandados. Lo anterior se debe a que son estos periodos los enfrentan más congestión, y por tanto en donde una reducción del tiempo de ciclo tendrá mayor impacto. Esto genera dos resultados, para escenarios con restricción de capacidad activa se aprecia una menor razón de frecuencia en la medida que se reduzca al congestión; ésto se debe a que si bien se incentiva un aumento de frecuencia en todos los periodos, en aquellos donde la restricción sea activa (típicamente punta) éste efecto se inhibe, disminuyendo las diferencias de frecuencia entre periodos. Por otra parte, en escenarios sin restricción de capacidad activa, el efecto de la disminución de congestión será más notorio en los periodos punta (más congestionados), por tanto se justificarán mayores diferencias de frecuencias entre periodos conforme se reduce la congestión.

Respecto de la influencia que tiene en la determinación de la frecuencia óptima la consideración de hacinamiento como una variable que aumenta la disposición a pagar por reducir el tiempo de viaje, se observa que en primer lugar su consideración genera un aumento en el valor de la frecuencia en todos los periodos respecto del caso constante, sin embargo el aumento de frecuencia en los periodos más demandados predomina por sobre el efecto de aumento en los periodos fuera de punta, lo que genera una mayor diferencia de frecuencia entre periodos.

Otro de los resultados importantes de destacar dice relación con el comportamiento que tiene una estructura de costos rígida en la tripulación. Uno de los supuestos utilizados en el modelo es la flexibilidad total para determinar el número de conductores en cada uno de los periodos, lo que puede no ser totalmente cierto en función de las leyes laborales que se deban cumplir. Por esto se estudia una estructura rígida, en donde los costos de tripulación dependen del periodo más cargado dentro de tres turnos laborales de ocho horas. Utilizando un esquema de este tipo se justifican menores diferencias de frecuencias entre periodos, debido tanto al aumento de costos que se genera, provocando una disminución de frecuencia en los periodos más demandados, como también a la reducción del costo marginal de aumentar la frecuencia en los periodos fuera de punta, dada la mayor disponibilidad de conductores en dichas horas.

Además de los escenarios mencionados, se analizó la influencia que tiene la distribución del tiempo entre buses y el valor del tiempo de espera. Suponer que los buses llegan a los paraderos con una distribución *poisson*, puede ser una buena estimación dependiendo del sistema de transporte estudiado, sin embargo, la idea de avanzar hacia un sistema donde los buses pasen a intervalos regulares, debido principalmente a los importantes beneficios que supone para los usuarios, hace que sea importante conocer las implicancias de esta distribución en la pregunta de esta investigación. La utilización de intervalos regulares entre buses genera una disminución de frecuencia en todos los periodos, siendo más importantes en los periodos fuera de punta, generando una mayor diferencia de frecuencia entre periodos. Esto se debe a los mayores beneficios por reducción del tiempo promedio de espera de los periodos con frecuencias mas baja, provocando una ponderación mayor de los costos de los operadores y por consiguiente, una mayor reducción de frecuencia. Por otra parte, un mayor valor del tiempo de espera en periodos punta aumenta el costo del tiempo asociado en dichos periodos, mientras las condiciones de viaje en el resto se mantienen prácticamente constante.

Lo anterior incentiva un incremento de frecuencia en periodos punta, justificando una mayor diferencia de frecuencia entre periodos.

En esta investigación se han presentado diversos escenarios que incentivan tanto a fijar frecuencias similares, como a diferenciarse más entre periodos. Sin embargo, a lo largo de esta tesis se ha mostrado que un estudio multiperiodo que incorpora correctamente costos de operadores y usuarios, es un insumo básico y necesario para determinar correctamente las frecuencias de un sistema. Esto se debe a los importantes costos que incurre un usuario en periodos fuera de punta y que bajo ciertas condiciones tienden a justificar menores diferencias de frecuencia entre periodos que las observadas en la práctica, es decir, hoy día, miles de personas podrían estar enfrentándose a costos más altos de que los que efectivamente debiesen percibir.

6.2. Líneas futuras de investigación

Como resultado de este trabajo se identifican varios elementos o extensiones que serían interesantes de estudiar en investigaciones futuras. En primer lugar, es importante estudiar todas las variables que inciden en la determinación de la frecuencia cuando se utiliza un valor del tiempo de viaje sensible a la tasa de ocupación del bus ante distintos escenarios de congestión, esto con el fin de determinar los escenarios o condiciones que permiten replicar los resultados que en esta tesis se presentan.

A su vez, uno de los aspectos más evidentes es la consideración de múltiples líneas de transporte público. Por simplicidad en esta tesis se ha considerado la operación de una sola línea de bus en un recorrido lineal, sin embargo en la realidad, la complejidad de la localización de las actividades exige el diseño de múltiples líneas de transporte público sirviendo a variados pares orígenes/destino.

Por otra parte, también es interesante el estudio de estrategias de operación, como bucles o *deadheading*. Servir a la demanda de manera óptima no solo exige determinar la frecuencia de operación más adecuada para el nivel de afluencia, sino que también aprovechar las características de la estructura de la demanda para hacer una utilización eficiente de los recursos, lo que se puede conseguir con la utilización de estrategias de operación que se adaptan a la estructura de la demanda para servir a ésta de manera más eficiente.

Para finalizar, es interesante recordar que uno de los supuestos utilizados en esta investigación es la utilización de demanda paramétrica, lo que es posible de extender con la utilización de una demanda elástica que dependa de las condiciones de operación, para de esta manera determinar el efecto que tendría en la determinación de la frecuencia óptima bajo un enfoque multiperiodo, una demanda sensible a algunos aspectos de la calidad de servicio entregado.

Capítulo 7

Bibliografía

- ATC (2006). National guidelines for transport system management in australia, Australian Transport Council.
- Basso, L. J. y H. E. Silva (2014). Efficiency and substitutability of transit subsidies and other urban transport policies. *American Economic Journal: Economic Policy* 6 (4), 1–33.
- Batarce, M., J. C. Muñoz, J. de Dios Ortúzar, S. Raveau, C. Mojica y R. A. Ríos (2015). Use of mixed stated and revealed preference data for crowding valuation on public transport in santiago, chile. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2535), 73–78.
- Chang, S. K. y P. M. Schonfeld (1991). Multiple period optimization of bus transit systems. *Transportation Research Part B: Methodological* 25 (6), 453–478.
- Cortés, C. E., S. Jara-Díaz y A. Tirachini (2011). Integrating short turning and deadheading in the optimization of transit services. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 45 (5), 419–434.
- Delle Site, P. y F. Filippi (1998). Service optimization for bus corridors with short-turn strategies and variable vehicle size. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 32 (1), 19–38.
- dell’Olio, L., A. Ibeas y F. Ruisánchez (2012). Optimizing bus-size and headway in transit networks. *Transportation* 39 (2), 449–464.
- dell’Olio, L., J. Moura y A. Ibeas (2006). Bi-level mathematical programming model for locating bus stops and optimizing frequencies. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (1971), 23–31.
- DTPM (2013). 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. informe elaborado por xlibrium.
- Fernández, J. E., J. de Cea y R. H. Malbran (2008). Demand responsive urban public trans-

- port system design: Methodology and application. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 42 (7), 951–972.
- Gibson, J., M. Munizaga, C. Schneider y A. Tirachini (2015). Median busways versus mixed-traffic: Estimation of bus travel time under different priority conditions with explicit modelling of delay at traffic signals. En: *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*, Washington, DC.
- Ibeas, A., B. Alonso, L. dell’Olio y J. L. Moura (2013). Bus size and headways optimization model considering elastic demand. *Journal of Transportation Engineering* 140 (4), 04013021.
- Ibeas, Á., L. dell’Olio, B. Alonso y O. Sainz (2010). Optimizing bus stop spacing in urban areas. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 46 (3), 446–458.
- 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. y A. Gschwender (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. y A. Gschwender (2003b). Towards a general microeconomic model for the operation of public transport. *Transport Reviews* 23 (4), 453–469.
- Leiva, C., J. C. Muñoz, R. Giesen y H. Larrain (2010). Design of limited-stop services for an urban bus corridor with capacity constraints. *Transportation Research Part B: Methodological* 44 (10), 1186–1201.
- Medina, M., R. Giesen y J. Muñoz (2013). Model for the optimal location of bus stops and its application to a public transport corridor in santiago, chile. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2352), 84–93.
- Mohring, H. (1972). Optimization and scale economies in urban bus transportation. *The American Economic Review* 62 (4), 591–604.
- Munizaga, M. y C. Palma (2012). Estimation of a disaggregate multimodal public transport origin–destination matrix from passive smartcard data from santiago, chile. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 24, 9–18.
- Schneider, C. (2014). Análisis de la influencia de distintos tipos de prioridad al transporte público y del ancho de vía a través de modelos lineales de tiempo de viaje utilizando datos del sistema de transporte público de santiago. Tesis de Magíster, Universidad de Chile, Santiago.
- Tirachini, A. (2012). Optimisation of frequency and bus stop spacing: Applications to black-town, informe para Busways (no publicado).

- Tirachini, A. (2014). The economics and engineering of bus stops: Spacing, design and congestion. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 59, 37–57.
- Tirachini, A., L. Camus y D. Cruz (2015). Modelación de tiempos de detención de buses en paraderos de santiago y valparaíso-viña del mar. *Ingeniería de Transporte* 19 (2), 103–116.
- Tirachini, A., C. E. Cortés y S. R. Jara-Díaz (2011). Optimal design and benefits of a short turning strategy for a bus corridor. *Transportation* 38 (1), 169–189.
- Tirachini, A., D. A. Hensher y S. R. Jara-Díaz (2010). Restating modal investment priority with an improved model for public transport analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 46 (6), 1148–1168.
- Tirachini, A., D. A. Hensher y J. M. Rose (2013). Crowding in public transport systems: effects on users, operation and implications for the estimation of demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 53, 36–52.
- Vickrey, W. (1955). Some implications of marginal cost pricing for public utilities. *The American Economic Review* 45 (2), 605–620.
- Wardman, M. y G. Whelan (2011). Twenty years of rail crowding valuation studies: evidence and lessons from british experience. *Transport reviews* 31 (3), 379–398.
- Wright, L. y W. Hook (2007). *Guía de planificación de sistemas brt* 3ra edición (traducción enero 2010).

Apéndice A

Glosario y valores de parámetros generales

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
N	Número de paraderos considerados	23	
P	Número de periodos considerados	12	
P_w	Valor del tiempo de espera	4.903	\$/h
P_v	Valor del tiempo de viaje		\$/h
D^p	Duración del periodo p		\$/h
f^p	Frecuencia del periodo p		h
f_{min}	Frecuencia mínima por política	2 y 5	veh/h
f_{max}	Frecuencia máxima	150	veh/h
L_b	Largo de buses considerados	8, 10, 12, 18	m
al_{L_b}	Tiempo promedio de bajada por pasajero	1 (8m y 10m), 0.5 (12m y 18m)	s/pax
b_{L_b}	Tiempo promedio de subida por pasajero	2,4	s/pax
c_0	Constante de tiempo en paraderos	6,7	s
λ_{kl}^p	Pasajeros que van entre los paraderos k y l		pax/h
δ	Densidad de pasajeros por bus		pax/m ²
δ_{max}	Densidad máxima de pasajeros por bus	6	h
η	Porcentaje de flota de reserva	5	%
κ	Factor de seguridad restricción de capacidad	0,9	
θ	Costo de administración como porcentaje de costos operacionales	43	%
α	Tiempo de posicionamiento para el bus	0,0833	h

Sigue en la página siguiente.

Tabla A.1 – *Continúa de la página anterior*

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
c_1	Costo de capital de operadores	15.302 (8m), 21.423 (10m), 33.664 (12m), 49.986 (18m)	$\$/bus - dia$
c_2	Costo de tripulación	4.622	$\$/h$
c_3	Costo operacional	206 (8m), 265 (10m), 308 (12m), 578 (18m)	$\$/bus - km$
$K(L_b)$	Capacidad por tipo de bus	50 (8m), 60 (10m), 90 (12m), 160 (18m)	$plazas/bus$

Tabla A.1: Glosario y valores de parámetros generales utilizados.

Apéndice B

Parámetros modelos de tiempo de viaje

En la Tabla B.1 se muestran los parámetros que no son específicos del tiempo.

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
a_0^d	Tiempo de crucero básico en ambas direcciones	132,64	s/km
a_{1b}^d	Reducción tiempo de crucero en corredor segregado para ambas direcciones	-53,23	s/km
$a_2^{d,(3,4,5)}$	Probabilidad promedio de parada uniforme en secciones con corredor	0,481	s/km
$a_2^{d,1}$	Probabilidad promedio de parada uniforme en sección 1	0,809	s/km
$a_2^{d,2}$	Probabilidad promedio de parada uniforme en sección 2	0,639	s/km
$a_2^{d,6}$	Probabilidad promedio de parada uniforme en sección 6	0,482	s/km
$a_2^{d,7}$	Probabilidad promedio de parada uniforme en sección 7	0,921	s/km
a_3^d	Reducción promedio uniforme por por coordinación de semáforos para cada intersección	-9,202	s/int

Tabla B.1: Valores de parámetros utilizados en modelos de tiempo de viaje.

Como se explica en el Capítulo 3, los valores de los parámetros utilizados son los mismos para ambos sentidos. En las siguientes tablas se muestran los valores de los parámetros utilizados en los modelos de tiempo de viaje que son específicos para cada sección y periodo.

$N_s^{1,p,i}$	Periodos												
	Sección	1	2	3	PMA	5	6	7	8	PTA	10	11	12
1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5
3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Tabla B.2: Número de semáforos coordinados para cada sección y periodo en dirección 1.

$N_s^{2,p,i}$	Periodos												
	Sección	1	2	3	PMA	5	6	7	8	PTA	10	11	12
1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5
3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Tabla B.3: Número de semáforos coordinados para cada sección y periodo en dirección 2.

$c^{1,i,p}$	Periodos												
	Sección	1	2	3	PMA	5	6	7	8	PTA	10	11	12
1	95	95	95	84	84	78	78	78	88	95	95	95	95
2	95	95	95	88	88	78	78	78	88	95	95	95	95
3	110	110	110	110	110	100	100	80	110	110	110	110	110
4	110	110	110	110	110	100	100	80	110	110	110	110	110
5	110	110	110	110	110	100	100	80	110	110	110	110	110
6	49	49	49	100	100	53	53	59	49	49	49	49	49
7	86	86	86	107	107	78	78	75	89	86	86	86	86

Tabla B.4: Tiempos de ciclo promedio (s) para cada sección y periodo en dirección 1.

$c^{2,i,p}$	Periodos											
	Sección	1	2	3	PMA	5	6	7	8	PTA	10	11
1	95	95	95	84	84	78	78	78	88	95	95	95
2	95	95	95	88	88	78	78	78	88	95	95	95
3	110	110	110	110	110	100	100	80	110	110	110	110
4	110	110	110	110	110	100	100	80	110	110	110	110
5	110	110	110	110	110	100	100	80	110	110	110	110
6	49	49	49	100	100	53	53	59	49	49	49	49
7	86	86	86	107	107	78	78	75	89	86	86	86

Tabla B.5: Tiempos de ciclo promedio (s) para cada sección y periodo en dirección 2.

$v^{1,i,p}$	Periodos											
	Sección	1	2	3	PMA	5	6	7	8	PTA	10	11
1	61	61	61	50	50	46	46	46	54	61	61	61
2	52	52	52	46	46	39	39	38	46	52	52	52
3	61	61	61	62	62	55	55	39	61	61	61	61
4	69	69	69	65	65	59	59	43	69	69	69	69
5	56	56	56	65	65	58	58	43	56	56	56	56
6	27	27	27	57	57	31	31	37	27	27	27	27
7	43	43	43	48	48	41	41	42	44	43	43	43

Tabla B.6: Tiempos de verde promedio (s) para cada sección y periodo en dirección 1.

$v^{2,i,p}$	Periodos											
	Sección	1	2	3	PMA	5	6	7	8	PTA	10	11
1	61	61	61	50	50	46	46	46	54	61	61	61
2	52	52	52	46	46	39	39	38	46	52	52	52
3	61	61	61	62	62	55	55	39	61	61	61	61
4	69	69	69	65	65	59	59	43	69	69	69	69
5	56	56	56	65	65	58	58	43	56	56	56	56
6	27	27	27	57	57	31	31	37	27	27	27	27
7	43	43	43	48	48	41	41	42	44	43	43	43

Tabla B.7: Tiempos de verde promedio (s) para cada sección y periodo en dirección 2.

$a_1^{1,i,p}$	Periodos											
	Sección	1	2	3	PMA	5	6	7	8	PTA	10	11
1	-40	-40	-28	0	0	0	0	0	-28	-28	-32	-40
2	-40	-40	-28	0	0	0	0	0	-28	-28	-32	-40
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	-40	-40	-37	0	0	0	0	0	-17	-37	-27	-40
7	-40	-40	-37	0	0	0	0	0	-19	-37	-27	-40

Tabla B.8: Reducción tiempo de crucero (s/km) para par sección-periodo en dirección 1.

$a_1^{2,i,p}$	Periodos											
	Sección	1	2	3	PMA	5	6	7	8	PTA	10	11
1	-40	-32	-28	-28	0	0	0	0	0	-28	-40	-40
2	-40	-32	-28	-28	0	0	0	0	0	-28	-40	-40
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	-40	-27	-37	-17	0	0	0	0	0	-37	-40	-40
7	-40	-27	-37	-19	0	0	0	0	0	-37	-40	-40

Tabla B.9: Reducción tiempo de crucero (s/km) para par sección-periodo en dirección 2.

$a_3^{1,i,p}$	Periodos											
	Sección	1	2	3	PMA	5	6	7	8	PTA	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	-8,5	-8,5	-8,5	-8,5	-8,5	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	-3,9	-3,9	4,9	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	-3,9	-3,9	4,9	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	-3,9	-3,9	4,9	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla B.10: Reducción promedio en intersección (s/int) por sección-periodo en dirección 1.

$a_3^{2,i,p}$	Periodos												
	Sección	1	2	3	PMA	5	6	7	8	PTA	10	11	12
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	-8,5	-8,5	-8,5	-8,5	-8,5	0	0	0	0
3	0	0	0	0	4,9	-3,9	-3,9	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	4,9	-3,9	-3,9	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	4,9	-3,9	-3,9	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla B.11: Reducción promedio en intersección (s/int) por sección-periodo en sentido 2.

$a_4^{1,i,p}$	Periodos												
	Sección	1	2	3	PMA	5	6	7	8	PTA	10	11	12
1	0	0	0	14,0	55,8	0	0	16,4	15,1	0	0	0	0
2	0	0	0	19,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	57,8	60,8	0	0	1,9	6,8	0	0	0	0

Tabla B.12: Parámetro de sobresaturación (s/km) para cada sección-periodo en dirección 1.

$a_4^{2,i,p}$	Periodos												
	Sección	1	2	3	PMA	5	6	7	8	PTA	10	11	12
1	0	0	0	15,1	16,4	0	0	55,8	14,0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	19,4	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	6,8	1,9	0	0	60,8	57,8	0	0	0	0

Tabla B.13: Parámetro de sobresaturación (s/km) para cada sección-periodo en dirección 2.