



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SISTEMAS – TRANSPORTE

MODELO MATEMÁTICO PARA EL
DIMENSIONAMIENTO DE RUTAS CON FLOTA
VEHICULAR MIXTA EN SISTEMAS BRT.
CASO DE ESTUDIO: METROBÚS, LÍNEA 1

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOSÉ FREDY RÍOS GARRIDO

TUTORES PRINCIPALES:
FERNANDO SEUZ OSORIO ZÚÑIGA, METROBÚS
JOSÉ JESÚS ACOSTA FLORES, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F. ABRIL DE 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. José Jesús Acosta Flores
Secretario: Dr. Ricardo Aceves García
Vocal: M.I. Fernando Seuz Osorio Zúñiga
1 er. Suplente: Dra. Angélica del Rocío Lozano Cuevas
2 do. Suplente: M.I. José Antonio Rivera Colmenero

Lugar donde se realizó la tesis: México D.F., Ciudad Universitaria, U.N.A.M.

TUTORES DE TESIS:

M.I. Fernando Seuz Osorio Zúñiga

Dr. José Jesús Acosta Flores

FIRMA

FIRMA



Dedicatoria:

A mis padres.

Por demostrarme que no hay fuerza más poderosa que el Amor.

“El mundo está en manos de aquellos que tienen el coraje de soñar y de correr el riesgo de vivir sus sueños.”

Paulo Coelho

“Esto es para los locos. Los inadaptados. Los rebeldes. Los problemáticos. Los que van en contra de la corriente. Los que ven las cosas de manera diferente.

Ellos no siguen las reglas y no tienen respeto por lo establecido. Puedes citarlos, estar en desacuerdo con ellos, glorificarlos o satanizarlos. Pero lo único que no puedes hacer es ignorarlos. Porque ellos cambian las cosas e impulsan a la humanidad hacia adelante.

Y mientras que algunos los ven como "locos", nosotros los vemos como genios. Porque la gente que está tan loca como para pensar que puede cambiar el mundo, es quien lo logra.”

Apple Inc.



Agradecimientos:

A mis padres, Salomón Ríos y María Elena Garrido, y a mis hermanos, Oscar y Eduardo, por su amor y cariño que me motivan todos los días de mi vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y su Facultad de Ingeniería, por brindarme las herramientas académicas y éticas con las cuales puedo enfrentarme al mundo profesional.

A mis directores de tesis, M.I. Fernando Osorio y Dr. Jesús Acosta, por su guía, tiempo, confianza y consejos.

A mis sinodales, Dra. Angélica Lozano, M.I. Antonio Rivera y Dr. Ricardo Aceves, por su tiempo en la revisión de la tesis y sus sugerencias para mejorarla.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Sistema Metrobús de la Ciudad de México, principalmente a los ingenieros Jorge Coxtinica, Fernando Osorio y Antonio Padilla, por la información proporcionada para la realización de la tesis y la confianza depositada en mí para su aplicación en el sistema.

A mis tíos, Jaime López y Gloria Ríos, por su cariño y apoyo en la adquisición de material bibliográfico.

A mis compañeros y amigos: Alberto, Rafael, Yareli, Rocío, Silvia, Selene, Raymundo, Danilo, Elia, Minerva, Arturo, Germán, Gabriela, Nayeli, Tonatiuh, Alejandra, Susana, Erika, Tania, Julio, Luz, Felipe, Barragán, Francisco y José Luis, por acompañarme en esta etapa de mi vida.

A todos, muchas gracias.



Índice

	<i>Página</i>
Resumen.....	1
Introducción	2
Objetivo.....	3
 Capítulo 1	
Sistemas de Autobuses de Tránsito Rápido (BRT).....	4
1.1. Componentes físicos de los Sistemas BRT	7
1.1.1. Infraestructura.....	7
1.1.1.1. Carriles confinados.....	7
1.1.1.2. Estaciones.....	8
1.1.1.3. Terminales y Patios	9
1.1.2. Tecnología.....	10
1.1.2.1. Vehículos	10
1.1.2.2. Equipos automatizados de peaje.....	11
1.1.2.3. Sistemas de Ayuda a la Explotación (SAE)	12
1.2. Estructura Institucional y de Negocios.....	13
1.2.1. Entidad reguladora.....	13
1.2.2. Empresas operadoras y pago por kilómetro recorrido	14
1.2.3. Tarifa	16
1.2.4. Empresas de recaudo y fideicomiso.....	17
1.3. Capacidad y Operación	18
1.4. Metrobús, Ciudad de México.....	19
1.4.1. Antecedentes.....	19
1.4.2. Red de Metrobús	22
1.4.3. Estructura organizacional.....	24
1.5. Problemática en Metrobús Línea 1	27
1.5.1. Evolución del servicio y crecimiento de la demanda	27
1.5.2. La Hora de Máxima Demanda y el Sobrecupo.....	31
1.5.3. Nivel de servicio.....	33
1.5.4. Costos de operación	34
1.5.5. Inversiones en capacidad	35



Capítulo 2

Análisis de la Demanda y Oferta de Transporte	38
2.1. La Demanda de Transporte	38
2.1.1. Variabilidad de la demanda en el tiempo	40
2.1.1.1. Variación horaria	40
2.1.1.2. Variación diaria.....	41
2.1.1.3. Variación estacional	42
2.1.2. Variabilidad de la demanda en el espacio.....	43
2.1.3. Estimación de la demanda.....	44
2.1.3.1. Estudio de Frecuencias y Cargas	45
2.1.3.2. Estudio de Ascenso y Descenso	46
2.2. La Oferta de Transporte	48
2.2.1. Gestión del servicio.....	49
2.2.1.1. Servicios directos de terminal a terminal	50
2.2.1.2. Servicio de rutas en un mismo corredor de transporte.....	51
2.2.1.3. Transbordos	60
2.2.2. Gestión de la flota vehicular	61
2.2.2.1. La capacidad del vehículo	62
2.2.2.2. Tipo y tamaño del vehículo.....	64

Capítulo 3

Equilibrio Oferta – Demanda de Transporte	68
3.1. Dimensionamiento de rutas de transporte	70
3.1.1. Parámetros constantes	70
3.1.2. Parámetros operativos	72
3.1.3. Procedimiento convencional de dimensionamiento de rutas de transporte	78
3.2. Programación del Servicio	81
3.2.1. Matriz de Viajes	83
3.2.2. Documentos de ejecución y control operativo	89

Capítulo 4

El Modelado Matemático como Herramienta de Cálculo para el Dimensionamiento de Rutas	92
4.1. Limitantes del procedimiento convencional de dimensionamiento de rutas de transporte	92



4.2. ¿Cómo superar las limitantes del procedimiento convencional de dimensionamiento de rutas?	93
4.3. Procedimiento propuesto para el dimensionamiento de rutas de transporte	98
4.4. Modelado matemático	100
4.4.1. Etapas en el uso de modelos matemáticos	100
4.4.2. Problemas de optimización	103
4.4.2.1. Programación lineal (PL) y programación lineal entera (PLE).....	105
4.4.2.2. Resolución de problemas de PL y PLE.....	106
4.4.3. Resolución de problemas de optimización en hojas de cálculo	107
4.4.3.1. Excel Solver	108
4.4.3.2. What'sBest!	112

Capítulo 5

Modelo Matemático para el Dimensionamiento de Rutas con Flota Vehicular Mixta en Sistemas BRT	118
5.1. Variables de decisión	119
5.2. Función Objetivo	120
5.2.1. Escenario ideal o de flota nueva	120
5.2.2. Escenario real o de flota existente	120
5.3. Restricciones	121
5.3.1. Restricción de demanda	121
5.3.2. Restricción de frecuencia máxima o de intervalo mínimo.....	122
5.3.3. Restricción de frecuencia mínima o de intervalo máximo.....	123
5.3.4. Restricción de infraestructura.....	123
5.3.5. Restricción de flota existente	125
5.3.6. Restricción de volumen de diseño deseado para una ruta	125
5.3.7. Restricción de flota deseada en un corredor	126
5.3.8. Restricciones de no negatividad	126
5.4. Ejemplos de aplicación: Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México	127
5.4.1. Información básica del corredor y su demanda	127
5.4.2. Variables de decisión	129
5.4.3. Modelo matemático para el escenario ideal	130
5.4.3.1. Función objetivo	130
5.4.3.2. Restricciones.....	130
5.4.3.3. Resultados	133



5.4.4. Modelo matemático para el escenario real.....	136
5.4.4.1. Función objetivo	136
5.4.4.2. Restricciones.....	136
5.4.4.3. Resultados	139
5.4.5. Escenario adicional: Requerimiento de flota	142
5.4.5.1. Función objetivo	142
5.4.5.2. Restricciones.....	142
5.4.5.3. Resultados	145
5.5. Resumen de resultados	148
Conclusiones	150
Referencias	152
Publicaciones:.....	152
Sitios WEB:.....	154
Anexos	156
Anexo A: Cronología del crecimiento del Sistema Metrobús.	156
Anexo B: Polígonos de Carga de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, 2009.....	157
Anexo C: Formato de recopilación de información para Estudios de Frecuencias de Paso y Cargas.	165
Anexo D: Formato de recopilación de información para Estudios de Ascenso - Descenso.....	166
Anexo E: Ejemplo de Encuestas Origen-Destino.....	167
Anexo F: Inestabilidad de intervalos iguales.	168
Anexo G: Matrices de Viaje de las rutas de Metrobús Línea1.....	169
Anexo H: Documentos de ejecución y control operativo de Metrobús.....	175
Anexo I: Descripción de la barra de herramientas de What'sBest!	177



Resumen

El objetivo principal del presente trabajo fue contribuir al avance de las técnicas de diseño operacional de los Sistemas de Autobuses de Tránsito Rápido mediante el desarrollo de un modelo matemático con el que fue posible determinar la cantidad óptima de rutas y vehículos requeridas para satisfacer determinadas restricciones físicas, operativas y relacionadas con la demanda en un corredor de transporte.

Se utilizó como caso de estudio la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México el cual presenta un aumento acelerado en su demanda, el uso de flota vehicular mixta (autobuses articulados y biarticulados) y un servicio de rutas dentro del mismo corredor.

Para lograr el objetivo planteado se desarrolló un análisis de la oferta y demanda de transporte presentes en el caso de estudio así como la descripción de las técnicas convencionales de diseño operacional y sus limitantes, con lo cual, fue posible formular un modelo matemático de programación lineal aplicado al Sistema Metrobús bajo tres escenarios: flota ideal, flota existente y requerimiento de flota.

El modelo desarrollado fue aplicado con éxito al Sistema Metrobús de la Ciudad de México en donde se utiliza para optimizar sus autobuses y rutas, la estimación anual de requerimientos de flota y el cálculo de la flota vehicular para futuros corredores.

Palabras clave: *modelación matemática, Metrobús Ciudad de México, dimensionamiento de rutas, flota mixta, Sistemas BRT.*



Introducción

Es claro que considerar únicamente la construcción de infraestructura o la ampliación de las vialidades no resuelve los problemas de movilidad en las grandes ciudades, puesto que en el largo plazo dichas acciones casi siempre resultan insuficientes. Es por ello que para proveer soluciones realmente efectivas los proyectos de infraestructura vial deben complementarse con el mejoramiento y prioridad de los sistemas de transporte público.

A principios de la década de 1970 la Ciudad de Curitiba en Brasil, experimentó un rápido crecimiento de su población por lo que sus autoridades buscaban construir un sistema de transporte público sobre rieles tipo Metro pero debido a la falta de recursos tuvieron que buscar otra alternativa para satisfacer las necesidades de transporte de los ciudadanos. Jaime Lerner, el entonces alcalde de dicha ciudad, y su equipo de trabajo crearon un modo de transporte público masivo de bajo costo pero al mismo tiempo de alta calidad utilizando autobuses, estaciones y corredores con carriles exclusivos que recorrían el centro de la ciudad, algo parecido a un Metro de superficie llamado Red Integrada de Transporte y actualmente conocido a nivel mundial como Sistema de Autobuses de Tránsito Rápido o BRT, por sus siglas en inglés.

Las principales características de los Sistemas BRT son: operación regulada, carriles reservados para el transporte público, vehículos de alta capacidad y tecnologías limpias, infraestructura propia (estaciones, terminales, talleres, patios de encierro, etc.), prepago y recaudo centralizado, operadores con organización empresarial, sistemas avanzados de comunicación y control e integración con otros modos de transporte como el Metro y el tren ligero.

No es sino hasta el año 2000 con la puesta en marcha del Sistema TransMilenio en Bogotá, Colombia, que los Sistemas BRT comenzaron a ganar popularidad en las ciudades latinoamericanas como una alternativa de transporte público masivo de calidad, seguro, rápido, de bajo costo y amigable con el medio ambiente.

Desafortunadamente, la investigación y desarrollo de técnicas de diseño operacional específicas para los Sistemas BRT no han evolucionado al mismo ritmo que su popularidad. Un ejemplo muy claro de esto es la manera en que actualmente algunos sistemas dimensionan sus corredores, es decir, la forma en cómo estiman el número de vehículos que se requieren en operación para satisfacer la demanda de transporte, pues aplican la misma teoría de



dimensionamiento de rutas diseñada y probada en sistemas de Metro y de autobuses convencionales. Esto ha provocado que ante la utilización de nuevas técnicas de planeación del transporte público como el establecimiento de rutas dentro de un mismo corredor y el uso de flota vehicular mixta, algunas de las decisiones de los encargados de la operación estén basadas en su conocimiento empírico por no contar con herramientas sólidas que las sustenten. Es por ello que el objetivo principal de la presente tesis es:

Objetivo.

Contribuir al avance de las técnicas de diseño operacional de los Sistemas BRT mediante el desarrollo de una herramienta matemática que a través de la modelación permita determinar la cantidad de vehículos, sin importar su tipo o capacidad, que deben asignarse a un conjunto de rutas para garantizar el cumplimiento de la demanda presente en un corredor de transporte y que mejor se ajusten a los requerimientos físicos y operativos del sistema, tomando como caso de estudio la **Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México**, un sistema sumamente complejo debido al volumen y variabilidad de su demanda, la utilización de flota vehicular mixta (autobuses articulados y biarticulados) y un conjunto de rutas que brindan servicio en el mismo corredor.

Para lograr dicho objetivo, la presente tesis se ha dividido en cinco capítulos: En el primero se describen las características operacionales e institucionales de los Sistemas BRT y del caso de estudio así como su problemática.

El segundo y tercer capítulo están dedicados al análisis de la demanda y oferta de transporte presente en la Línea 1 del Sistema Metrobús, así como a las técnicas que utiliza dicho sistema para encontrar un adecuado balance entre dichos aspectos.

El cuarto capítulo trata sobre las limitaciones del procedimiento convencional de dimensionamiento de rutas y cómo la modelación matemática puede ser una herramienta útil en la superación de dichas limitantes.

Finalmente, en el quinto capítulo se desarrolla un modelo matemático de programación lineal para el dimensionamiento de rutas con flota vehicular mixta y se muestra su aplicación en la Línea 1 de Metrobús bajo tres escenarios: Flota ideal o nueva, Flota Real o existente y un escenario adicional sobre la estimación del requerimiento de flota necesario en dicho corredor para bajar los niveles de saturación de sus unidades en las horas de máxima demanda.



Capítulo 1

Sistemas de Autobuses de Tránsito Rápido (BRT)

Un **Sistema de Autobuses de Tránsito Rápido** o **BRT** (por sus siglas en inglés, Bus Rapid Transit) es un sistema de transporte masivo de pasajeros que combina la calidad de un sistema de transporte por rieles (en términos de desempeño operacional y de servicio al usuario) con la flexibilidad y costo de un sistema de autobuses. A través del uso, provisión e integración de infraestructura para estaciones y terminales, carriles confinados o semi-confinados, vehículos de alta capacidad y tecnologías limpias, operación regulada, mejoras operativas en el cobro de tarifas y la utilización de métodos avanzados de información y control, los Sistemas BRT tienen como objetivo proporcionar movilidad urbana más rápida, de bajo costo, confiable, cómoda y de bajo impacto ambiental.

Algunas de las principales características de un Sistema BRT, según Grava (2003), son las siguientes:

Rápida entrada y salida de pasajeros: Del 30 al 40 por ciento del tiempo total de operación, en cualquier sistema de autobuses, se ocupa en dar cabida a los pasajeros que entran y salen en las paradas o terminales, por esta razón en los Sistemas BRT se procura:

- Tener varias puertas a lo largo del costado del vehículo, perdiendo algunos asientos pero ofreciendo pasillos amplios para la circulación de personas dentro y fuera del autobús.
- Agilizar la operación al pagar las tarifas antes de abordar al vehículo, generalmente haciendo uso de tecnología de prepago electrónico como bandas magnéticas o tarjetas "inteligentes".
- Tener por separado varios canales de entrada y salida en las estaciones y terminales controlados por torniquetes. En el caso de los canales de entrada se colocan cajas de cobro o lectores magnéticos para la validación de tarifas.
- Contar con plataformas en estaciones al mismo nivel que el piso de los autobuses para permitir que los usuarios tengan una rápida entrada y salida de los vehículos (piso alto o piso bajo).



- Tener ascensores, rampas y puertas reservadas para facilitar el acceso a personas con alguna discapacidad o personas de la tercera edad.

Prioridad en vialidades: Un vehículo que transporta a muchas personas debe gozar de preferencia en el uso de la vialidad por sobre los vehículos particulares que sólo llevan unos pocos ocupantes, algunas formas de lograr esto son:

- Utilizar carriles confinados y/o semi-confinados, generalmente en carriles centrales de una vialidad, que acomoden solamente a vehículos de servicio de emergencia y del Sistema BRT.
- Sincronizar los semáforos a favor del paso de los autobuses o instalar en los vehículos dispositivos de derecho de prioridad tales como señales de radio o sensores automáticos que soliciten la fase de luz verde cuando el autobús se acerque a un semáforo.
- En la mayoría de los casos, cambiar los reglamentos de tránsito para prohibir vueltas o maniobras que obstaculicen el libre paso de los vehículos del Sistema BRT así como prohibir el uso del carril confinado por vehículos particulares.

Uso de sistemas avanzados de comunicación: Los sistemas de telemática o Sistemas de Ayuda a la Explotación (SAE) ofrecen una serie de alternativas para gestionar la operación y mejorar la capacidad de respuesta de los Sistemas BRT, esto con el objeto de satisfacer la demanda de transporte en un momento dado y lograr una mayor eficiencia en el uso de los autobuses y despliegue de personal. Los SAE también pueden ser complementados con sistemas de información al usuario tales como paneles exteriores e interiores en el vehículo e información vía WEB y/o telefonía móvil.

Integración con otros modos de transporte: En los Sistemas BRT no debe existir el aislamiento, el objetivo básico de la movilidad es lograr un servicio que funcione bien en todo el territorio de una zona urbana, por lo que debe garantizarse que el BRT complemente a los otros sistemas de transporte evitando la dependencia de un solo modo en particular.

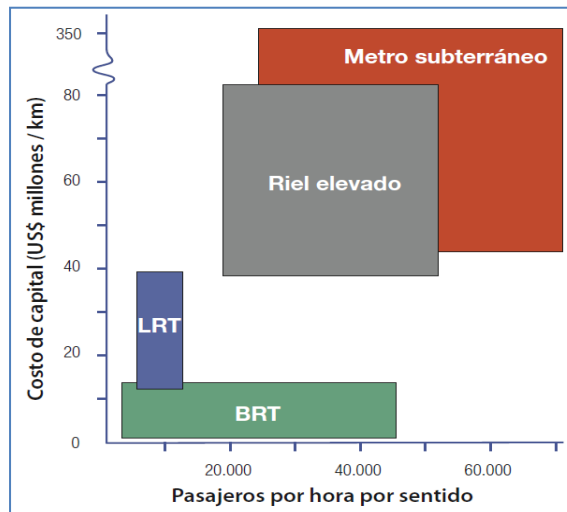
Según Wright & Hook (2007) un Sistema BRT esencialmente emula las características de desempeño de un sistema de transporte masivo basado en rieles pero a una fracción de su costo, dichos sistemas normalmente van a costar de 4 a 20 veces menos que un sistema de tranvía o tren ligero (LRT) y de 10 a 100 veces menos que un sistema metropolitano de transporte o metro. La **figura**



1.1 muestra un comparativo entre la capacidad de diversos modos de transporte público masivo y su costo por kilómetro.

Figura 1.1. Capacidad vs Costo para diversos modos de transporte público masivo.

Fuente: Wright & Hook (2007).



Debido a estas características, los Sistemas BRT son vistos como una de las soluciones más efectivas para ofrecer un servicio de transporte masivo de alta calidad y bajo costo. El éxito de tales sistemas en ciudades como Curitiba (Brasil), Bogotá (Colombia) y Brisbane (Australia) ha incrementado la popularidad del BRT como una solución viable a la movilidad urbana al permitir que las ciudades proporcionen una red funcional de corredores de transporte público para suplir la necesidad de viajes de su población. La **figura 1.2** muestra dos de los Sistemas BRT más reconocidos a nivel mundial, el de Curitiba en Brasil y el de Bogotá en Colombia.



**Figura 1.2. Primer BRT del mundo: Red Integrada de Transporte en Curitiba, Brasil (izquierda)
BRT más destacado del mundo: Sistema TransMilenio en Bogotá, Colombia (derecha).**

Obtenido de: www.distintaslatitudes.net y www.bogota.gov.co

A dichos sistemas también se les conoce con los nombres de *Metros de Superficie*, *Sistemas o Redes Integradas de Transporte*, *Sistemas Integrados de Transporte Público Masivo*, *Sistemas de Buses Expresos*, *Sistemas de Bus de Alta Capacidad o Calidad*, *Sistemas Metrobús*, entre otros.



1.1. Componentes físicos de los Sistemas BRT

Wright & Hook (2007) mencionan que los componentes físicos de los Sistemas BRT se pueden agrupar, según sus características, en dos grupos: de *infraestructura* y de *tecnología* (figura 1.3.). La integración y gestión adecuada de dichos componentes permite brindar un servicio de mayor calidad en comparación con los sistemas de bus convencional emulando la operación de un sistema de transporte sobre rieles, a continuación se describe, de manera general, cada uno de los elementos que integran a dichos componentes.

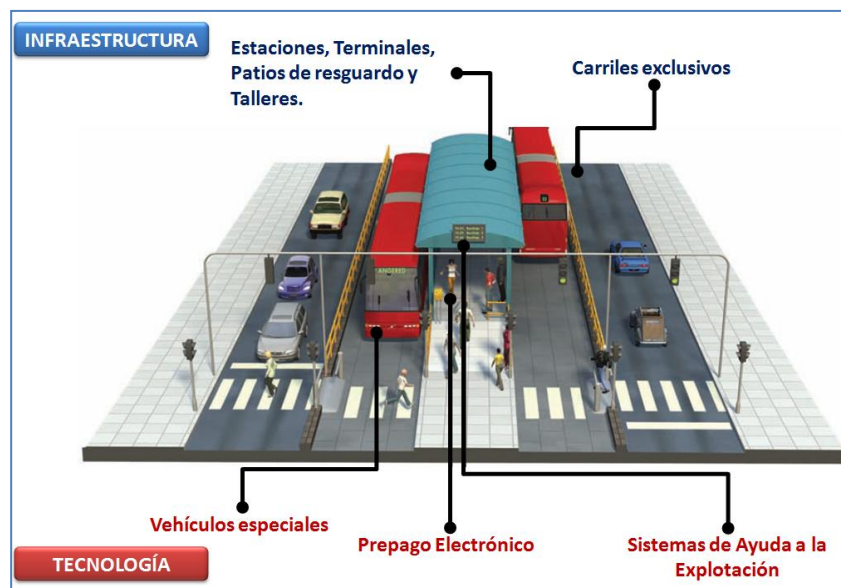


Figura 1.3. Componentes físicos de los Sistemas BRT

Fuente: Ficha técnica Volvo 7300.
Obtenido de: www.volvobuses.com

1.1.1. Infraestructura

La infraestructura en un Sistema BRT está conformada principalmente de los siguientes elementos: carriles confinados, estaciones, terminales, patios de resguardo y talleres de mantenimiento. El diseño de la infraestructura no es único pues depende de factores tales como su costo, funcionalidad, diseño estético, accesibilidad, condiciones climáticas y topológicas e, inclusive, de preferencias culturales.

1.1.1.1. Carriles confinados

Son carriles que están destinados exclusivamente al uso de vehículos de transporte público y servicios de emergencia, dichos carriles están segregados del tránsito particular por medio de separadores viales y deben contar con



señalamiento horizontal y vertical para su fácil identificación. Si se localizan en una arteria de tráfico mixto tienden a estar ubicados en el carril de extrema izquierda evitando la interacción con otros vehículos, lo cual garantiza que las unidades puedan alcanzar una velocidad comercial superior a los 20 km/h.

Generalmente, se recomienda el uso de concreto hidráulico como material de superficie en el carril o algún otro material que soporte el peso de vehículos de gran tamaño. La **figura 1.4** muestra una fotografía de los carriles exclusivos de Metrobús, en la Ciudad de México.



Figura 1.4. Carriles confinados de Metrobús, Ciudad de México

Obtenido de: www.skyscrapercity.com

1.1.1.2. Estaciones

Las estaciones son la imagen y el punto de entrada al Sistema BRT, deben diseñarse no solamente con propósitos funcionales sino también considerando la comodidad, conveniencia de los usuarios y la integración con otros modos de transporte. El tamaño de la estación depende del número proyectado de pasajeros que la utilizarán así como de la cantidad y tipo de autobuses que pudieran ser alojados en la misma, su ubicación depende de factores relativos a la demanda y las características de la vialidad donde serán instaladas. La **figura 1.5** muestra una estación de piso alto en el BRT de Quito, Ecuador.



Figura 1.5. Estación de piso alto, BRT Quito, Ecuador

Fuente: Wright & Hook (2007).



Los Sistemas BRT también tienen como objetivo ser un sistema de transporte 100% accesible, es por ello que las estaciones deben contar con infraestructura especial (rampas, ascensores, guías táctiles, semáforos auditivos, etc.) para facilitar el acceso a personas con alguna discapacidad y personas de la tercera edad, así como plataformas al mismo nivel de piso del autobús. La **figura 1.6** presenta una estación con elevador para personas con silla de ruedas.

Figura 1.6. Estación tipo tubo con elevadores para silla de ruedas en Curitiba, Brasil

Obtenido de:
<http://apuntes-urbanos.blogspot.mx>



Así mismo, es necesario que las estaciones dispongan de señalización icónica que permita al usuario identificar el sistema y la estación, brindar espacio suficiente para alojar las máquinas de cobro de tarifas y control de acceso, además de ser cómodas, seguras y ofrecer protección contra algunas condiciones climáticas.

1.1.1.3. Terminales y Patios

Las *terminales* son los puntos de transferencia más importantes, normalmente están situadas en el extremo de cada corredor troncal y hacen posible la transferencia de usuarios con otros modos de transporte.

Los *patios* son instalaciones diseñadas para cumplir múltiples tareas del sistema, por ejemplo: el estacionamiento de la flota, reabastecimiento de combustible, limpieza y lavado de vehículos, mantenimiento y reparación de unidades. Es común que en estos lugares se destine espacio para oficinas administrativas de los operadores e instalaciones para los empleados.

Normalmente los patios se ubican adyacentes a las terminales, esto con el objeto de utilizar el estacionamiento del patio y evitar así desplazamientos innecesarios (en vacío) de las unidades cuando algunos vehículos salen de servicio durante los períodos valle o de baja demanda. Sus dimensiones, dependen en gran medida



del tamaño y la cantidad de vehículos que resguardará y del número de vehículos que probablemente necesitarán reparaciones. La **figura 1.7** señala la ubicación de la terminal “Suba” y su patio, en el sistema TransMilenio de Bogotá, Colombia.

Figura 1.7. Ubicación de patios y terminales del Sistema TransMilenio, Colombia.

Fuente: Wright & Hook (2007).



1.1.2. Tecnología

Los avances tecnológicos en sistemas tarifarios, vehículos y los relacionados con las comunicaciones han jugado un papel clave en el desarrollo que ha experimentado el transporte público a nivel mundial, pues además de mejorar la operación y aportar una imagen de modernidad y sofisticación a los sistemas de transporte, contribuyen con el cuidado del medio ambiente.

1.1.2.1. Vehículos

Existe una amplia variedad de vehículos de transporte público, pero la decisión sobre cuál utilizar depende de factores tales como su capacidad, tamaño, costo, configuración interna (puertas, altura del piso, disposición de asientos y pasillos), sistemas de propulsión y diseño. Para corredores de gran demanda (superior a 4,000 pasajeros hora-sentido) los vehículos articulados y biarticulados de 160 y 240 pasajeros, respectivamente, se han vuelto un estándar. La **figura 1.8** muestra dos vehículos articulados con diferente altura de piso.



Figura 1.8. Autobús biarticulado con piso alto de TransMilenio (izquierda) y autobús articulado con piso bajo de TranSantiago (derecha). Obtenido de: www.skyscrapercity.com



Generalmente, los vehículos que operan en los Sistemas BRT utilizan tecnologías con altos estándares ambientales tales como los niveles EURO 3 o superiores, esto con el fin de reducir la cantidad de gases contaminantes que se emiten a la atmósfera. Tales tecnologías hacen uso de combustibles amigables con el medio ambiente como el diesel limpio (50 ppm o menor), gas natural comprimido o líquido, biocombustibles e, inclusive, se ha optado por utilizar vehículos híbridos o eléctricos.

1.1.2.2. Equipos automatizados de peaje

Puesto que en los Sistemas BRT los pasajeros pagan en la estación previo al acceso al autobús se hace evidente la necesidad de utilizar tecnología especializada para la recolección y verificación de tarifas, Wright & Hook (2007) mencionan que el equipo físico del sistema de peaje debe estar conformado por los siguientes elementos:

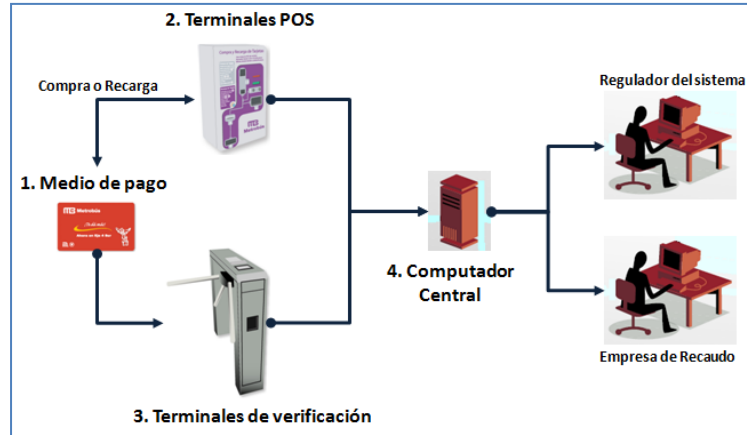
1. *Medio de pago*: El medio de pago usualmente es efectivo, boletos de papel, tarjetas magnéticas o tarjetas inteligentes.
2. *Terminales de punto de venta* (POS por sus siglas en inglés): Son puntos de pago donde los boletos, tarjetas magnéticas o tarjetas inteligentes pueden ser comprados. En el caso de tarjetas inteligentes, los POS también sirven como puntos de recarga de efectivo.
3. *Terminales de deducción de valores o máquinas de verificación de tarifa*: Se refiere por lo general a máquinas de monedas, torniquetes o lectores de tarjetas.
4. *Computador central*: Es el lugar donde reposa toda la información del sistema de peaje, por lo general está conectado a las terminales POS y a las terminales de deducción de valor a través de sistemas de telecomunicaciones o de tecnología GPRS (General Packet Radio Service). Toda la información que se recopila en el computador central debe estar a disposición de la empresa que recauda los ingresos y de la entidad que regula el sistema.

La **figura 1.9** muestra el flujo de información a través de los elementos que conforman los sistemas de peaje.



Figura 1.9. Flujo de información de los sistemas de peaje

Fuente: Elaboración propia con imágenes de Metrobús y CTS México.



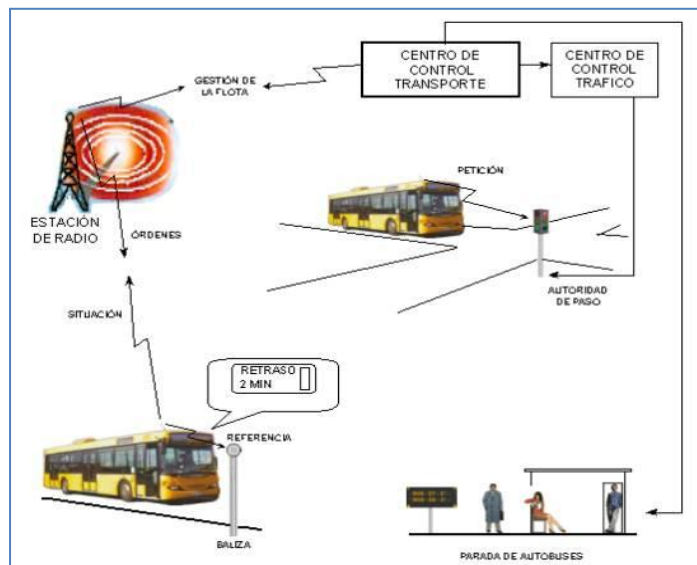
1.1.2.3. Sistemas de Ayuda a la Explotación (SAE)

Una amplia variedad de tecnologías SAE pueden ser integradas a los BRT a través de la utilización de alta tecnología de computación y comunicación, esto con el fin de mejorar el rendimiento del sistema en términos de tiempos de viaje, confiabilidad, control, eficiencia operacional y seguridad.

Estas tecnologías juegan un papel importante en la gestión de redes de transporte pues pueden incluir dispositivos de rastreo y ubicación de vehículos en forma continua (**figura 1.10**), control del rendimiento del vehículo en el camino, la inmediata identificación de condiciones de emergencia, proporcionar información actualizada al minuto a los usuarios, sistemas de seguridad, cobro de tarifas y control automatizado de acceso e, incluso, la programación del servicio. Algunas agencias de BRT ya han implementado estos sistemas pero desafortunadamente involucran considerables costos de operación, lo que podría afectar su tarifa.

Figura 1.10. Localización Automática de Vehículos (AVL) por radio e información al usuario en tiempo real en sistemas de transporte público

Fuente: Notas núm. 57, Instituto Mexicano del Transporte, 2001.





1.2. Estructura Institucional y de Negocios

Wright & Hook (2007) señalan que los Sistemas BRT prestan un servicio de alta calidad no solamente por el uso de infraestructura propia y tecnología avanzada, sino también porque redefinen la forma en cómo se gestionan y regulan los servicios de transporte público. Normalmente, se darán concesiones al sector privado para que se hagan cargo de la recolección de tarifas, distribución de ingresos y la operación de los autobuses, mismas que serán reguladas y vigiladas por una entidad pública, por lo tanto, se creará un sistema mixto de **regulación pública** y **operación privada**. Bajo este nuevo marco institucional se deberá definir el nivel de participación y las responsabilidades de las diferentes entidades (públicas y privadas) que participarán en el sistema, además de crearse mecanismos de coordinación entre las partes para determinar las condiciones operativas, técnicas, financieras e institucionales bajo las cuales se brindará el servicio. La **figura 1.11** presenta las responsabilidades más importantes de las principales entidades involucradas en un Sistema BRT, las cuales se describirán a continuación.

Figura 1.11.
Responsabilidades de las organizaciones en el modelo de negocios de un sistema BRT

Fuente: Elaboración propia.



1.2.1. Entidad reguladora

Existe una amplia variedad de opciones sobre los arreglos institucionales y regulatorios en un Sistema BRT pero, sin duda, una de las más exitosas es la creación de una autoridad o departamento para el manejo y regulación del sistema (**entidad reguladora**) dotado de un equipo de profesionales altamente calificados, con independencia técnica y con responsabilidad sobre la infraestructura, tarifas, planeación, programación y control de la operación. Dicha autoridad también es la encargada de vigilar el cumplimiento de los arreglos contractuales pactados por los diferentes participantes del sistema.



1.2.2. Empresas operadoras y pago por kilómetro recorrido

En México, el modelo de negocios tradicional “**hombre-camión**” consiste en el otorgamiento, por parte del gobierno, de una concesión de transporte público a una persona física que es dueña de un autobús, microbús o combi, el cual es dado a trabajar a un tercero (*conductor*) al cual se le exige el pago de una “**cuenta**” (*cantidad fija de dinero*) al finalizar cada día de servicio. De esta manera, el ingreso del conductor se obtiene al restar la “cuenta” de las ganancias diarias por pasaje por lo que no se le garantizará una remuneración fija, es decir, ésta variará dependiendo del número de pasajeros que se transporte.

Debido a esto es que surge una de las externalidades más perjudiciales de dicho modelo de negocio y que pone en riesgo la seguridad de usuarios y particulares: la lucha irracional por cada pasajero en la calle o mejor conocida como “**la guerra del centavo**” (*figura 1.12*).

Figura 1.12. Guerra del centavo:
Bajo el esquema “Hombre-camión”
los conductores de transporte
público compiten por el pasaje

Obtenido de: <http://periodicodigital.com.mx>



Esta situación hace evidente y necesario el paso hacia un nuevo modelo de negocios que regularice y fortalezca las relaciones entre los diferentes actores involucrados (concesionario, conductor, usuario y gobierno), buscando independizar el ingreso de los concesionarios y conductores del número de pasajeros que se recogen en la vialidad. Hasta el momento, la solución más utilizada en los Sistemas BRT para lograr tal independencia consiste en la conformación de empresas operadoras, la programación del servicio y un arreglo contractual que estipule un **pago por kilómetro recorrido**, dicho pago debe permitir a los concesionarios cubrir con sus costos totales de operación y garantizar una utilidad (*figura 1.13*). Así mismo, los operadores pueden ser penalizados o premiados dependiendo de sus niveles de desempeño.

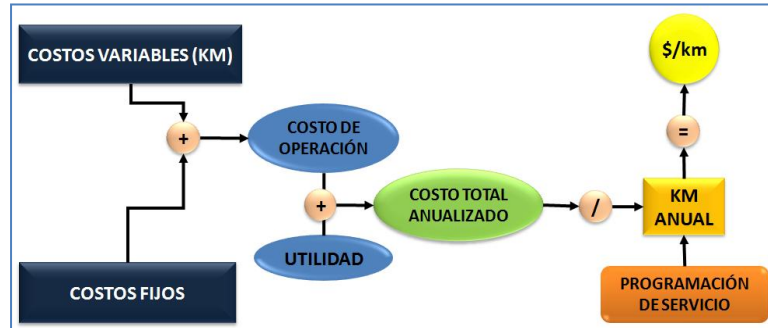
Las **empresas operadoras** serán aquellas que se encargarán de la adquisición, mantenimiento y operación de los autobuses que se utilizarán en el sistema. Las concesiones entregadas al sector privado para la operación de autobuses pueden darse de dos maneras, la primera es mediante licitaciones competitivas, transparentes y abiertas que establezcan los perfiles y requisitos de las compañías



operadoras. La segunda, y la más común en México, se logra mediante negociaciones con los concesionarios de transporte público que se verán afectados por la puesta en operación de un Sistema BRT, buscando que se organicen y establezcan como una empresa de transporte.

Figura 1.13. Cálculo del pago por kilómetro de servicio

Fuente: Metrobús, parámetros del modelo financiero.



Puesto que generalmente los esquemas de negocio tradicionales no son auto-financiables y se caracterizan por operaciones ineficientes, subsidios, deterioro de unidades y falta de recursos para el reemplazo de las mismas, el incorporar a los operadores convencionales en el nuevo esquema puede ayudarlos a convertir sus negocios en eficientes y rentables, pasando de un negocio donde se era dueño de una concesión individual y de su propio vehículo, a ser accionista de una empresa. Con esto se fomentan la generación de valor a través de la instauración de procesos, capacitación, mantenimiento y reinversión de capitales, logrando así la creación de un sistema de transporte público sostenible y rentable en el largo plazo. La **tabla 1.1** muestra algunos de los beneficios sociales para los involucrados en la implantación de un Sistema BRT.

Tabla 1.1. Beneficios sociales para los involucrados en la puesta en marcha de un Sistema BRT.

Involucrados	Beneficios
Autoridades	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Servicio de transporte público de calidad ▪ Reducción de accidentes viales ▪ Bajas emisiones contaminantes ▪ Rapidez de implantación ▪ Bajo costo de inversión ▪ Reordenamiento vial ▪ Mejoramiento de la imagen urbana
Concesionarios	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evolución a un esquema empresarial ▪ Accionista de un negocio competitivo y rentable ▪ Certidumbre jurídica
Conductores	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ingresos Estables ▪ Jornada laboral fija ▪ Prestaciones sociales ▪ Profesionalización
Usuarios	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Disminución de tiempos de traslado ▪ Mayor Seguridad ▪ Integración con otros modos de transporte ▪ Accesibilidad

Fuente: Elaboración propia con información del CTS México.



1.2.3. Tarifa

Por lo general, un Sistema BRT debe gestionarse **sin contar con subsidios gubernamentales**, es decir, todos los costos relativos a la prestación y administración del servicio de transporte, incluyendo la remuneración de las empresas prestadoras de servicios, deben ser cubiertos en su totalidad con la tarifa que pagan los usuarios.

Los componentes cotidianos de los costos operacionales que deben ser cubiertos por la tarifa, incluyen: pagos de capital (depreciación de vehículos, costo de capital, etc.), costos fijos de operación (salarios de conductores, costos administrativos, seguros, etc.), costos variables de operación (combustible, autopartes, llantas, mantenimiento, etc.) y, además, un fondo para contingencias e investigación en futuros proyectos. El incluir en dicha tarifa el costo de la infraestructura para este tipo de sistemas no es lo más adecuado por razones de equidad social, por lo que los gastos de infraestructura son cubiertos íntegramente por inversión gubernamental.

En la **figura 1.14** se muestra un diagrama del procedimiento de cálculo de tarifa en un Sistema BRT.

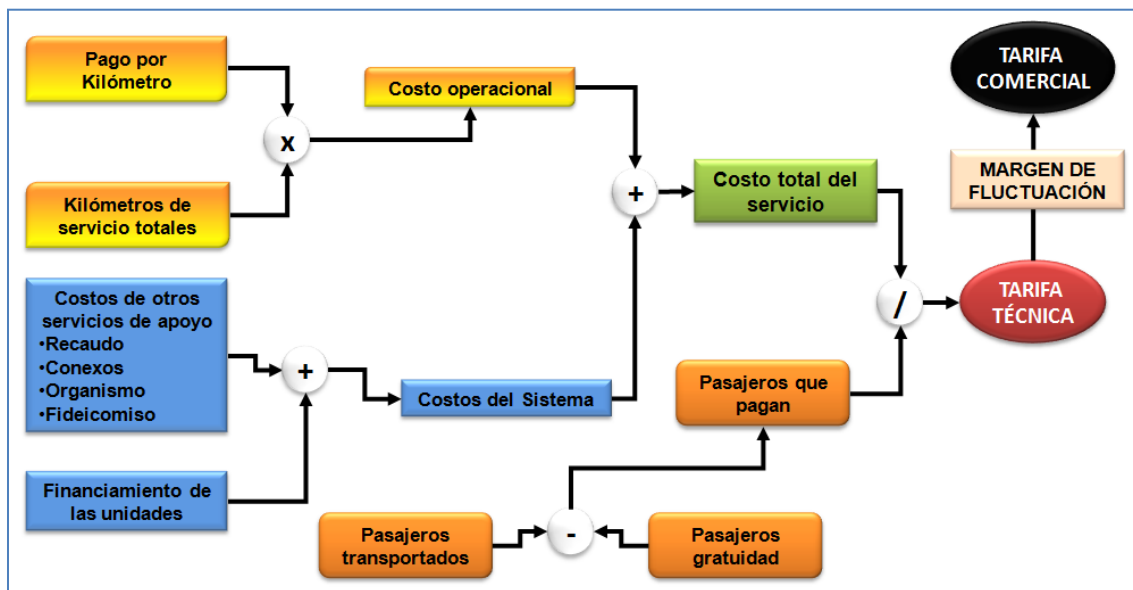


Figura 1.14. Cálculo de tarifas.

Fuente: Metrobús, parámetros del modelo financiero.

Por fortuna, haciendo uso de tarifas únicas o planas (tarifa constante e independiente de la distancia de recorrido) y ajustando la operación según la demanda de transporte se logra un sistema de transporte eficiente, lo que hace posible mantener tarifas bajas y un sistema rentable.



1.2.4. Empresas de recaudo y fideicomiso

Una distribución de ganancias altamente transparente y factible de rendir cuentas es definitiva para asegurar la confianza y participación de todos los involucrados en un Sistema BRT. Por lo general, una **compañía con concesión independiente para el recaudo de las tarifas** va a recolectar, contar y depositar los ingresos del sistema además de hacerse responsable de la instalación, operación y mantenimiento de los sistemas de recaudo, tales como tarjetas, máquinas expendedoras, torniquetes, validadores, cámaras de vigilancia y sistemas electrónicos para el procesamiento de información.

Finalmente, otra entidad independiente o **administrador de un fondo fiduciario** recibe los ingresos recolectados por la compañía de recaudo y con ellos genera dos fondos, uno para la distribución de ingresos a cada participante del sistema basándose en los arreglos contractuales establecidos previamente, y otro para hacer frente a contingencias o futuros proyectos. En muchos casos se trata de un banco u otra institución financiera de confianza.

La **figura 1.15** muestra un esquema general de la distribución de ingresos entre los distintos participantes del sistema TransMilenio.

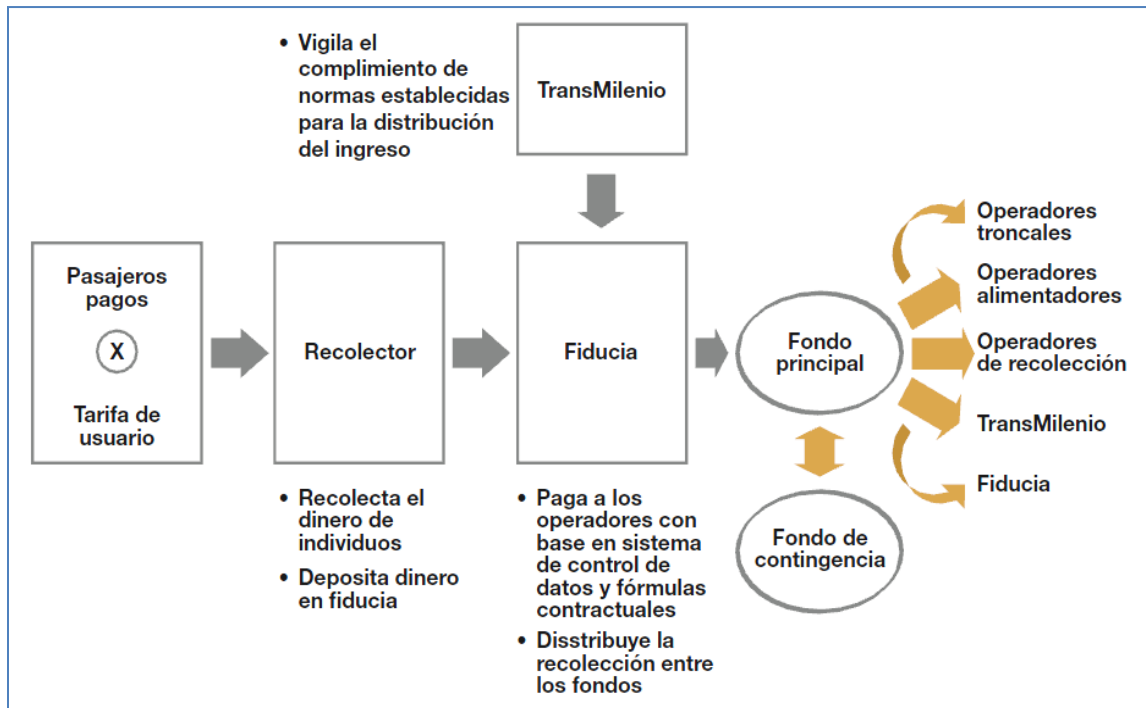


Figura 1.15. Distribución de ingresos por tarifas para los participantes del Sistema TransMilenio

Fuente: Wright & Hook (2007).



1.3. Capacidad y Operación

La capacidad de un sistema de transporte está definida por el número de pasajeros que puede transportar por hora y por sentido (pphs), según Wright & Hook (2007) la capacidad de los Sistemas BRT oscila entre los 3,000 y los 25,000 pphs aunque algunos sistemas como *TransMilenio*, en Colombia, han logrado una capacidad máxima de hasta 45,000 pphs mediante el uso de vehículos de alta capacidad, estaciones con acoplamientos múltiples, diversificación de rutas y servicios exprés. La **figura 1.16** muestra los rangos de capacidad en los que puede optarse por determinado tipo de transporte público.

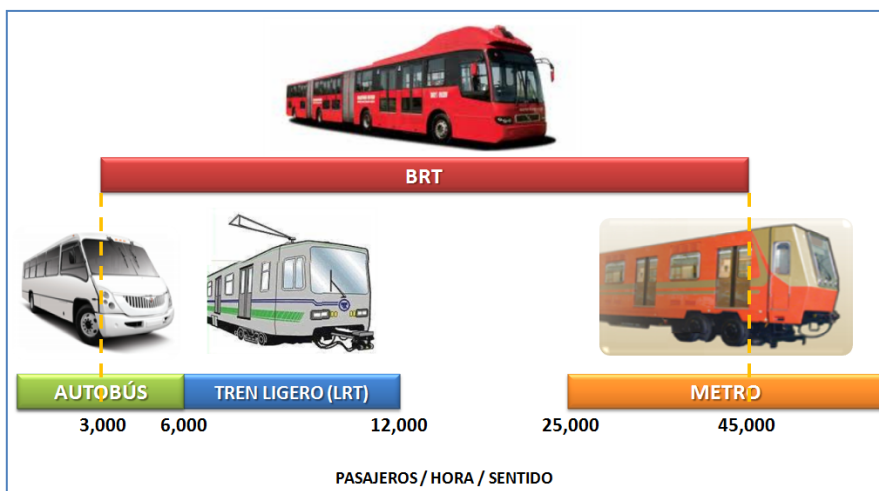


Figura 1.16. Capacidad de diversos sistemas de transporte público.

Fuente: Elaboración propia con datos de Wright & Hook (2007).

Por otro lado, la planeación, organización y control de la operación son el “**punto clave**” que marca la diferencia con el sistema de transporte concesionario convencional, el objetivo es ofrecer un servicio rápido, confiable, seguro, rentable y que responda a las necesidades de los usuarios. Según el Centro de Transporte Sustentable de México (CTS) el servicio en los Sistemas BRT debe centrarse en el usuario, por lo que la frecuencia de paso de vehículos en el sistema debe diseñarse acorde a la cantidad de demanda en el mismo evitando el desperdicio de recursos.

El diseño y regulación de la operación afecta en gran medida a la capacidad del sistema, la confiabilidad del servicio y el tiempo de viaje, un problema con un solo autobús puede ocasionar la obstrucción del carril confinado, retrasos y sobrecupo de las unidades. Debido a esto, deben reducirse al mínimo todos aquellos factores que pudieran afectar el desempeño del sistema, algunas acciones encaminadas a este respecto son: contar con rigurosos planes de mantenimiento, programaciones del servicio al detalle, planes de contingencia y adecuadas condiciones de trabajo para los operadores.



Aunque no existe un método universal de cómo gestionar la operación del transporte (puesto que está sujeta de innumerables variables) es evidente que de dicha gestión dependerá la calidad del servicio que se ofrezca y los costos operacionales que definen la tarifa y la rentabilidad del sistema.

1.4. Metrobús, Ciudad de México

En los últimos años, la gestión urbana de la Ciudad de México se ha fundamentado en políticas de desarrollo sustentable, ya que la operación de los servicios de transporte está asociada a determinadas externalidades que ponen en riesgo la sustentabilidad del entorno en el cual se desarrollan (contaminación, accidentes, congestión, etc.). Es por ello que el Gobierno del Distrito Federal adoptó y adaptó el modelo de transporte público BRT bajo el nombre de “Metrobús”, buscando mejorar las condiciones ambientales de la ciudad, dar prioridad y mejorar la calidad del servicio de transporte público así como el reordenamiento vial y urbano.



Figura 1.17. Estación “Glorieta de Insurgentes” del Sistema Metrobús de la Ciudad de México

Obtenido de: www.skyscrapercity.com

Según la página oficial de internet del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, se trata de *“un sistema de transporte flexible basado en autobuses de alta tecnología y calidad, que brinda movilidad urbana de manera rápida, cómoda y eficiente por medio de la integración de infraestructura preferente, operaciones rápidas y frecuentes y excelencia en el servicio”*.

1.4.1. Antecedentes

El 24 de septiembre de 2004 la Secretaría de Transportes y Vialidad del Distrito Federal (SETRAVI) publicó en la Gaceta Oficial del Distrito Federal (GODF) la Aprobación del establecimiento del Sistema de Transporte Público denominado: **Corredores de Transporte Público de Pasajeros del Distrito Federal (CTPP)**,



los cuales se implantarían en vialidades que por su intensidad de demanda se justifiquen y que por sus características físicas sea factible.

Dichos corredores son definidos en dicha gaceta (GODF 24/9/2004) como: *“un sistema de transporte masivo y/o colectivo, con operación regulada, recaudo centralizado, que operan de manera exclusiva en vialidades con carriles reservados para el transporte público, total o parcialmente confinados, que cuentan con paradas predeterminadas y con infraestructura para el ascenso y descenso de pasajeros, en estaciones ubicadas a lo largo de los recorridos, con terminales en su origen y destino, con una organización para la prestación del servicio como personas morales”*.

Estudios técnicos realizados sobre la Avenida de los Insurgentes (GODF 12/11/2004), mostraban la factibilidad de establecer un CTPP en dicha vialidad ya que la mayoría de la avenida contaba con cuatro carriles por sentido y el transporte público movilizaba alrededor de 251 mil pasajeros diarios. Es por eso que el primer corredor en considerarse fue el Corredor de Transporte Público de Pasajeros “Metrobús” Insurgentes (GODF 1/10/2004), que correría del tramo comprendido entre Indios Verdes y la intersección con el Eje 10 Sur (19.4 kilómetros), confinando el carril izquierdo de cada sentido de esta vialidad para uso exclusivo del transporte público.

Estudios de balance oferta-demanda sobre la Avenida de los Insurgentes (GODF 6/10/2004), evidenciaban la existencia de sobreoferta de servicio en el transporte público de microbuses así como la necesidad de reordenar el servicio, renovar el parque vehicular (262 microbuses, 20 autobuses de particulares y 94 autobuses de RTP) y mejorar las condiciones de operación en dicha avenida (**figura 1.18**).

Figura 1.18. Avenida de los Insurgentes antes de la construcción del CTPP Insurgentes (2005)

Fuente: Metrobús, 2005-2010
Movilidad Sustentable.



Por consiguiente, el 12 de noviembre de 2004 se publica en la GODF, el aviso de *“Declaratoria de necesidad para la prestación del servicio público de transporte de pasajeros en el CTPP Metrobús Insurgentes”*, en tal declaratoria se consideraba



que el volumen de demanda (5,512 pasajeros/hora/sentido) era insuficiente para el establecimiento de un sistema de transporte de alta capacidad como el tren ligero o el metro, además de que el costo de las inversiones requeridas en la construcción de un corredor representaban el 14% con respecto a la construcción de tren ligero y el 3% con respecto a la construcción de metro con tiempos de construcción mucho menores (de seis meses a un año), con lo cual se determinó que el Sistema de Corredores de Transporte era el modo más factible para atender las necesidades de transporte público de pasajeros en dicha vialidad.

En esa misma gaceta se da a conocer el esquema operativo para la prestación de servicio en el corredor precisando que la regulación, supervisión y control de la operación quedaría a cargo de un organismo público descentralizado creado por el Gobierno del Distrito Federal. A este respecto, el Gobierno de la Ciudad de México publica el 9 de marzo de 2005 en la GODF el “*Decreto por el que se crea el **Organismo Público Descentralizado Metrobús***”, dotado de personalidad jurídica, patrimonio propio y autonomía técnica y administrativa. Dicho organismo es sectorizado a la SETRAVI y tiene por objeto la planeación, administración y control del Sistema de Corredores de Transporte Público de Pasajeros del Distrito Federal.

Después de casi seis meses de construcción y una inversión de alrededor de 32.5 mdd, el 19 de junio de 2005 se inaugura formalmente el servicio del Corredor de Transporte Público de Pasajeros Insurgentes (**figura 1.19**).

Figura 1.19. Imagen inicial de los vehículos del Metrobús Insurgentes, primer CTPP del Distrito Federal

Obtenido de:
<http://transportevalledetoluca.blogspot.mx>





1.4.2. Red de Metrobús

A la fecha, el Sistema Metrobús de la Ciudad de México está conformado por cuatro líneas, la **tabla 1.2** resume las principales características de cada una de ellas. La infraestructura total del sistema consiste de 9 terminales, 141 estaciones y casi 180 kilómetros de carril confinado. Dicha infraestructura así como la delimitación y sustitución de asfalto por concreto hidráulico en los carriles confinados fueron proporcionados por el Gobierno de la Ciudad a través de la Secretaría de Obras y Servicios del Distrito Federal.

Tabla 1.2. Características generales de las Líneas de de Metrobús, Ciudad de México.

Línea	Corredor de Transporte	Longitud	Terminales	Estaciones Intermedias	Demanda en día Hábil	Rutas en día Hábil *
Línea 1 Metrobús	Insurgentes e Insurgentes Sur	28 Km	Indios Verdes El Caminero	44	440 mil pasajeros	<ul style="list-style-type: none"> • Indios Verdes - Glorieta de Insurgentes • Indios Verdes - Dr. Gálvez • Buenavista II (L3 y L4) - El Caminero • Indios Verdes - El Caminero
Línea 2 Metrobús	Eje 4 Sur	20 Km	Tacubaya Tepalcates	34	170 mil pasajeros	<ul style="list-style-type: none"> • Tepalcates - Tacubaya • Tepalcates - Etiopía • Del Moral - Colonia del Valle (L1) • Tepalcates - Colonia del Valle (L1)
Línea 3 Metrobús	Eje 1 Poniente	17 Km	Tenayuca Etiopía	31	140 mil pasajeros	<ul style="list-style-type: none"> • Tenayuca - Etiopía (L2) • Tenayuca - Balderas • Tenayuca - La Raza (L1) • Tenayuca - Buenavista II (L1 y L4)
Línea 4 Metrobús	Centro Histórico	28 Km	Buenavista San Lázaro Aeropuerto T1 y T2	32	50 mil pasajeros	<ul style="list-style-type: none"> • Buenavista - Aeropuerto T1 y T2 • Buenavista - San Lázaro (Ruta Sur) • Buenavista - San Lázaro (Ruta Norte)
Total	4 Líneas	93 Km	9 Terminales	141 Estaciones	800 mil Pas/día	15 Rutas en día hábil

* Variable según las características de la demanda

Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.

Además de contar con transbordos gratuitos entre sus diferentes líneas, el Sistema Metrobús tiene conectividad completa con el Sistema de Transporte Colectivo Metro y el Tren Suburbano.

La **figura 1.20** muestra la distribución geográfica de la red actual de las líneas de Metrobús en el Distrito Federal así como su conectividad con otros sistemas de transporte público de la ciudad.



MAPA DEL SISTEMA METROBÚS, CIUDAD DE MÉXICO.

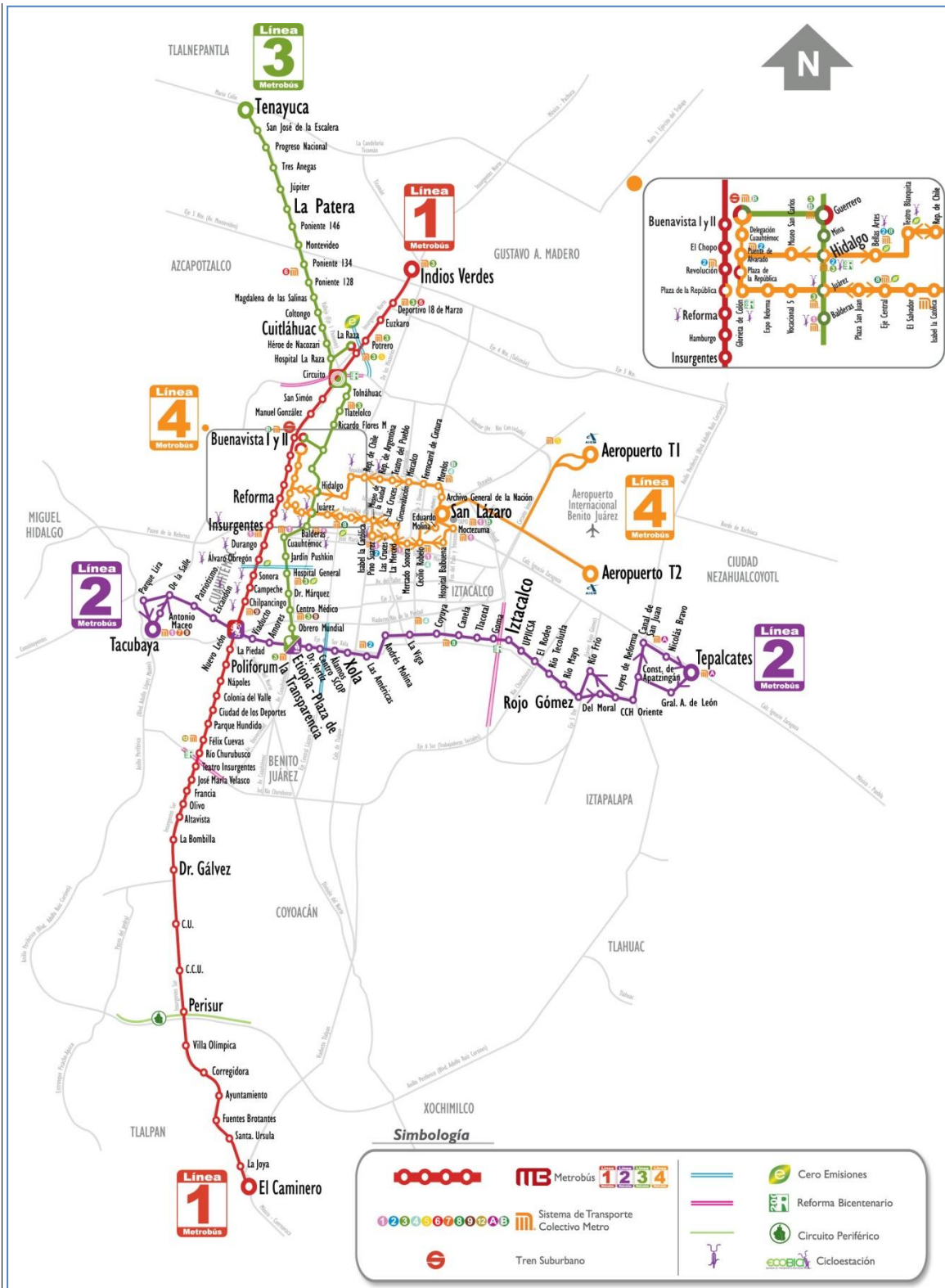


Figura 1.20. Distribución de la Red de Metrobús en el Distrito Federal. Obtenido de: www.metrobus.df.gob.mx

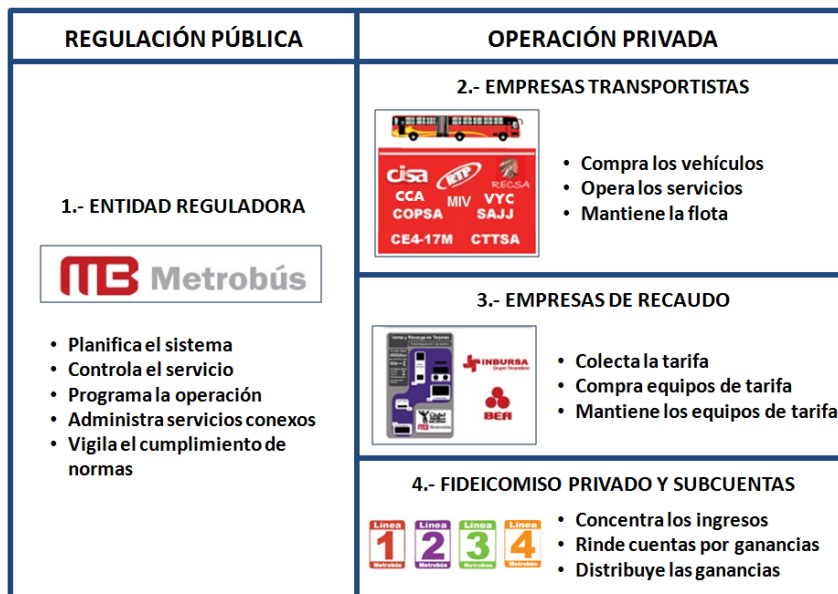


1.4.3. Estructura organizacional

Congruente con el esquema institucional y de negocios de los Sistemas BRT, el Sistema Metrobús está conformado de la siguiente manera (**figura 1.21**):

Figura 1.21. Estructura Organizacional del sistema Metrobús

Fuente: Elaboración propia con imágenes de: www.metrobus.df.gob.mx



1.- El Organismo Público Descentralizado Metrobús es responsable de administrar, planear, programar el servicio y controlar la operación del Sistema de Corredores de Transporte Público de Pasajeros (CTPP) del Distrito Federal, asumiendo el papel de **entidad reguladora**.

2.- Los concesionarios que operaban en las vialidades que se declararon como CTPP pueden participar en Metrobús siempre y cuando estén constituidos como Sociedades Mercantiles y se ajusten a las normas de operación que establezca Metrobús. Dichas empresas son las encargadas de adquirir, dar mantenimiento y operar los autobuses que se requieran en el sistema, la **tabla 1.3** muestra un listado de las **empresas operadoras** que actualmente participan en Metrobús.

Tabla 1.3. Empresas operadoras de autobuses del Sistema Metrobús.

Empresa operadora	Razón Social	Integrada por las rutas:	Corredor asignado
CISA	Corredor Insurgentes, S.A. de C.V.	R2	L1
RECSA	Rey Cuauhtémoc, S.A. de C.V.	R1 y R76	L1
*RTP	Red de Transporte de Pasajeros del D.F.	*Organismo Público	L1 y L2
CE4-17M	Corredor Eje 4 - 17 de Marzo, S.A. de C.V.	R110 (GMT)	L2
COPSA	Corredor Oriente - Poniente, S.A. de C.V.	R49	L2
CT TSA	Corredor Tacubaya – Tepalcates, S.A. de C.V.	R27 y R53	L2
SAJJ	Transportes Sánchez Armas José Juan, S.A. de C.V.	R11	L2
MIV	Movilidad Integra de Vanguardia, S.A. de C.V.	R1, R3, R88 y ADO	L3
CCASA	Conexión Centro - Aeropuerto S.A. de C.V.	-	L4
VYC	Vanguardia y Cambio S.A. de C.V.	-	L1

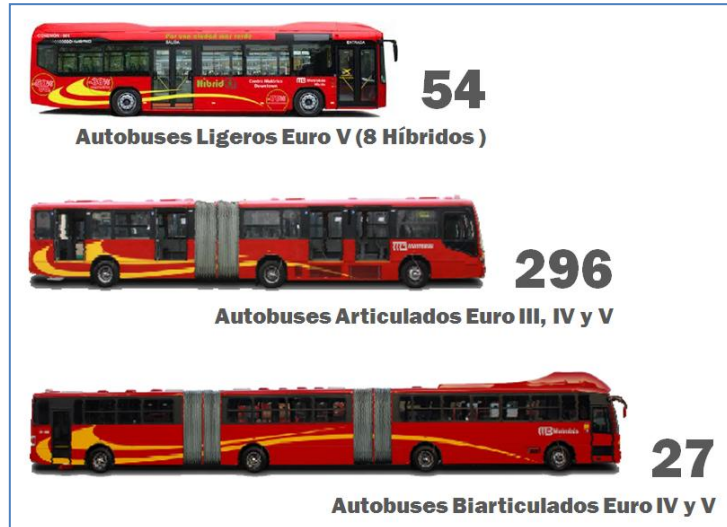
Fuente: Elaboración propia.



La flota vehicular actual del Sistema Metrobús está conformada por 54 autobuses ligeros, 296 autobuses articulados y 27 autobuses biarticulados, con capacidad para 80, 160 y 240 pasajeros, respectivamente (**figura 1.22**).

Figura 1.22. Flota vehicular actual de Metrobús

Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.



3.- Cada línea de Metrobús cuenta con los servicios de una **empresa de recaudo**, las cuales son responsables de la instalación, operación y mantenimiento de los sistemas de recaudo y medios de pago del sistema. Así mismo, dichas empresas son las encargadas de recolectar los ingresos que se generen por la prestación del servicio de transporte y canalizarlos a un fideicomiso privado.

La tarifa actual de Metrobús, sin importar la distancia y con posibilidad de hacer transbordos entre líneas, es de \$6.00 pesos m.n. la cual es controlada mediante una tarjeta electrónica (**figura 1.23**) que se puede adquirir y recargar en máquinas expendedoras instaladas en cada una de las estaciones y terminales del sistema. Los adultos mayores de 70 años, niños menores de 5 años y personas con alguna discapacidad quedan exentos de pago.

Figura 1.23. Tarjeta electrónica (Smart Card) como medio de pago en Metrobús

Fuente: Elaboración propia.





4.- Por último, se cuenta con un **fideicomiso privado** que concentran y administran los recursos que se generan por el pago de tarifa en cada uno de los CTPP, este organismo es responsable de distribuir dichos recursos entre las empresas que prestan sus servicios al sistema Metrobús y, además, genera un fondo para contingencias o inversión en futuros proyectos.

Puesto que los Sistemas BRT deben estar diseñados para trabajar sin subsidios gubernamentales, la principal fuente de recursos de Metrobús es por medio de la tarifa que paga el usuario. Dichos ingresos son recolectados por la empresa de recaudo la cual los deposita en un fideicomiso privado que generará un fondo principal para retribuir los servicios prestados al sistema por los diferentes involucrados, basándose en arreglos contractuales. En el caso de las empresas operadoras, se les paga con base en el número de kilómetros de servicio realizados según la programación establecida por Metrobús. Los ingresos sobrantes se concentrarán en un fondo secundario para atender contingencias, financiar la compra de autobuses o reinvertir en futuros proyectos.

La **figura 1.24** esquematiza la distribución de ingresos, descrita anteriormente, bajo el esquema institucional y de negocios adoptado por Metrobús.

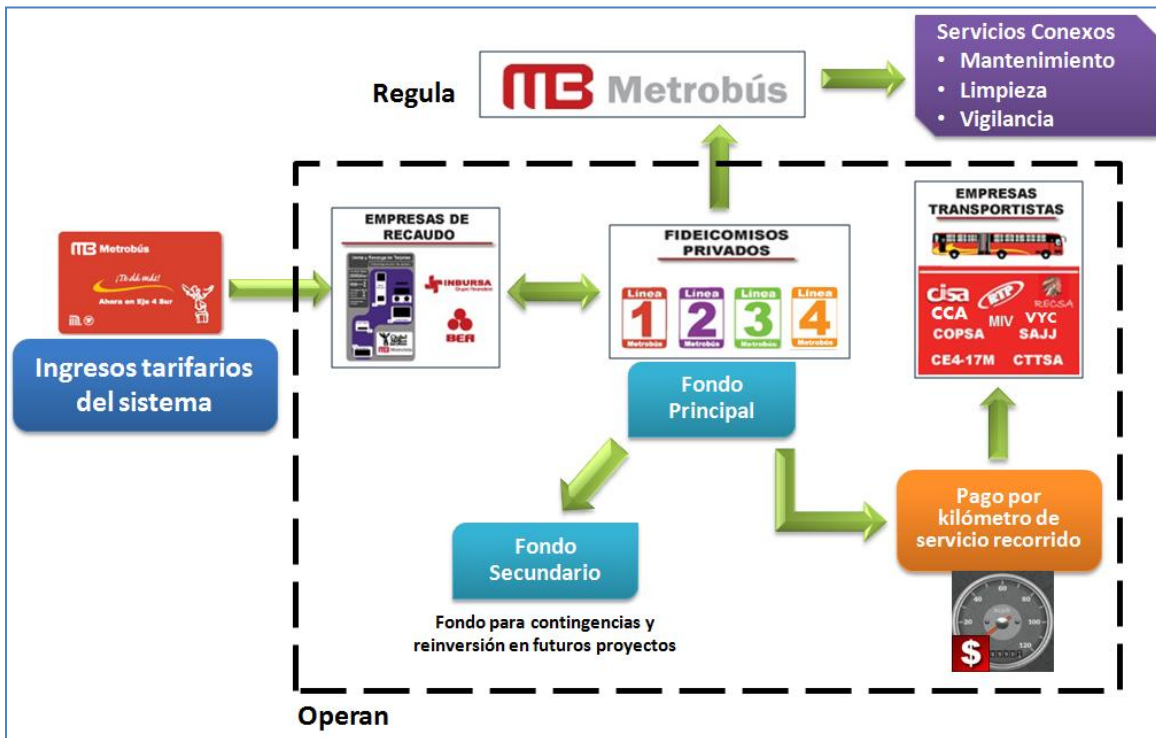


Figura 1.24. Distribución de ingresos según el esquema de negocios de Metrobús

Fuente: Elaboración propia con imágenes de www.metrobus.df.gob.mx



Debido a ventajas como su bajo costo, rapidez de implantación, la disminución de los tiempos de viaje, el ordenamiento de la circulación y del espacio público, la reducción de emisión de gases de efecto invernadero y el cambio organizacional de las empresas de transporte, el Gobierno del Distrito Federal ve en el Sistema Metrobús una importante alternativa en la mejora del transporte público y las condiciones medioambientales de la Ciudad de México, por lo que planea seguir con la construcción de más corredores de este tipo.

1.5. Problemática en Metrobús Línea 1

La Línea 1 de Metrobús (**figura 1.25**) recorre toda la Avenida de los Insurgentes, una de las principales vialidades de la Ciudad de México, corre de Indios Verdes en el norte de la ciudad hasta El Monumento al Caminero en el sur. Dicha línea tiene una longitud aproximada de 28 km y se puede recorrer, de terminal a terminal, en un tiempo estimado de una hora con veinte minutos.

Actualmente transporta a cerca de 440 mil pasajeros al día, para lo cual, ofrece un servicio de cuatro rutas dentro del mismo corredor:

- Indios Verdes – Gta. de Insurgentes
- Indios Verdes – Dr. Gálvez
- Buenavista – El Caminero
- Indios Verdes – El Caminero



Figura 1.25. Mapa Línea 1 de Metrobús

Fuente: www.metrobus.df.gob.mx

Dichas rutas pueden variar tratando de ajustar el servicio a las características y volumen de la demanda, tal y como se explica en el siguiente capítulo.

1.5.1. Evolución del servicio y crecimiento de la demanda

La **Tabla 1.4** presenta un resumen cronológico de la evolución del servicio en la Línea 1 de Metrobús, en ella es posible observar que desde su inauguración en 2005 a la fecha, la demanda total diaria en el corredor se ha incrementado en casi un 77% pasando de 249 mil a 440 mil pasajeros por día, tal y como se muestra en la **figura 1.26**.



Dicho incremento en la demanda se debe principalmente a dos razones, la primera tiene que ver con **el nivel de servicio y las características del sistema**; Sussman (2000) señala que el volumen de la demanda de transporte está dado en función del nivel de servicio, es decir, mientras mayor sea el nivel de servicio que se ofrezca en un sistema de transporte o vialidad, mayor será su demanda (**ver figura 1.27**). Según Molinero (2005), el concepto de **Nivel de Servicio** aplicado a los sistemas de transporte público es mucho más complejo que el utilizado en el caso de las vialidades, ya que integra todas las características del servicio de transporte que afectan al usuario, incluye aspectos de desempeño operacional, calidad de servicio y de nivel tarifario.

Tabla 1.4. Evolución del servicio de la Línea 1 de Metrobús.

Año	Volumen HMD (pasajeros/hora/sentido)	Sección de Máxima Demanda (N-S)	Rutas en Operación	Vehículos en operación	Demanda en día hábil (viajes prom.)	Observaciones:
2005	5,500	Buenavista	2	72 articulados	249,000	- Inicia operaciones el CTPP Insurgentes
2006	7,200	Buenavista – El Chopo	3	84 articulados	266,000	-
2007	8,300	Buenavista – El Chopo	3	89 articulados	270,000	-
2008	8,770	El Chopo – Revolución	4	122 articulados 10 biarticulados	320,500	- Se amplía el servicio con la inauguración del CTPP Insurgentes Sur - Inician operaciones el Tren Suburbano y el CTPP Eje 4 Sur (Línea 2) - Se adquieren vehículos de mayor capacidad
2009	9,200	Buenavista – El Chopo	5	116 articulados 11 biarticulados	336,000	-
2010	9,500	Buenavista – El Chopo	5	120 articulados 11 biarticulados	343,500	- Se inaugura la terminal Buenavista II
2011	10,500	Buenavista	4	120 articulados 12 biarticulados	375,600	- Inicia operaciones el CTPP Eje 1 Poniente (Línea 3) - Inicia operaciones el CTPP Centro Histórico (Línea 4)
2012	10,900	Buenavista - El Chopo	5	122 articulados 23 biarticulados	440,000	- Se adquieren vehículos de mayor capacidad

Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.

Figura 1.26. Crecimiento de la Demanda Total Diaria en Metrobús L1

Fuente: Elaboración propia.

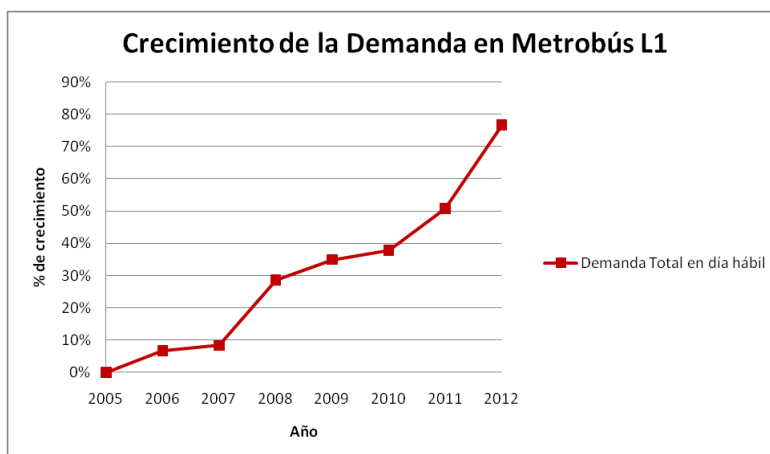
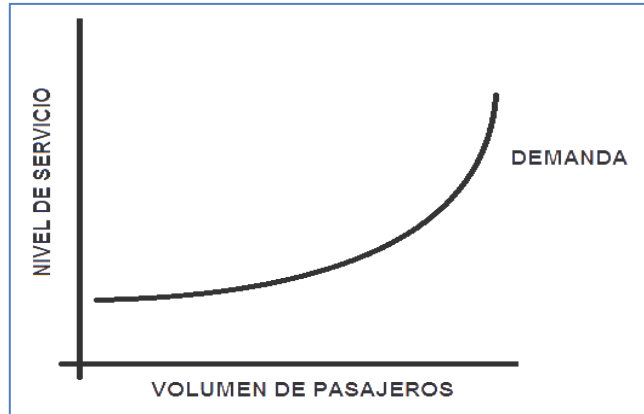




Figura 1.27. Nivel de servicio vs Volumen: Demanda de Transporte

Fuente: Sussman (2000).



Las características, exclusividad y prioridad que tiene la Línea 1 de Metrobús sobre la Avenida de los Insurgentes ha permitido generar un mayor nivel de servicio en comparación con el que se brindaba antes de que Metrobús entrara en operación, ofreciendo un servicio de transporte de bajo costo, accesible, confiable, rápido y seguro. Guillermo Calderón (*Director General de Metrobús*) menciona en una entrevista realizada por el diario MILENIO que “con este sistema, los usuarios se ahorran hasta un 40% del tiempo que antes invertían en trasladarse sobre dicha avenida”, por lo tanto, al brindar un mayor nivel de servicio el Sistema Metrobús se convierte en una opción de transporte más atractiva para los usuarios, prueba de ello es que cerca del 15% de los mismos han optado por dejar estacionado su automóvil para trasladarse en dicho sistema según datos oficiales del Sistema Metrobús. De igual manera, los altos niveles de servicio en el transporte público tendrán un impacto directo en la concentración de actividades a lo largo del corredor o línea de transporte, lo cual generará la atracción de viajes y, por ende, el incremento en la demanda.

La segunda razón está asociada con **el crecimiento del sistema y su integración con otros modos de transporte**. En marzo de 2008 se puso en operación el CTPP Insurgentes Sur ampliando así la cobertura del primer corredor, este hecho incrementó y modificó el comportamiento de la demanda puesto que los usuarios cambiaron sus costumbres de viaje haciendo evidente la necesidad de integrar la operación entre ambos corredores. Algo parecido sucede cuando se van agregando más corredores al sistema o se inauguran nuevos sistemas de transporte que interactúan con los ya existentes, la demanda se modifica puesto que existe transferencia de usuarios entre líneas y modos de transporte. Por ejemplo, el inicio de operaciones del Tren Suburbano en 2008 que corre de Buenavista a Cuautitlán (*conectando al Estado de México con el Distrito Federal*) atrajo una gran cantidad de usuarios a la Línea 1 de Metrobús, por lo que fue necesaria la adquisición de autobuses de mayor capacidad (**figura 1.28**) y la construcción de una estación alterna en Buenavista como medidas de mitigación.



Esto explica los saltos de la demanda que muestra la **figura 1.26** en los años 2008, 2011 y 2012 congruentes con la inauguración de otros CTPP y del Tren Suburbano.

Figura 1.28. Presentación de la flota biarticulada de RTP para la Línea 1 de Metrobús, en octubre de 2008

Fuente: www.metrobus.df.gob.mx



En el **Anexo A** se muestran los mapas que representan el crecimiento cronológico del Sistema Metrobús así como su interacción con el Tren Suburbano.

Otro ejemplo de cómo impacta el nivel de servicio y la interacción con otros modos de transporte al incremento de la demanda en la Línea 1 de Metrobús, se observa en la **figura 1.29**, en ella se muestra el tramo de la Avenida Insurgentes (*Indios Verdes - La Raza*) que paralelamente es atendido por la Línea 1 de Metrobús y la Línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo Metro. De esta manera ambos sistemas pueden complementarse pues Metrobús puede considerarse como un servicio alimentador donde el Metro aun tiene capacidad, o como un servicio suplementario donde el Metro tiene sobrecupo. Sin embargo, el nivel de servicio que brinda el Metro, principalmente en las horas de mayor demanda, ha provocado que algunos usuarios que para llegar a sus destinos tengan la posibilidad de utilizar cualquiera de los dos sistemas, prefieran viajar en Metrobús aunque ello implique un costo de pasaje mayor pues no tienen que subir o bajar escaleras, soportar altas temperaturas y poca ventilación, tolerar el ruido excesivo generado por algunos vendedores ambulantes (vagoneros) o estar a merced de carteristas y delincuentes que aprovechan la aglomeración de personas para delinquir.

Figura 1.29. Tramo de la Av. Insurgentes que paralelamente es atendido por Metrobús L1 y el Metro L3

Fuente: *Elaboración propia.*

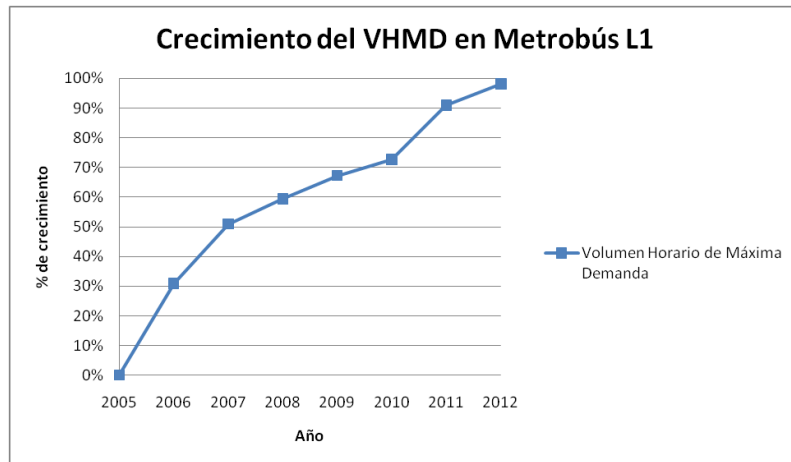




Otro factor que es importante mencionar de la evolución y crecimiento de la demanda en la Línea 1 de Metrobús, es el aumento del Volumen Horario de Máxima Demanda (**VHMD**), parámetro utilizado en el dimensionamiento del corredor (*cálculo de la flota vehicular necesaria*) y que en siete años se incrementó en casi un 98% pasando de 5,500 a 10,900 pasajeros/hora-sentido, tal y como se muestra en la **figura 1.30**.

Figura 1.30. Crecimiento del Volumen Horario de Máxima Demanda en Metrobús L1

Fuente: Elaboración propia.



Este fenómeno en el que la demanda total diaria y el **VHMD** en un corredor de transporte no crecen al mismo ritmo se debe a la modificación de los hábitos o costumbres de viaje de los pasajeros, pues al incrementarse la longitud de sus viajes aumenta el tiempo que permanecen en el sistema y se genera la concentración de pasajeros en ciertos tramos de la línea. Dicha situación aunada al crecimiento natural de la demanda ha provocado un desajuste entre la oferta y la demanda de transporte, pues mientras los ingresos del sistema provenientes de la tarifa que paga el usuario sólo han crecido en un 75%, la demanda de unidades que brinden servicio en el corredor ha crecido prácticamente al doble, lo cual puede verse reflejado en el sobrecupo de las unidades.

1.5.2. La Hora de Máxima Demanda y el Sobrecupo

Debido a que la mayoría de las personas tienen que trabajar o estudiar en un mismo horario, se presentan periodos del día donde se concentra una cantidad importante de pasajeros que demandan servicio, llamados Horas de Máxima Demanda (**HMD**), si dicha cantidad de usuarios sobrepasa la capacidad de un sistema de transporte se producirá la saturación o sobrecupo de las unidades (**figura 1.31**), pues la cantidad de vehículos en el sistema no puede crecer al mismo ritmo que la demanda. Es por ello que la operación en los sistemas de transporte debe diseñarse para hacer frente al VHMD. Lamentablemente, fuera de



esos periodos de tiempo la demanda es considerablemente menor por lo que algunas unidades deberán salir de operación y permanecer ociosas e improductivas durante las horas de menor afluencia de pasaje.

Figura 1.31. Sobrecupo de estaciones y vehículos de Metrobús en las "horas de máxima demanda"

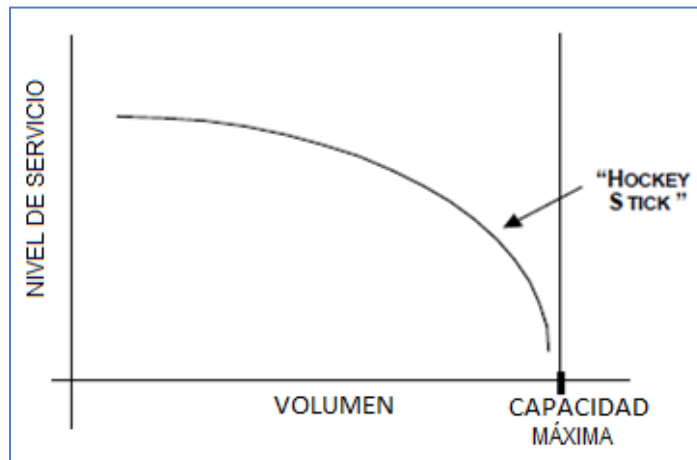
Obtenida de:
<http://www.eluniversaldf.mx>



El fenómeno del sobrecupo es explicado por Sussman (2000), quien menciona que cuando el volumen a transportar (*demanda*) se aproxima a la capacidad máxima de un sistema (*oferta*), el nivel de servicio que se presta se deteriora drásticamente, fenómeno al cual llama "Hockey Stick" (**figura 1.32**).

Figura 1.32. Nivel de Servicio vs Volumen: Hockey Stick

Fuente: Sussman (2000).



A pesar de las bondades del Sistema Metrobús, el aumento y la concentración de la demanda de transporte (*principalmente en la HMD*) así como una flota vehicular limitada, ha provocado un deterioro del nivel de servicio que se ve reflejado por el sobrecupo de las unidades, principal causa de inconformidad y quejas por parte de los usuarios de la Línea 1. Este problema es común en cualquier sistema de transporte público en áreas urbanas, desgraciadamente la solución queda fuera del alcance de dichos sistemas puesto que involucra medidas de carácter social, político e institucional. Lo que sí está al alcance de los sistemas como Metrobús es redefinir sus políticas de operación para buscar la forma de disminuir el impacto



que dicho fenómeno tiene sobre el servicio y así brindar un adecuado **nivel de servicio** y, que al mismo tiempo, disminuyan o no se incrementen los **costos de operación** puesto que sus recursos son limitados.

1.5.3. Nivel de servicio

Tanto la cantidad de vehículos como la ocupación de los mismos, son los principales parámetros de la operación que afectan directamente el nivel de servicio que se brinda en una línea de transporte, Molinero (2005) menciona que:

1. Ocupar una gran cantidad de unidades (sin exceder la capacidad de la vía o carril confinado) y transportar pocos pasajeros por vehículo permite ofrecer un nivel de servicio “alto”, aunque es posible que los costos de operación sean elevados y se afecte dicho nivel con una tarifa igualmente alta.
2. Si se operan pocos vehículos, los niveles de ocupación serán tan altos que muy probablemente se saturarán las unidades por lo que se brindará un servicio de baja frecuencia haciendo que los tiempos de espera para los usuarios puedan ser demasiado largos, es por ello que el nivel de servicio ofertado será realmente bajo.
3. El nivel de servicio adecuado para el diseño de los transportes públicos en la HMD se logra operando un gran número de vehículos sin congestionar la vialidad, con niveles de ocupación cercanos a la saturación.

La **figura 1.33** muestra cada uno de los anteriores casos.

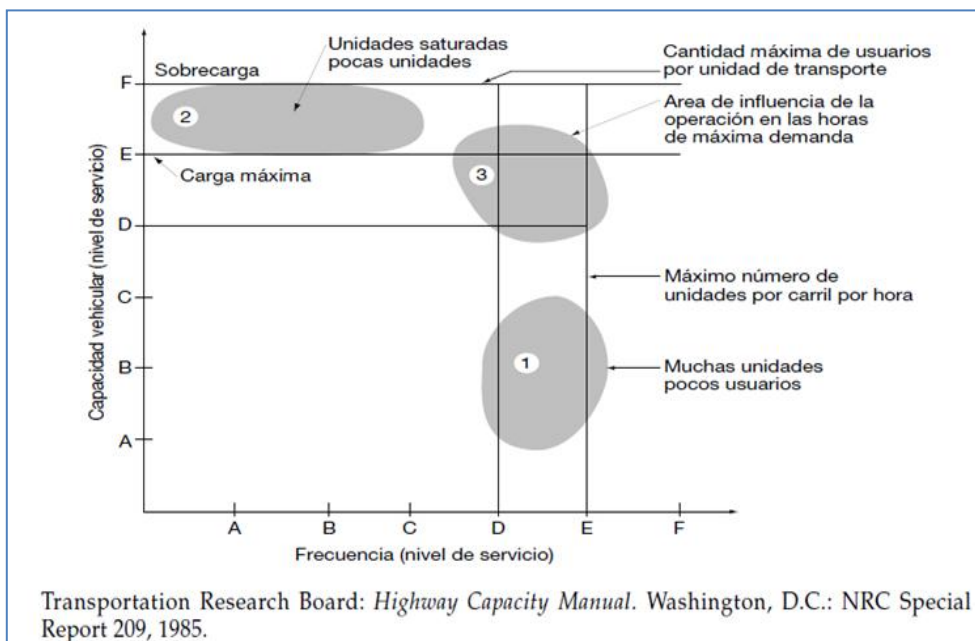


Figura 1.33.
Naturaleza bidimensional de los niveles de servicio de transporte público.

Fuente: Molinero (2005).



En un principio, las empresas operadoras en la Línea 1 de Metrobús adquirieron una flota de 80 vehículos articulados para brindar servicio en el corredor, la cual fue aumentando hasta llegar a 140 unidades. Se pudieran seguir adquiriendo más unidades de este tipo para hacer frente al volumen actual de la demanda, pero el problema es que el carril confinado que utiliza Metrobús sobre la Avenida de los Insurgentes tiene una capacidad máxima de 75 vehículos/hora-sentido por lo que se corre el riesgo de congestionarlo si se siguiera con esa tendencia.

Es por ello que para hacer frente al crecimiento de la demanda, se ha optado por sustituir gradualmente la flota por una conformada con vehículos de mayor capacidad, comenzando por la adquisición de 27 unidades biarticuladas que junto a las 140 unidades articuladas conforman la actual flota total disponible de la Línea 1.

Puesto que el principal parámetro de cualquier Sistema BRT son los usuarios (los cuales valoran la rapidez, seguridad, frecuencia y comodidad de un sistema de transporte) no se puede tolerar el fenómeno del sobrecupo en los vehículos, por lo que el diseño operativo debe enfocarse en optimizar el uso de la flota vehicular y garantizar espacio suficiente en las unidades para hacer frente a las variaciones estocásticas del VHMD; si es posible siguiendo el caso número 3 de la **figura 1.33** considerando una ocupación máxima de diseño de entre el 85 y el 90 por ciento para la HMD.

1.5.4. Costos de operación

En el Sistema Metrobús los costos derivados del servicio deben ser cubiertos en su totalidad por la tarifa que pagan los usuarios, además, tales ingresos deben generar un margen de utilidad razonable para quienes aplican su tiempo, esfuerzo y recursos a la tarea de transportar. Es por ello que debe ajustarse lo más que se pueda la oferta a la demanda de transporte buscando reducir los costos de operación y evitar caer en gastos innecesarios que pudieran incrementar las tarifas y castigar la economía de los usuarios.

Metrobús ha optado por un arreglo de rutas dentro de un mismo corredor para reducir sus costos de operación, con lo cual es posible ajustar el servicio con las variaciones de la demanda a lo largo de los corredores logrando así disponer de una cantidad mayor de rutas y vehículos donde exista una mayor concentración de usuarios.



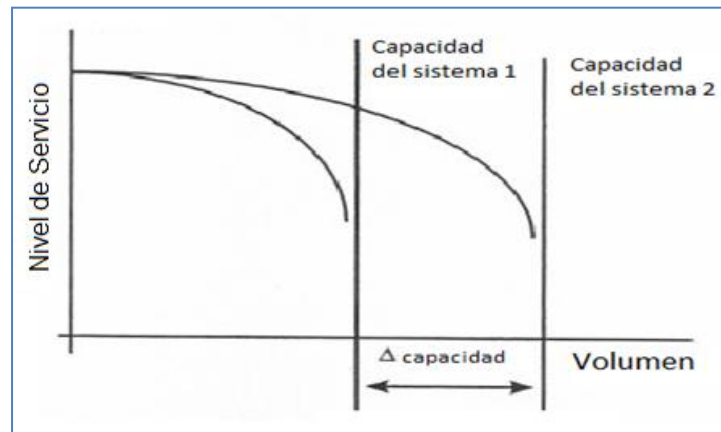
1.5.5. Inversiones en capacidad

A pesar de que Metrobús ha incrementado su flota vehicular y ha modificado su esquema de rutas para hacer frente al problema del sobrecupo, los niveles de ocupación registrados siguen incrementando conforme se ofertan más lugares a los planeados en la operación del servicio.

Esto podría deberse a tres factores: deficiencias en la estimación de la demanda, uso no óptimo de la flota o capacidad insuficiente en el sistema (pocas unidades). En cuanto a este último factor, Sussman (2000) menciona que la decisión de invertir en ampliar la capacidad de un sistema de transporte no es una decisión sencilla, si no se invierte lo suficiente en capacidad es posible que no mejore el nivel de servicio que se quiera proporcionar. Por otro lado, si se invierte demasiado el nivel de servicio podría mejorar muchísimo pero los costos de operación serían muy altos y las tarifas podrían no ser convenientes. Así mismo, señala que los aumentos en la capacidad conllevan el riesgo de que bajo futuras condiciones los niveles de servicio decaigan de nuevo, tal y como se muestra en la **figura 1.34**.

Figura 1.34.
Incremento de la capacidad y Nivel de servicio

Fuente: Sussman (2000).



Por lo tanto, se puede concluir que las inversiones enfocadas únicamente en aumentar la capacidad de un sistema de transporte sólo son efectivas en determinados periodos de tiempo, por lo que deben considerarse medidas de largo plazo. Es por ello que además de considerar la adquisición y el uso de autobuses de mayor capacidad en la Línea 1, Metrobús requiere idear soluciones a través de la mejora en sus políticas de operación y estimación de la demanda reestructurando sus rutas acorde al comportamiento de los usuarios, adecuando su infraestructura y, principalmente, optimizando el uso de su flota vehicular.



El objetivo de la presente tesis está enfocado en el estudio y desarrollo de una herramienta matemática que permita optimizar el uso de la flota vehicular en la Línea 1 de Metrobús basándose en las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Qué cantidad de unidades de la flota actual en la Línea 1 del Sistema Metrobús debe asignarse a cada una de sus posibles rutas para poder atender los volúmenes de demanda presentes en cada tramo del corredor de tal manera que se optimice su uso y se evite el sobrecupo de los vehículos?
- ¿Cuál es el tamaño y tipo óptimo de flota vehicular que se requiere para hacer frente a los volúmenes actuales o futuros de la demanda?

Para poder dar respuesta a dichas preguntas, primero es necesario comprender *cómo* y *por qué* el Sistema Metrobús funciona de tal manera, por lo que en los siguientes capítulos se explica, a detalle, el Análisis de la Demanda y la Oferta de transporte en dicho sistema así como la teoría relativa al equilibrio entre dichos términos.





Capítulo 2

Análisis de la Demanda y Oferta de Transporte

Según Wright & Hook (2007), la estimación y el análisis de la oferta y la demanda de transporte van a aportar la información necesaria para la planeación y optimización de las operaciones así como para la predicción de la viabilidad financiera de un sistema de transporte. Con respecto a otros sistemas, por sus características, los Sistemas BRT tienen la ventaja de contar con una operación flexible y controlada la cual permite diseñar un servicio basado en las necesidades y requerimientos de los usuarios.

2.1. La Demanda de Transporte

Ortúzar (2008) resalta que la demanda de transporte es una demanda derivada, es decir, surge de la necesidad que tienen los individuos de realizar determinadas actividades (trabajar, acceder a servicios de salud, educación, deporte, entretenimiento, comercio, etc.) y no por el simple hecho de transportarse. Al ser un factor que depende del comportamiento de las personas, la demanda de transporte es sumamente variable pues no sólo cambia en el tiempo según los horarios de los motivos de viaje, sino que también lo hace en el espacio según la ubicación de los centros de actividad.

La **figura 2.1** muestra los cambios en la cantidad máxima de usuarios abordo de las unidades de la Línea 1 del Sistema Metrobús, a lo largo del día (**figura 2.2**) y a lo largo del corredor (**figura 2.3**), dichas gráficas son resultado de los *polígonos de carga* obtenidos de *Estudios de Ascenso y Descenso* realizados en el año 2009, en el **Anexo B** se muestran los polígonos de carga de dicho estudio.

Dicha variabilidad de la demanda hace que su análisis y estimación sean más difíciles, pero es el estudio de dichas variaciones lo que permitirá conocer las características y necesidades de los usuarios para poder así diseñar la operación de tal manera que se pueda ajustar la oferta con la demanda de transporte, reducir los costos de operación y brindar un adecuado nivel servicio.

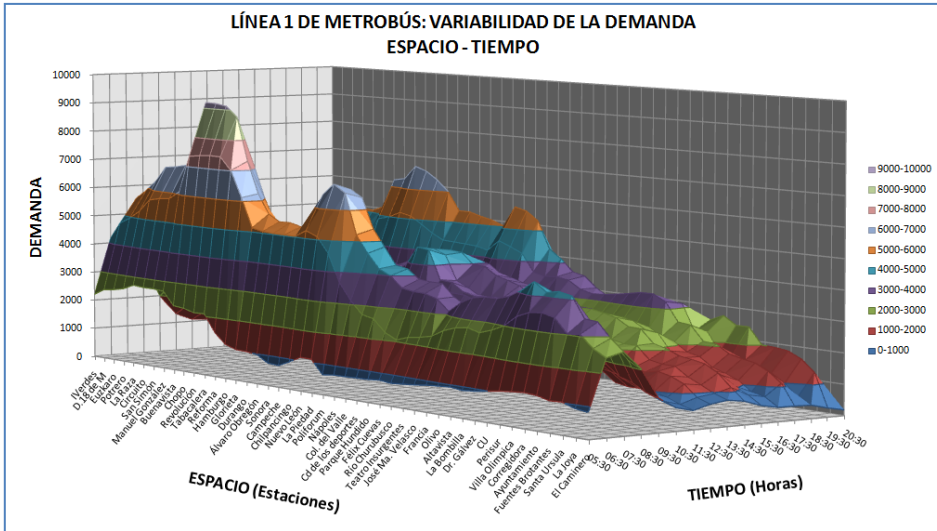


Figura 2.1.
Variabilidad de la Demanda de Transporte en el Tiempo y el Espacio

Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.

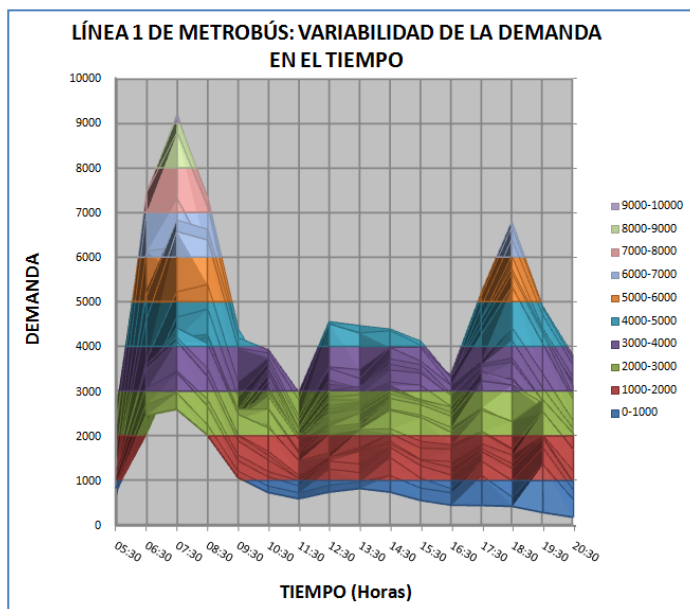
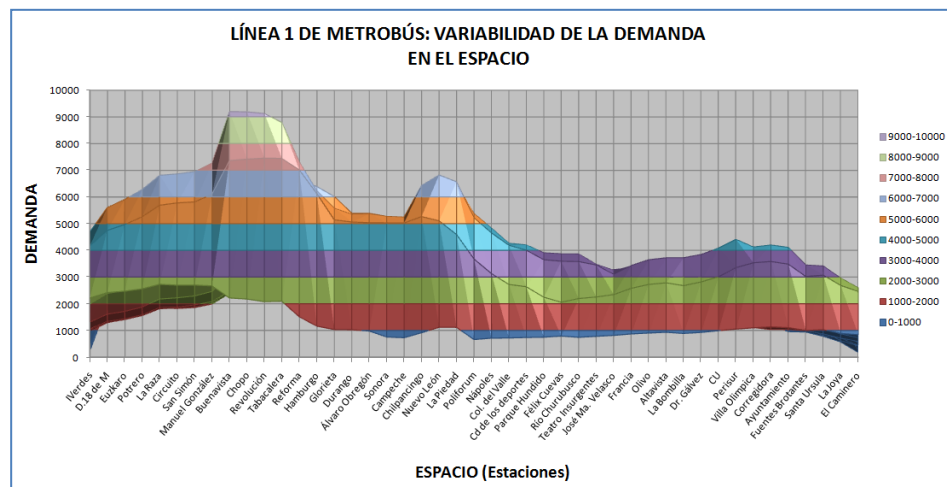


Figura 2.2.
Variabilidad de la demanda a lo largo del día 5:30-20:30 (Tiempo)

Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.

Figura 2.3.
Variabilidad de la demanda a lo largo del Corredor Insurgentes (Espacio)

Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.





2.1.1. Variabilidad de la demanda en el tiempo

La demanda de transporte no es constante, se puede observar que la ocupación de los servicios de transporte cambia según la hora del día, el día de la semana e incluso según la época del año. Estos cambios son característicos en cualquier sistema de transporte y se les conoce con el nombre de *Variaciones Periódicas de la Demanda*, las cuales son: Variación horaria, Variación diaria y Variaciones estacionales.

A continuación se describirá cada una de estas variaciones con el apoyo de los conceptos definidos por Alceda (1997).

2.1.1.1. Variación horaria

El concepto de variación horaria de la demanda alude a los cambios que presenta la demanda a lo largo del día. En general, la demanda presenta alzas agudas en ciertas horas y bajas pronunciadas en otras, la razón de ello estriba en los hábitos laborales y sociales de la población.

A los periodos del día que corresponden con las horas de mayor afluencia de pasaje se les conocen con el nombre de “horas punta” u “horas pico”, mientras que a las horas de menor afluencia se les conoce como “horas valle”.



Figura 2.4. Variación horaria de viajes en la ZMVM Fuente: INEGI Encuesta Origen-Destino 2007.

La **figura 2.4** muestra la variación horaria de viajes en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) según su hora de inicio y propósito, la cual fue obtenida de la *Encuesta Origen-Destino 2007 del INEGI* y en la cual es posible observar lo siguiente:



- El periodo matutino de máxima demanda oscila entre las 6:00 y 8:59 horas, lapso durante el cual la mayoría de la población ocupada y escolar se traslada a realizar sus actividades.
- El periodo de medio día de máxima demanda se presenta entre las 13:00 y 15:59 horas, cuyo flujo se encuentra relacionado con la salida de algunos centros educacionales o la salida a comer.
- El periodo vespertino de mayor concentración de viajes se genera entre las 17:00 y 19:59 horas, señala el retorno de la fuerza ocupacional a sus lugares de residencia o a centros de esparcimiento.

En este caso existen tres “horas pico” repartidas a lo largo del día y relacionadas con las principales actividades de la población pero sólo una de ellas presenta un fuerte repunte en la demanda de viajes, se trata de la Hora de Máxima Demanda (HMD) donde la mayor parte de la fuerza laboral se traslada a sus centros de trabajo.

El conocimiento del patrón de variación horaria de la región que se estudia es de suma importancia ya que todos los análisis de la operación deben hacerse justamente para la HMD, posteriormente, los programas de operación deberán prever los cambios en las frecuencias de servicio necesarios para adecuar la oferta con la demanda de transporte durante el resto del día, tal y como se describe en el tema *Programación del Servicio* del siguiente capítulo.

2.1.1.2. Variación diaria

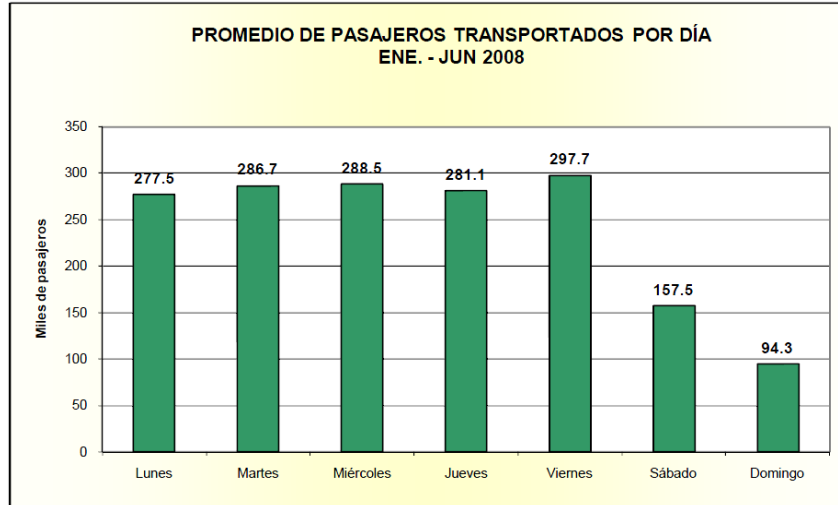
De manera similar al caso anterior, la demanda diaria no es igual entre semana que en sábado o en domingo, inclusive, no es igual en martes que en jueves o viernes. A lo largo de la semana es predecible una variación que puede mostrar dos o tres máximos además de un mínimo casi siempre en domingo. En los sistemas de transporte es común manejar un día que represente a todos los demás, particularmente de lunes a viernes, y con respecto a tal día se relaciona porcentualmente la demanda para fines de semana (sábado y domingo).

La utilidad de este patrón es también evidente, ya que los proyectos de operación se elaboran para el día típico y dependiendo el día de la semana se efectúan los ajustes necesarios apoyados en las relaciones porcentuales que muestre el patrón. La **figura 2.5** presenta un ejemplo de la variación diaria en el Sistema Metrobús de la Ciudad de México.



Fig. 2.5. Variación diaria de la demanda en el Sistema Metrobús, Ciudad de México.

Fuente: Metrobús, Informe de actividades Enero 2007 – Junio 2008.



2.1.1.3. Variación estacional

Las variaciones estacionales obedecen al hecho de que a lo largo del año suceden ciertos eventos que alteran la actividad urbana y repercuten en la operación de los transportes. Entre los más sobresalientes se encuentran los periodos vacacionales o días de asueto así como los ciclos de festividades masivas, religiosas o políticas. Son eventos en los que la actividad normal se interrumpe durante días o semanas, modificando los patrones de demanda. La **figura 2.6** muestra la variación estacional de la demanda en el Sistema Metrobús, siendo evidente la influencia de los días de descanso.

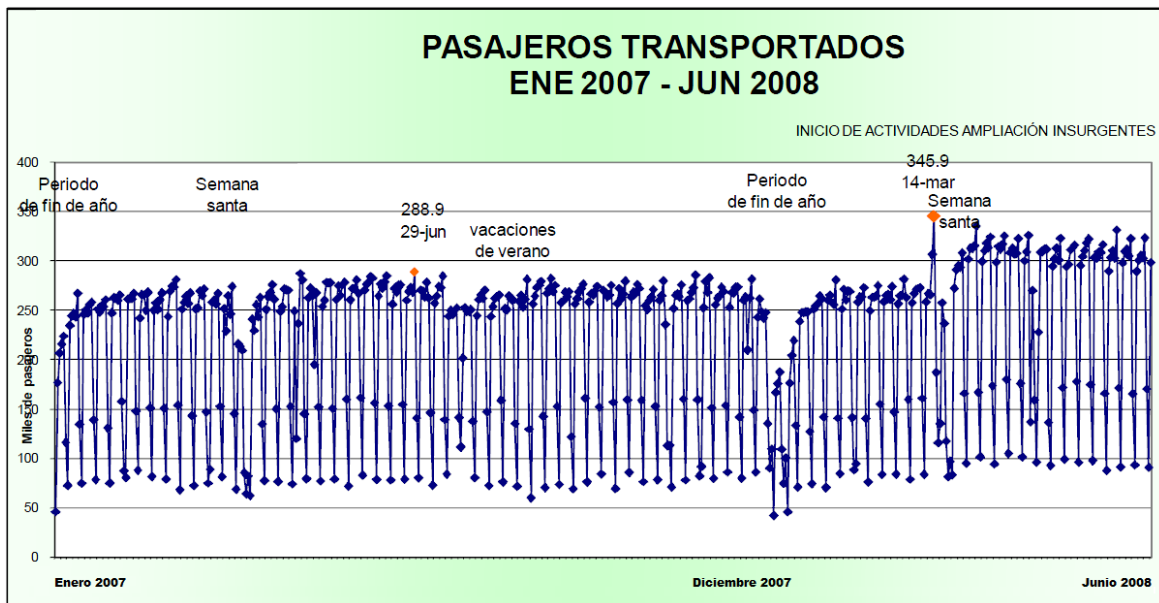


Figura 2.6. Variación estacional de la demanda en el Sistema Metrobús.

Fuente: Metrobús, Informe de actividades Enero 2007 - Junio 2008.



Los ajustes que se requieran en los servicios de transporte por este tipo de variaciones se calcularán a partir de los resultados de observaciones directas anteriores sin pretender asociarlos con las fechas normales, por lo que habrá que diseñar la operación específicamente para esos días.

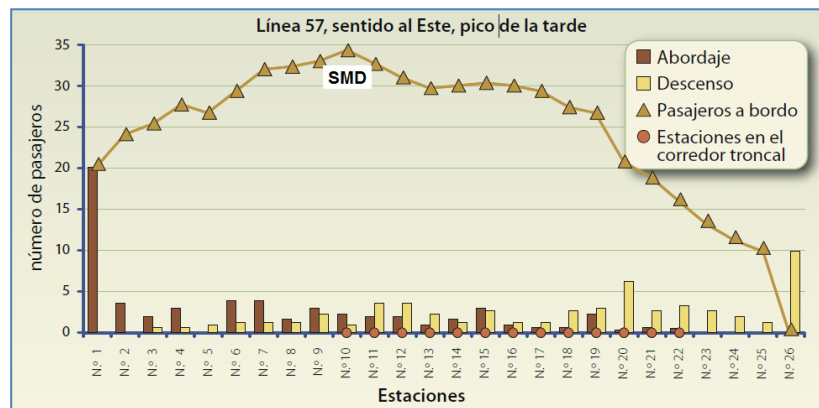
2.1.2. Variabilidad de la demanda en el espacio

Ortúzar (2008) señala que aunque parezca trivial, es la distribución de las actividades en el espacio lo que provoca la demanda en los sistemas de transporte, por lo tanto, para comprender la demanda en una ruta o línea de transporte es importante analizar cómo están distribuidos en el espacio los centros de actividad que satisfacen las necesidades de los usuarios.

La **figura 2.7** presenta un *polígono de carga* el cual muestra la cantidad de ascensos, descensos y la variación de la cantidad de pasajeros a bordo de las unidades en una ruta de transporte, en la HMD y a lo largo del trayecto. Se puede notar que existen paradas o lugares donde hay más concentración de usuarios que en otras, a la sección o punto de la ruta donde se presenta la máxima demanda de pasajeros se le conoce con el nombre de Sección de Máxima Demanda (SMD).

Fig. 2.7. Variación espacial de la demanda en una línea de transporte.

Fuente: Wright & Hook (2007).



Aquellos lugares donde existe la mayor cantidad de ascensos en la HMD podrían estar relacionados con zonas habitacionales, mientras que aquellos puntos donde existe la mayor cantidad de descensos se relacionarían con zonas escolares o de actividad laboral. Así mismo, es posible que en ambos casos se tenga una alta influencia de las principales avenidas de una ciudad y puntos de transferencia con otros modos de transporte.

La variabilidad espacial de la demanda frecuentemente provoca problemas de coordinación en el sistema, así mismo, tiene un alto impacto sobre los costos de



operación puesto que en ocasiones resulta difícil ajustar la oferta a dicha demanda de transporte. Para poder estimar la cantidad de oferta que se requiere en el Sistema Metrobús, es de gran utilidad conocer la forma en cómo dicho sistema estima o cuantifica su demanda.

2.1.3. Estimación de la demanda

Determinar la demanda lo más preciso posible permitirá contar con la información necesaria para diseñar un programa operativo que satisfaga, de una forma eficiente, las necesidades de transporte de los usuarios de la Línea 1 de Metrobús. En el caso de sobreestimar la demanda el sistema presentará una capacidad sobredimensionada, lo que llevará a que el tamaño de la inversión en flota vehicular se incremente al igual que los costos de operación. Si por el contrario se subestima la demanda, la capacidad que ofrecerá el sistema no será la suficiente para satisfacer la demanda de viajes, provocando la saturación de las unidades y un bajo nivel de servicio.

Molinero (2005) resalta que dentro del proceso de planeación del transporte público la recopilación de datos para conocer la demanda de viajes es una de las etapas más delicadas e importantes, al igual que Alceda (1997), señala que los métodos por muestreo más comunes para medir la demanda potencial de un servicio de transporte, ya existente o no, son:

- **Observaciones directas:** Se utilizan para determinar, a través de aforos o simples conteos, el número de vehículos o personas que pasan por determinados puntos de una ruta.
- **Encuestas:** Consisten en la aplicación de interrogatorios directos a los usuarios de un sistema de transporte a fin de conocer las características de la demanda (origen, destino, propósito y demás detalles del viaje). Así mismo, pueden utilizarse para conocer la demanda potencial de una nueva ruta o sistema de transporte.

Dichos métodos van a servir para realizar estudios que permitan obtener una “fotografía” de lo que sucede con la demanda a lo largo de una ruta y en un determinado momento del día.

Puesto que ya está en operación el servicio de transporte en la Línea 1 de Metrobús, es necesario monitorear su demanda periódicamente verificando que las condiciones de diseño operacional sigan vigentes y, en caso de detectarse cambios significativos, poder tomar las medidas necesarias para su ajuste.



Para verificar el desempeño de los servicios de transporte se recurre, principalmente, a la recopilación de la siguiente información:

- **Tiempo de ciclo de las unidades:** Es el tiempo que tarda un vehículo en recorrer la ruta completa (ida y vuelta), se toma cuando cada unidad pasa una y otra vez por el mismo “punto de control” a lo largo del día. Con este parámetro se busca asegurar una programación eficiente y un servicio confiable.
- **Sección y Volumen de Máxima Demanda:** Es el punto de la ruta donde se concentra la mayor cantidad de usuarios, su identificación sirve para poder estimar y asignar la cantidad de oferta (vehículos) necesaria y poder así satisfacer dicha demanda.
- **La variabilidad de la demanda:** El conocer cómo varía la demanda en el tiempo y en el espacio proporciona la información necesaria para ajustar la oferta con la demanda de transporte mediante la diversificación de un corredor en rutas, la asignación adecuada del tipo y tamaño de flota, así como la variación de las frecuencias de operación a lo largo del día, esto con el objeto de reducir los costos derivados de la operación.

Tanto los *Estudios de Frecuencias y Cargas* como los *Estudios de Ascenso y Descenso*, son las principales herramientas que utiliza Metrobús para monitorear su demanda de transporte y recopilar la información anterior.

2.1.3.1. Estudio de Frecuencias y Cargas

Según Molinero (2005) los Estudios de Frecuencias y Cargas permiten conocer el número de vehículos que pasan por determinados puntos de una ruta dentro de un periodo de tiempo establecido, así como la cantidad de usuarios que van a bordo de los mismos. También, resalta que su importancia radica en que es el punto de partida para el proceso de dimensionamiento o determinación de la oferta de transporte, así como para la preparación de la programación del servicio.

Dichos estudios consisten en realizar aforos en determinados lugares de la ruta llamados “puntos de control”, donde los aforadores registran el número de vehículos que pasan así como la hora de llegada y el índice de ocupación de cada unidad; tal información es resumida y comunicada cada hora al centro de control del sistema donde se recopila y procesa para su futuro análisis. En el **Anexo C** se muestra un ejemplo de los formatos ocupados para realizar dichos estudios.



De la información recopilada es posible conocer los tiempos de ciclo de las unidades que pasaron por los puntos de control, mientras que el índice de ocupación y el número de vehículos que pasan cada hora (frecuencia de operación) ayudan a calcular el volumen de pasajeros que se transportó por ese punto en el mismo lapso de tiempo, facilitando así la identificación de la HMD.

Los Estudios de Frecuencias y Cargas se consideran como una actividad rutinaria en Metrobús, puesto que les permiten contar con información actualizada sobre las fluctuaciones de la demanda de transporte a lo largo de los días (variación diaria y horaria). Molinero (2005) recomienda realizar estudios especiales cuando circunstancias específicas produzcan cambios significativos en las fluctuaciones de la demanda y se generen condiciones anormales o problemáticas, haciendo necesario revisar nuevamente la demanda de transporte en la ruta.

Una de las condiciones problemáticas que comúnmente se presenta en la Línea 1 de Metrobús son los altos índices de ocupación en las unidades, principalmente en la HMD. Dicha situación de sobrecarga hace evidente la necesidad de realizar estudios más precisos, como los Estudios de Ascenso y Descenso, para conocer a detalle los cambios en la demanda y poder así agregar las unidades que se requieran al sistema y/o reordenar la programación del servicio de tal forma que los índices de ocupación regresen a los niveles de diseño o normales.

2.1.3.2. Estudio de Ascenso y Descenso

Los Estudios de Ascenso y Descenso son aforos especiales que se utilizan para conocer la variación de los volúmenes de demanda a lo largo de una ruta de transporte y en periodos determinados del día, siendo de gran interés la recopilación de datos en la HMD.

Consisten principalmente en la cuantificación del número de pasajeros que abordan y descienden de una unidad de transporte, en cada una de las estaciones que conforman la ruta y en ambos sentidos de la misma. Generalmente estos estudios se realizan a lo largo de la jornada o en las horas críticas del día: horas pico y horas valle. En el **Anexo D** se muestra un ejemplo de los formatos ocupados para realizar dichos estudios. A diferencia de los Estudios de Frecuencias y Cargas que son parte de las actividades rutinarias del área de control en Metrobús, los Estudios de Ascenso y Descenso se realizan a intervalos amplios de tiempo, por ejemplo, una vez al año o cuando se requiera actualizar la información.



El principal resultado que se obtiene de dicho estudio es la representación gráfica de la cantidad de usuarios transportados en una ruta y en determinado momento del día, la cual recibe el nombre de *Polígono de Carga*. Dicho polígono se construye graficando la cantidad de pasajeros que subieron y bajaron de los vehículos del sistema en cada una de las estaciones, por consiguiente, se puede calcular cuántos pasajeros permanecen a bordo de las unidades. El análisis de este tipo de estudios permite conocer las fluctuaciones de la demanda a lo largo de la ruta (variabilidad en el espacio), los índices de renovación o rotación del servicio, así como identificar el punto o tramo donde se concentra la mayor cantidad de pasajeros, la SMD.

La **figura 2.8** muestra el polígono de carga de un día hábil en la Línea 1 de Metrobús en la HMD (de 7:30 a las 8:30 hrs), así como la ubicación de la SMD (estación Buenavista).

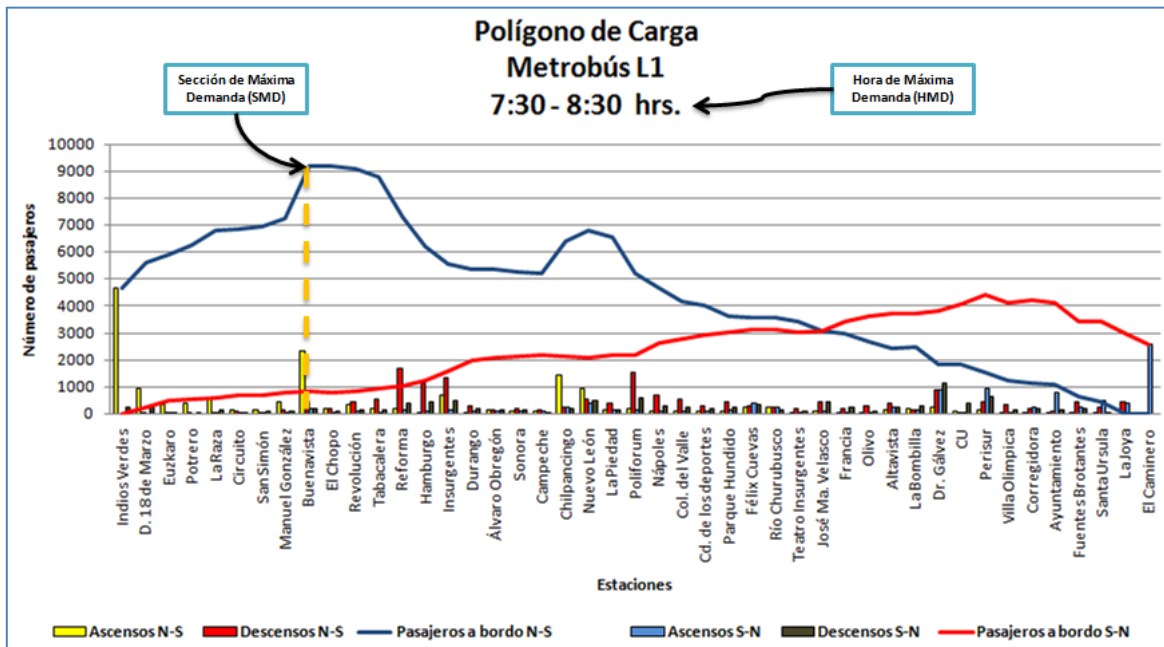


Figura 2.8. Polígono de carga de un día hábil en Metrobús Línea 1, a la HMD y en ambos sentidos del corredor.

Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.

Los polígonos de carga también proporcionan información sobre las distancias promedio de viaje y las paradas que concentran la mayor cantidad de ascensos y descensos donde, de ser necesario, se tendrían que adecuar las instalaciones para evitar la congestión de vehículos y la saturación de espacio en las estaciones. Si se recopila información sobre el número de usuarios que no abordan un vehículo y permanecen en las estaciones en espera de servicio, se obtiene la cantidad de demanda no atendida, la cual sirve como parámetro de ajuste para los resultados del estudio.



Toda esta información es necesaria para dimensionar un corredor así como para la programación del servicio. En resumen, los Estudios de Frecuencias y Cargas ayudan a monitorear la demanda, conocer la variabilidad horaria de la misma, identificar la Hora de Máxima Demanda y estimar los tiempos de ciclo; también son de gran utilidad para la detección de condiciones anormales en el servicio de transporte. Por otro lado, los Estudios de Ascenso y Descenso ayudan a conocer la variabilidad de la demanda en el espacio, permitiendo identificar la Sección y el Volumen de Máxima Demanda así como las estaciones de la ruta con más afluencia de pasajeros.

2.2. La Oferta de Transporte

Ortúzar (2008) menciona que la oferta de transporte es un servicio y no una mercancía, por lo tanto, no puede ser almacenada y para no perder su beneficio tiene que ser consumida cuándo y dónde se produce. Es por esta razón que es necesario conocer y estimar con la mayor precisión posible cuál es el volumen y el comportamiento de la demanda para lograr establecer con suficiente detalle la magnitud y distribución de la oferta. En los Sistema BRT, la oferta de transporte está conformada principalmente por tres elementos:

- **Infraestructura:** Estaciones, terminales y carriles confinados.
- **Vehículos:** Autobuses ligeros, articulados y/o biarticulados.
- **Sistemas de gestión operativa:** Conjunto de normas de operación, procedimientos y especificaciones para garantizar el uso adecuado de la infraestructura y vehículos.

La función de las personas encargadas de la planeación del servicio es asegurar la satisfacción de la demanda estimada combinando, de la manera más adecuada, los elementos de la oferta. Generalmente, las variaciones de la oferta se consiguen mediante cambios en la frecuencia de operación, es decir, variando el número de vehículos que pasan por un punto de la ruta en determinado lapso de tiempo.

Para hacer frente a las *variaciones horarias* de la demanda se fija un horario para efectuar la comparación y estimación del equilibrio entre la oferta y la demanda de transporte, lo más adecuado es hacerlo para la HMD. Después se realizan los cambios más convenientes para los otros horarios, generalmente, desincorporando vehículos de la operación en horas valle y reincorporándolos en horas pico.



Por otro lado, es mucho más complejo hacer frente a las *variaciones espaciales* en la ruta, lo más conveniente es recurrir a prácticas operativas que permitan optimizar y coordinar los elementos de la oferta de transporte de tal manera que se logre un adecuado equilibrio con la demanda. Dichas prácticas están enfocadas en hacer más eficiente la gestión del corredor y de los vehículos del sistema.

2.2.1. Gestión del servicio

Muchas personas se cuestionan el porqué Metrobús tiene más de una ruta sobre el mismo corredor de transporte (**figura 2.9**), en ocasiones sugieren que el servicio debería de ser como el del Metro, es decir, de terminal a terminal. La diferencia estriba en el hecho de que Metrobús es un sistema que no cuenta con subsidios gubernamentales, como es el caso del Metro, por lo que los ingresos del sistema dependen principalmente de la tarifa que pagan los usuarios con la cual se deben cubrir todos los costos que surjan por brindar el servicio, generar utilidades y crear fondos para hacer frente a contingencias o invertir en futuros proyectos.

Figura 2.9. Rutas de servicio en la Línea 1 de Metrobús

Fuente: www.metrobus.df.gob.mx



Para evitar que la tarifa del sistema se incremente, Metrobús tiene que buscar la forma de cómo reducir sus costos sin olvidar que el servicio debe satisfacer las necesidades de viaje de sus usuarios. Por lo tanto, lo recomendable es adecuar la oferta a la demanda de transporte lo más que se pueda para evitar caer en costos innecesarios. Una de las formas de lograr lo anterior es mediante la diversificación de un corredor o línea de transporte en rutas, las cuales se deberán ajustar lo más preciso posible a la demanda de transporte para poder así disponer de una cantidad mayor de rutas donde exista una mayor concentración de usuarios. Es



una forma muy creativa de hacer variar la frecuencia de operación en el espacio, ya que dicha frecuencia en determinado punto o sección del corredor dependerá del número de rutas que pasen por ahí.

A continuación se describirá la forma en cómo se determinan tales rutas, con lo cual se podrá comprender con mayor detalle las decisiones tomadas por Metrobús.

2.2.1.1. Servicios directos de terminal a terminal

Para el diseño de un sistema de transporte con un servicio de terminal a terminal, se analiza el Polígono de Carga correspondiente a la HMD con el fin de poder identificar la Sección y el Volumen Horario de Máxima Demanda (SMD y VHMD), después se calcula y aplica a toda la ruta la cantidad de oferta necesaria para satisfacer dicho volumen. Por ejemplo, si el VHMD es de 9,200 pphs y se recomienda una capacidad promedio de 144 personas por vehículo articulado, se requiere entonces de una frecuencia de 64 vehículos por hora. Ahora bien, si el tiempo de ciclo en dicha ruta es de 165 minutos, se deberá contar con una flota total en operación de 176 vehículos.

La ventaja principal de este tipo de servicio radica en su facilidad de cálculo, la disponibilidad de un mayor número de vehículos en el sistema y el hecho de evitar transbordos lo que, según la percepción de los usuarios, ahorrará tiempo a los pasajeros por no tener que cambiarse de vehículo. Sin embargo, con un volumen muy alto de vehículos en el sistema se corre el riesgo de congestionar el carril confinado y, por lo tanto, se reducirían las velocidades promedio de operación con lo que aumentarían los tiempos de viaje.

Si observamos el polígono de carga podremos notar que la demanda de pasajeros cambia significativamente a lo largo del trayecto. Puesto que cada uno de los vehículos debe ser usado en todo el corredor habrá tramos del mismo donde existirá sobreoferta de transporte, ya que los vehículos operarán a una capacidad más baja de lo diseñado, tal y como se muestra en la **figura 2.10**. Un menor número de pasajeros transportados por vehículo tenderá a incrementar los costos de operación del sistema y, por consiguiente, provocará el aumento en la tarifa que paga el usuario.

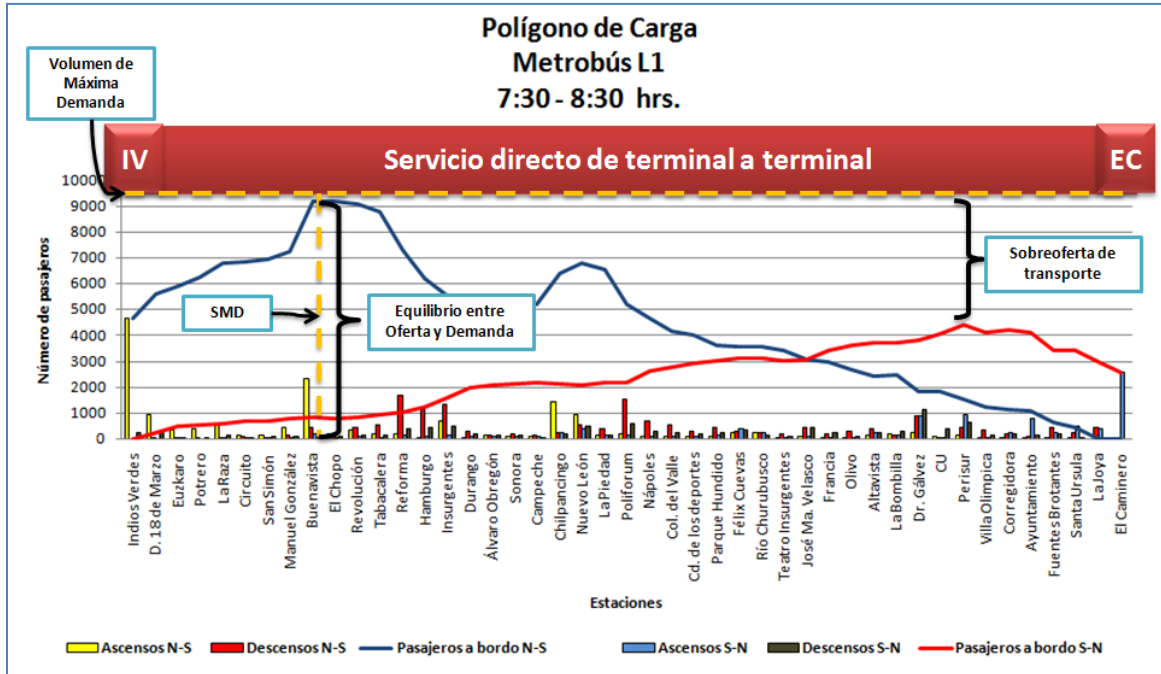


Figura 2.10. Sobreoferta de transporte en servicios directos de terminal a terminal.

Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.

Los sistemas BRT a diferencia de los sistemas de transporte como el Metro, tienen la ventaja de no utilizar infraestructura guiada como rieles o cables por lo que los autobuses pueden cambiar de carril y dirección fácilmente. Dicha flexibilidad de los autobuses en los Sistemas BRT, permite diseñar rutas y servicios acorde al comportamiento y necesidades de los usuarios.

2.2.1.2. Servicio de rutas en un mismo corredor de transporte

Según Wright & Hook (2007) al contar con un servicio de rutas dentro de un mismo corredor de transporte es posible ajustar el servicio para que se atienda mejor la demanda. Lo que se busca es proveer un servicio con frecuencias de operación variables a lo largo del corredor acorde al comportamiento de la demanda. Por ejemplo, se puede ofrecer mayor frecuencia de operación en la sección del corredor con mayor afluencia de pasajeros, debido a que en vez de operar una ruta a lo largo de todo el corredor el servicio puede enfocarse principalmente en las áreas de mayor demanda.

En comparación con los servicios directos de terminal a terminal, los servicios de rutas permiten disminuir la sobreoferta de transporte en los puntos del corredor donde ésta se presenta, por lo que el número de vehículos necesarios para brindar el servicio se reduce al igual que los costos de operación.



Para poder determinar las rutas que darán servicio en el corredor, primero es necesario analizar el polígono de carga en busca de los **puntos de quiebre**, es decir, las estaciones o puntos en los que se presenta la mayor cantidad de ascensos y descensos de pasajeros, los cuales sirven como referencia inicial para el establecimiento de terminales intermedias donde podrían comenzar o terminar las rutas, respectivamente. La **figura 2.11** muestra los puntos de quiebre de la Línea 1 de Metrobús.

Es importante recordar que la Línea 1 se formó por la unión de dos corredores: el CTPP Insurgentes (*Indios Verdes - Dr. Gálvez*) y el CTPP Insurgentes Sur (*Dr. Gálvez – El Caminero*), por lo que la estación de unión, “*Dr. Gálvez*”, es la primer estación del corredor que podría servir como terminal intermedia (**ver figura 2.12**).

Ahora bien, una forma de adecuar la oferta a la demanda y mitigar la sobreoferta de transporte presente en los servicios directos, se logra mediante la identificación de los picos de demanda o puntos de mayor volumen de pasajeros, los cuales se proyectan sobre el polígono de carga para definir las áreas de la gráfica donde es posible reducir la cantidad de oferta. Los puntos de intersección entre dichas áreas y el polígono de carga, proporcionan una segunda aproximación de los puntos del corredor que servirán como terminales intermedias (**figura 2.13**).

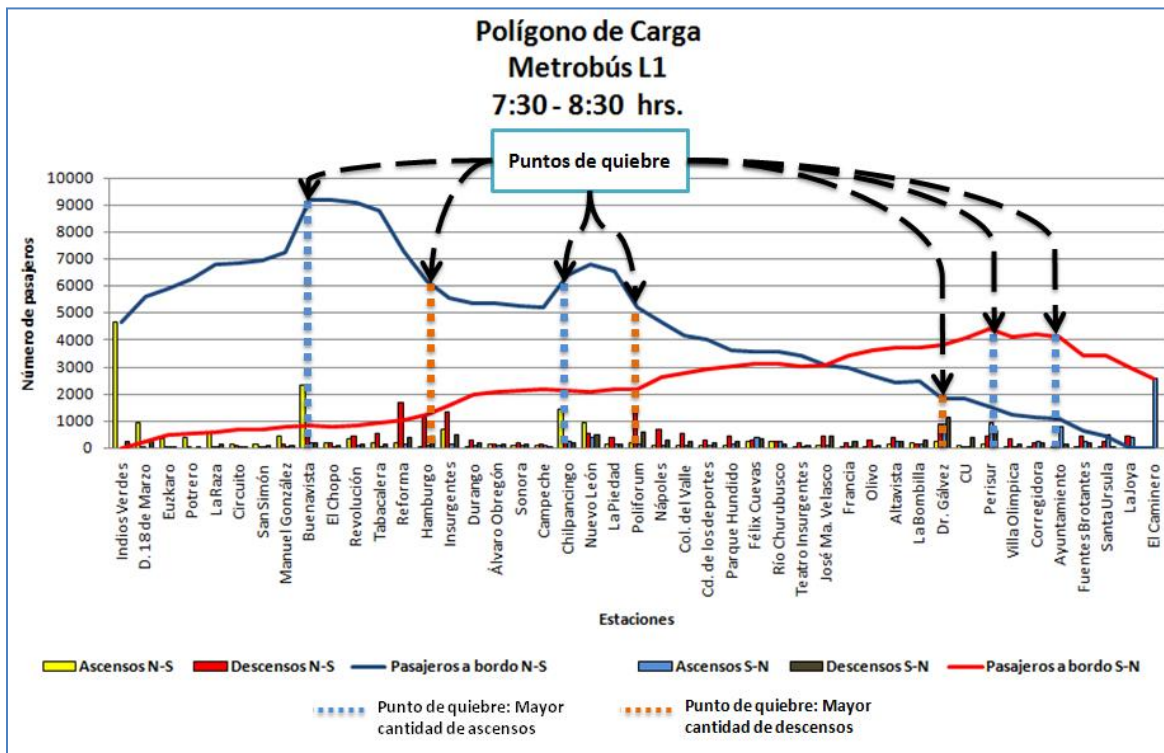


Figura 2.11. Puntos de quiebre en la Línea 1 de Metrobús. Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.

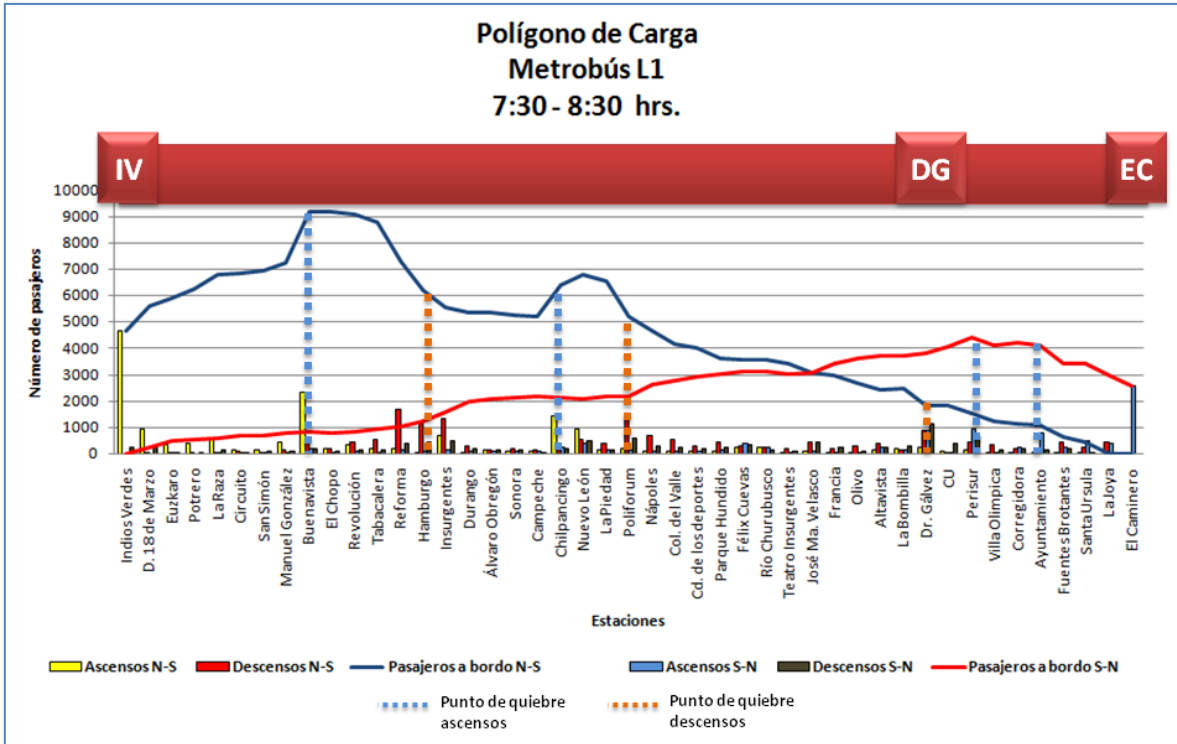


Figura 2.12. Estación Dr. Gálvez: punto de unión entre los CTPP Insurgentes e Insurgentes Sur y primer terminal intermedia de la Línea 1. Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.

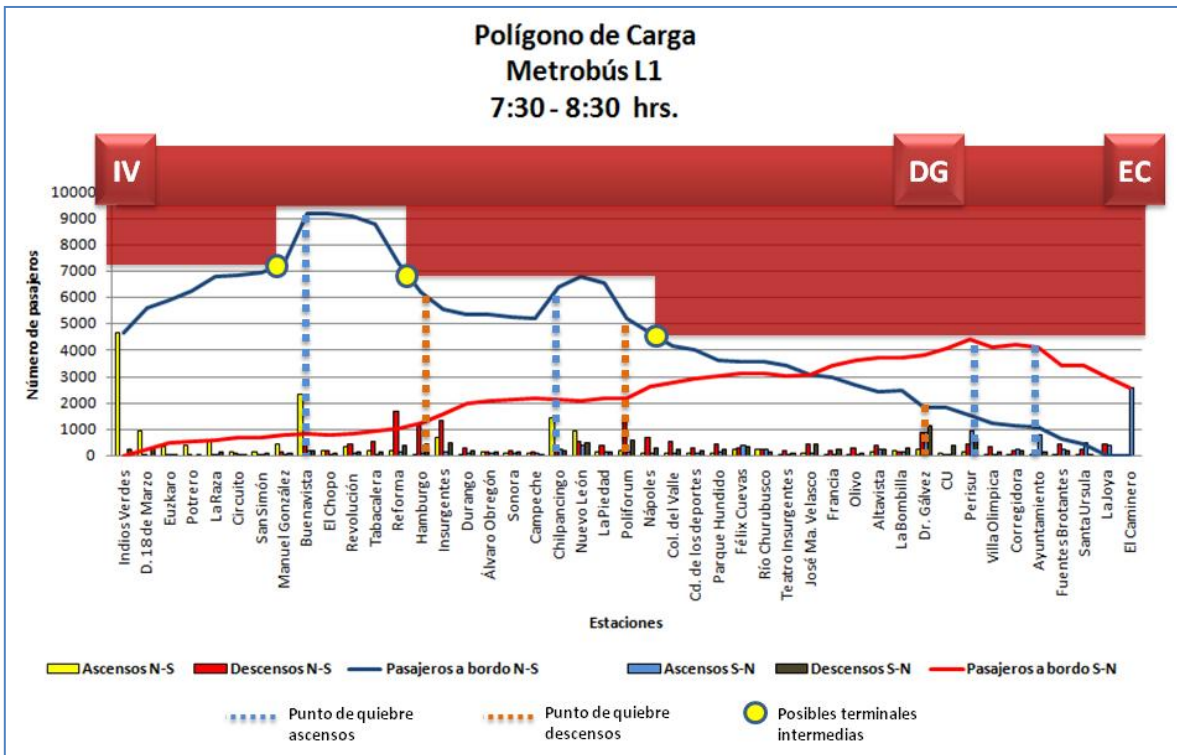


Figura 2.13. Identificación de áreas de mitigación de sobreoferta y posibles terminales intermedias. Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.



Los puntos identificados como posibles terminales son, *teóricamente*, los puntos más viables para la creación de rutas, pero es importante tener en cuenta que la factibilidad de una ruta depende principalmente de las **características físicas de la vialidad** donde se aloja el corredor, específicamente, de aquellos puntos o lugares a lo largo de la vialidad donde se facilite **el giro o retorno** de las unidades.

Se recomienda que el ancho de la vialidad sea lo suficientemente amplio para que los vehículos cuenten con suficiente espacio para dar un giro de 180° o vuelta en “U” de forma fácil y segura (**ver figura 2.14**). Si esto no es del todo posible, se puede recurrir a alternativas como el uso de estructuras elevadas o salir brevemente del corredor para dar vuelta en calles aledañas e incorporarse de nuevo en el sentido contrario, tal como se muestra en la **figura 2.15**.

En el caso de que las unidades salgan del carril exclusivo o del corredor y se mezclen con el tráfico para dar vuelta, se corre el riesgo de que se presenten demoras o accidentes a causa de la congestión e interacción con los demás vehículos, es por ello que una vez identificadas las terminales intermedias se deberán tomar las medidas necesarias para facilitar las maniobras y evitar tales sucesos.

El Sistema Metrobús considera dos tipos de retornos para sus corredores, los *retornos naturales para cierres de circuito* y los *retornos para afrontar recortes por contingencia*, los cuales define de la siguiente manera:

- **Retornos naturales para cierres de circuito:** Son retornos que se han preparado para poder hacer los retornos con ayuda de fase semafórica y nulo apoyo vial por elementos de tránsito. Regularmente son puntos de control de las rutas.
- **Retornos para afrontar recortes por contingencia:** Son aquellos que se utilizan de forma esporádica y se usan principalmente cuando la continuidad del libre tránsito en el carril confinado se ve afectada por una situación fortuita, requieren de apoyo vial ya que regularmente se trata de vueltas en “U” o gazas. Los retornos naturales también pueden ser utilizados como estos segundos.

La **figura 2.16** muestra la ubicación de los retornos naturales a lo largo de la Línea 1 de Metrobús.



Figura 2.14. Radio mínimo de giro para permitir que un vehículo articulado cambie de de sentido con seguridad.

Fuente: Wright & Hook (2007).



Figura 2.15. Arreglos alternos de retornos en MB usando: Estructuras elevadas (arriba) y calles aledañas (abajo).

Fuente: Elaboración propia con imágenes de Google Earth.



Figura 2.16. Retornos naturales sobre el corredor Insurgentes de Metrobús

Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.

Es posible que los puntos de quiebre y los puntos de intersección de los picos de demanda con el polígono de carga no coincidan con los puntos físicos de retorno sobre el corredor, pero, es el análisis completo y detallado de toda esta información lo que proporciona a las personas encargadas del diseño de la operación las herramientas necesarias para tomar las decisiones más adecuadas sobre el establecimiento final de las terminales intermedias.

La **figura 2.17** muestra el arreglo final de las terminales intermedias que mejor se ajustan a la demanda de transporte en el Corredor Insurgentes o Línea 1 de Metrobús, las cuales son: *Buenavista (BV)*, *Glorieta de Insurgentes (GI)*, *Colonia del Valle (CV)* y *Doctor Gálvez (DG)*.

De esta manera es como se generan las condiciones necesarias para hacer variar la frecuencia de operación en el espacio ya que el corredor completo se puede dividir en tramos o segmentos, cada uno de los cuales tendrá asignado un determinado volumen de demanda, tal como se muestra en la **figura 2.18**.

El paso siguiente es determinar la mejor combinación de rutas que permita satisfacer la demanda en cada uno de los tramos, es decir, el número de rutas (acorde a las costumbres o hábitos de viaje de los usuarios) que al coincidir en los tramos de mayor demanda brinden la cantidad necesaria de oferta.

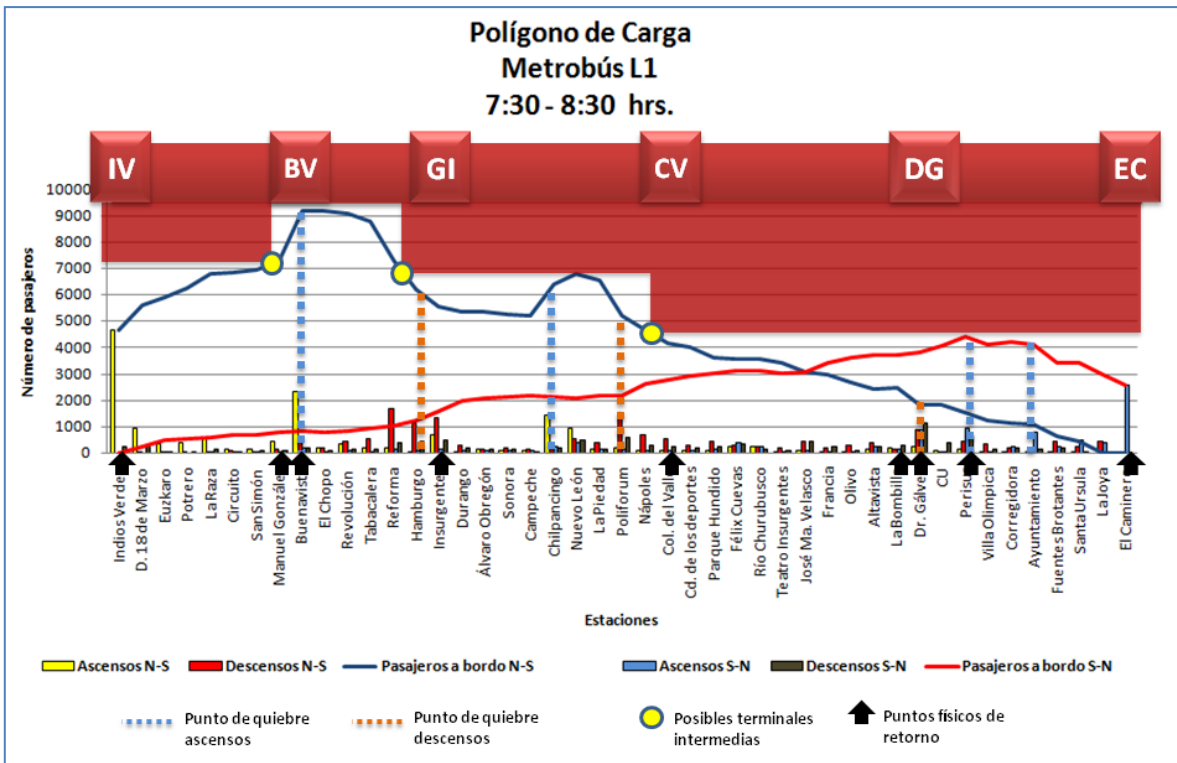


Figura 2.17. Determinación final de terminales intermedias considerando los puntos de retorno.

Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.

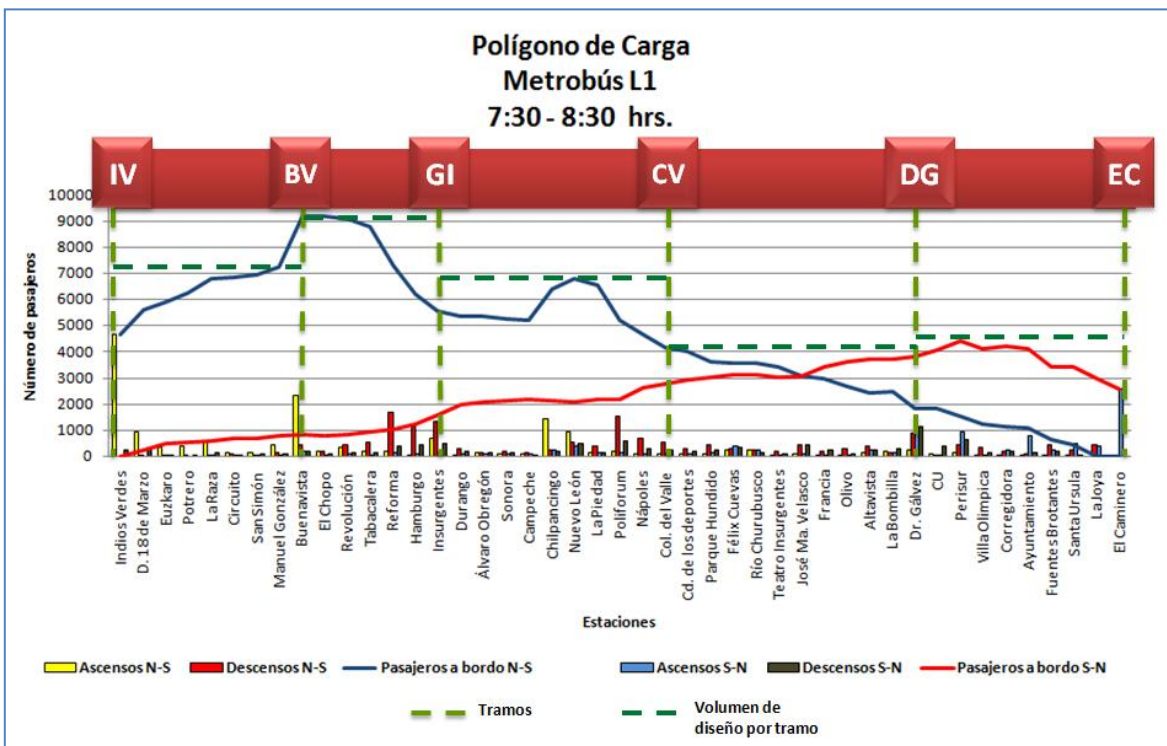


Figura 2.18. Segmentación de la Línea 1 de Metrobús en tramos con diferentes volúmenes de demanda.

Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.



Según la Teoría de Grafos, el número posible de arcos o aristas (m) que unen a cada par de nodos o vértices (n) en un grafo completo, está definido por la siguiente ecuación:

$$m = \frac{n(n-1)}{2} \dots \dots \dots \text{ecuación 2.1}$$

Entonces, si los nodos n representan las terminales del corredor, la cantidad de rutas posibles o arcos m en el sistema son:

$$m = \frac{6(6-1)}{2} = \frac{6(5)}{2} = 15 \text{ rutas}$$

Es decir, con el arreglo obtenido se pueden generar hasta quince rutas diferentes para brindar el servicio de transporte en la Línea 1 de Metrobús, desafortunadamente no todas las rutas serán de utilidad ya que algunas se irán descartando debido a las características físicas de cada uno de los retornos, por ejemplo, en la terminal “Colonia del Valle” sólo es posible hacer retorno en dirección Sur-Norte, por lo que las rutas “Col. del Valle – Dr. Gálvez” y “Col. del Valle – El Caminero” no son posibles.

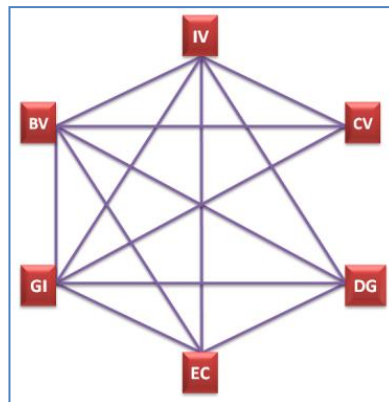


Figura 2.19. Posibles rutas en la Línea 1 de Metrobús

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, restan trece rutas (**figura 2.19**) de las cuales sólo se deben considerar aquellas acorde a las características y comportamiento de viaje de los usuarios, específicamente, a la distancia de viaje. El método más utilizado para conocer los hábitos y deseos de transportación de los usuarios lo constituyen las **Encuestas Origen-Destino**, a través de ellas se interroga a los usuarios sobre algunos tópicos necesarios para el diseño del sistema tales como el origen y el destino de los traslados, el motivo y frecuencia de viaje, la hora del día en que se producen y algunos datos personales del encuestado. En el **Anexo E** se muestran dos ejemplos de los formatos utilizados para dichas encuestas.



Dichos estudios han llevado a Metrobús a definir siete rutas que mejor se ajustan a la demanda de transporte en la Línea 1 las cuales se muestran en la **tabla 2.1**:

Tabla 2.1. Rutas potenciales de servicio en la Línea 1 de Metrobús

Denominación	Ruta
A1	Indios Verdes – Doctor Gálvez
A2	Indios Verdes – Glorieta de Insurgentes
A3	Buenavista – El Caminero
A4	Glorieta de Insurgentes – El Caminero
A5	Glorieta de Insurgentes – Doctor Gálvez
A6	Buenavista – Doctor Gálvez
A7	Indios Verdes – El Caminero

Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.

La **figura 2.20** muestra el arreglo de posibles rutas y los volúmenes de demanda estimados en cada tramo de la Línea 1 de Metrobús, es posible observar que lo que se busca es ofrecer la mayor cantidad de rutas en los tramos de mayor demanda.

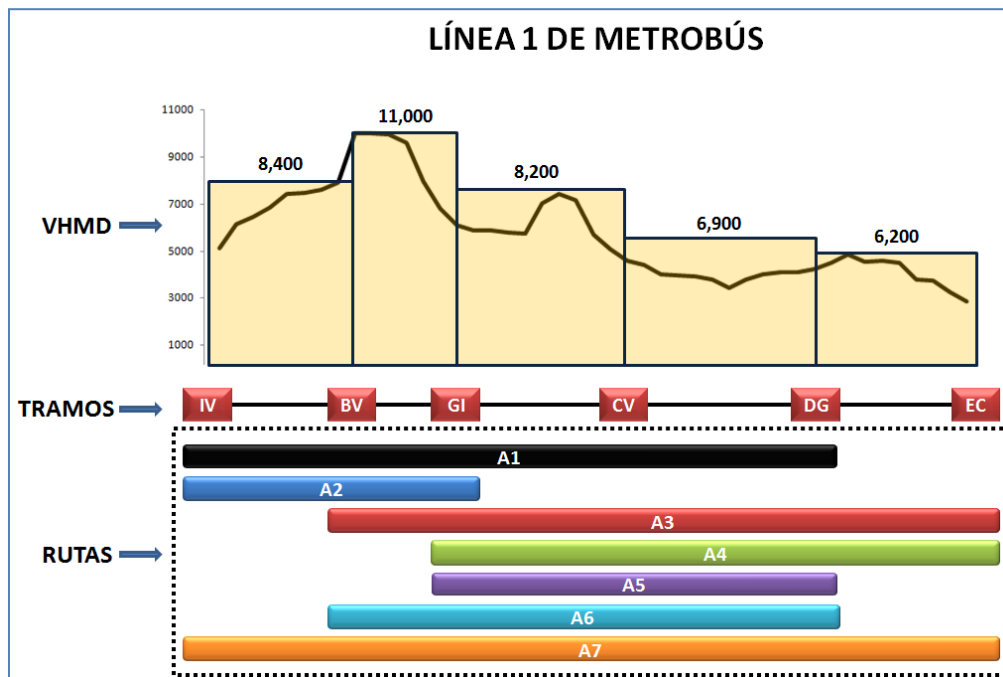


Figura 2.20. Rutas y volúmenes de demanda en tramos de la Línea 1 de Metrobús.

Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.

Lamentablemente este tipo de arreglos tienen las siguientes desventajas:

- Mayor complejidad en la programación, operación y control de los vehículos.



- Frecuencias de servicio más bajas en los tramos de menor demanda.
- Posible congestión de pasajeros y vehículos en las terminales intermedias de la ruta.
- Incomodidad y confusión entre los pasajeros debido a la existencia de transbordos.

2.2.1.3 Transbordos

Los transbordos son comunes cuando se utilizan diferentes modos o líneas de transporte pero no lo son tanto si se presentan en el mismo corredor, dado que en los servicios de rutas ninguna o muy pocas de las unidades ofrecen un servicio de terminal a terminal es posible que algunos pasajeros se cambien de vehículo en algún momento de su viaje. Dicha situación provoca incomodidad y confusión por parte de los usuarios puesto que generalmente prefieren no ser forzados a cambiarse de vehículo ya que los transbordos, por lo general, suponen costos tanto en términos de tiempo como de comodidad.

Es claro que la presencia de transbordos en una misma línea de transporte implica mayores tiempos de espera, Wright & Hook (2007) señalan que los usuarios consideran mucho peor el tiempo de espera que el tiempo de viaje, por lo que la percepción del tiempo de espera en un transbordo puede hacer que el servicio parezca más lento. Los transbordos son considerados como una de las principales razones por las cuales un buen número de usuarios potenciales deciden no utilizar un determinado sistema de transporte; además, es posible que se tengan que hacer adecuaciones a las estaciones de transbordo ya que pueden presentar saturación por todas las personas que deben cambiar de vehículo.

Molinero (2005) menciona que aún cuando es deseable minimizar el número de transbordos, éstos representan una forma de hacer más eficiente y económico un servicio de transporte en comparación con los servicios directos de terminal a terminal, pues cada ruta puede ser diseñada específicamente para cubrir determinadas condiciones de volumen y tipo de demanda.

La planeación y el diseño adecuado de la infraestructura y de las rutas tienen gran impacto tanto en la eficiencia del sistema como en el nivel de servicio que éste proporciona al usuario, es por ello que se debe procurar que los transbordos sean fáciles y rápidos. Contar con señalización clara en estaciones y vehículos, así como el uso de anuncios y mapas, puede contribuir a superar la confusión de los pasajeros y ayudarlos a que aprendan y se acostumbren a utilizar el sistema.



2.2.2. Gestión de la flota vehicular

Una vez que se ha explicado el tipo de servicio que ofrece Metrobús, es importante entender el impacto que tiene el número y la capacidad de los vehículos que utiliza el sistema en los costos, la operación y el nivel de servicio del sistema puesto que los recursos son limitados y se trata del principal elemento de la oferta que, según Molinero (2005), mejor refleja el equilibrio entre la oferta y la demanda de transporte.

De igual forma, Molinero (2005) señala que en caso de contar con más autobuses ($O1$) que los requeridos (O^*) para atender la demanda (D^*), se produce un exceso de oferta y por lo tanto ociosidad o subutilización del equipo lo cual incrementa los costos de operación y se traduce en aumentos a la tarifa que paga el usuario, tal como se muestra en la **figura 2.21**.

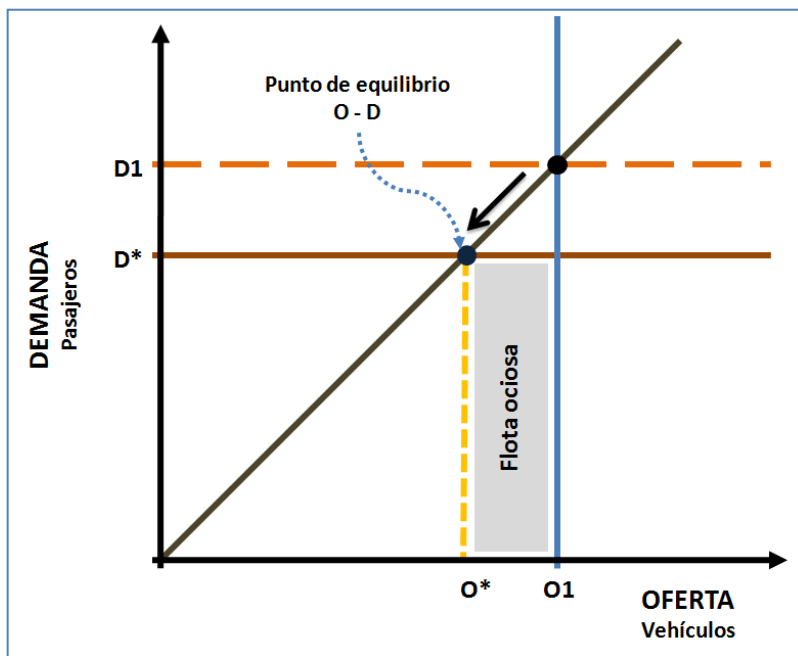


Figura 2.21. Exceso de oferta

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, si se cuenta con un parque vehicular ($O2$) por debajo de los requerimientos reales (O^*), se presentará un bajo nivel de servicio puesto que rápidamente se saturará el sistema y no se podrá atender completamente a la demanda real (D^*), lo cual se traduce en molestias e insatisfacción por parte de los usuarios así como el desgaste y acortamiento de la vida útil del equipo (ver **figura 2.22**).

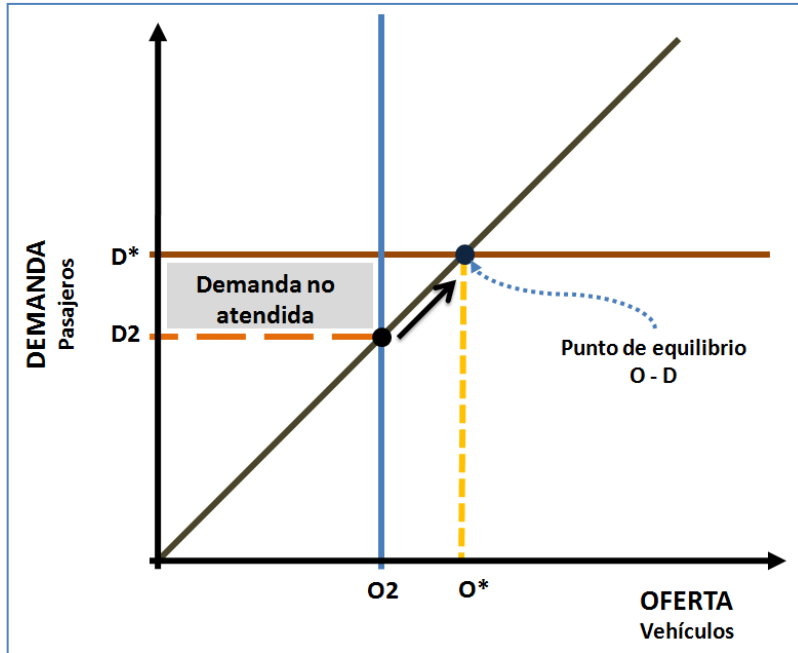


Figura 2.22. Escasez de oferta

Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.1. La capacidad del vehículo

Aunque parezca trivial, es el número de pasajeros que puedan ser transportados en un vehículo lo que determina el tamaño de la flota vehicular, dicho número depende de dos cosas: la capacidad del vehículo y el factor de ocupación.

La **capacidad vehicular** se refiere al *número total* de pasajeros que puede llevar a bordo cada vehículo de transporte, Molinero (2005) resalta que para satisfacer la demanda de viajes de un determinado volumen de pasajeros se puede utilizar una cantidad pequeña de unidades de gran capacidad, o bien, una cantidad mayor de unidades pero de baja capacidad. Se podría decir que el número de pasajeros asignado a cada unidad presenta una relación inversamente proporcional con el tamaño de flota necesario para satisfacer la demanda establecida.

Por ejemplo, para satisfacer una demanda de 850 personas sería necesario utilizar una flota articulada de seis vehículos cada uno con capacidad para 160 pasajeros, mientras que si se utilizaran vehículos biarticulados con capacidad para 240, sólo se requerirá de una flota de cuatro unidades (**ver figura 2.23**).

Ahora bien, Sussman (2000) menciona que la demanda en un sistema de transporte se caracteriza por ser *estocástica*, es decir, puesto que existen factores externos al sistema que modifican y hacen impredecible el comportamiento de los usuarios, se presentarán fluctuaciones aleatorias en los valores estimados de los volúmenes de demanda. Dicha característica provoca que a pesar de que se



tenga identificado el horario de mayor afluencia (HMD) y con ello se pueda determinar un volumen máximo de pasajeros (VHMD) para el diseño operativo, éste no siempre sea el mismo ya que algunas veces dicho volumen podrá ser mayor o menor al estimado, tal y como se muestra en la **figura 2.24**.

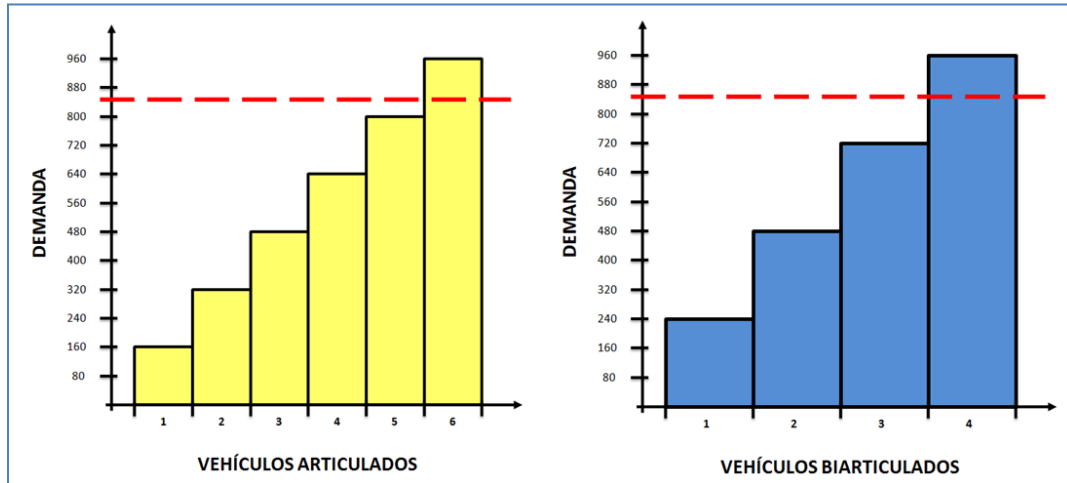
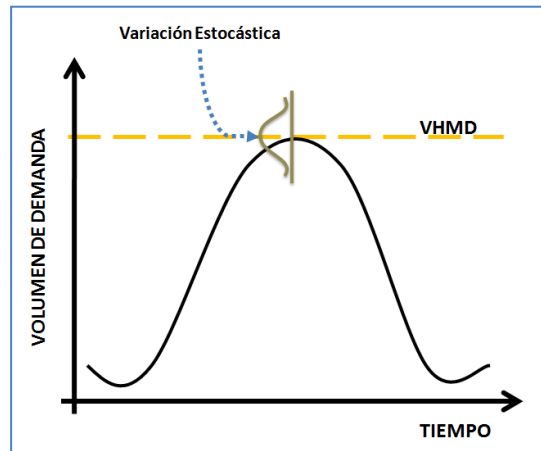


Figura 2.23. Tamaño de flota vehicular según tipo y capacidad del vehículo. Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.24. Variación estocástica del Volumen Horario de Máxima Demanda

Fuente: Elaboración propia.



Para hacer frente a la variación estocástica y posible crecimiento de los volúmenes de demanda, en el cálculo del tamaño de flota se debe dar cierta holgura al sistema evitando que las unidades brinden servicio al máximo de su capacidad. Es por ello que se utiliza el parámetro conocido como **factor de ocupación** el cual se refiere al *porcentaje de la capacidad* al que deben, teóricamente, ocuparse los vehículos, Molinero (2005) recomienda que dicho factor sea como máximo del 90% en la **HMD**. Además de lo anterior, el factor de ocupación permite brindar un mayor nivel de servicio en el sistema puesto que se ofrecerá más espacio para los usuarios en cada unidad, con lo que también se podrá disminuir la fatiga o desgaste acelerado de las unidades.



2.2.2.2. Tipo y tamaño del vehículo

Si el tamaño de la flota necesaria en operación para satisfacer un determinado volumen de usuarios depende del número de pasajeros que puedan ser transportados en un vehículo, y si además existe una amplia variedad de unidades con diferentes capacidades para su uso en Sistemas BRT, entonces ¿qué tipo de vehículo utilizar? ¿qué beneficios y desventajas tanto operativas como financieras se presentan al utilizar un determinado tipo de vehículo en un corredor? ¿por qué algunos sistemas han optado por el uso de vehículos de diferente capacidad?

Suárez (2009) realizó, en su tesis de maestría, una Evaluación Operativo-Financiera de la Línea 2 de Metrobús comparando el uso de diferentes tipos de vehículo (**figura 2.25**) de la cual se pudo generar la **tabla 2.2** con los principales resultados:

Tabla 2.2. Resumen de parámetros operativo-financieros en Metrobús L2 por tipo de flota.

Fuente: Elaboración propia con información de Suárez (2009).

Parámetros	Articulado	Biarticulado
Capacidad vehicular	160 [pas/veh]	240 [pas/veh]
Factor de ocupación	80%	80%
Volumen de Máxima Demanda	4264 [pas/hr/sent]	4264 [pas/hr/sent]
Tamaño total de flota vehicular necesaria	75 [veh]	50 [veh]
Frecuencia de operación en la SMD	33 [veh/hr]	22 [veh/hr]
Frecuencia mínima de operación	16 [veh/hr]	11 [veh/hr]
Intervalo de paso entre vehículos en la SMD	1 min 49 seg	2 min 43 seg
Intervalo máximo de paso	3 min 45 seg	5 min 27 seg
Índice de Pasajeros por Kilómetro	7.55 [pas/km]	10.68 [pas/km]
Kilometraje programado anual	5,378,153 [km]	3,801,257 [km]
Costos de operación por kilómetro	\$ 18.51	\$ 20.53
Costo total anual por kilometraje	\$ 99,549,612	\$ 78,039,806
Costo de adquisición por unidad	\$ 4,317,761	\$ 6,082,350
Inversión total por adquisición de flota	\$ 323,832,075	\$ 304,117,500
Total de egresos anuales	\$ 183,595,025	\$ 158,395,891
Tarifa técnica	\$ 4.97	\$ 4.28
Utilidad anual	\$ 1,233,619	\$ 26,432,753
Capacidad de respuesta ante contingencias	Mayor	Menor
Rapidez de saturación por vehículo	Mayor	Menor
Emisiones contaminantes por pasajero transportado	Mayor	Menor

Figura 2.25. Vehículos utilizados en la Línea 1 de Metrobús Ciudad de México

Fuente: Elaboración propia con imágenes de Metrobús.



Del análisis de la **tabla 2.2** es posible hacer las siguientes observaciones:

- Al transportar menos pasajeros por vehículo, se requiere de una cantidad mayor de unidades en operación para dar servicio a un determinado volumen de demanda por lo que se podrá brindar un servicio más frecuente y se reducirá el intervalo de paso, es decir, el tiempo que esperan los usuarios por la llegada de un vehículo a la estación. Desafortunadamente, el tamaño de la inversión por adquirir la flota completa es más alto que el que se presenta si se utilizaran vehículos de mayor capacidad.
- Aunque el intervalo de paso sea menor no significa que el tiempo que esperan los usuarios para abordar un vehículo también lo sea, ya que un vehículo de baja capacidad tiende a llenarse con mayor rapidez por lo que es posible que algún usuario tenga que dejar pasar una o varias unidades antes de poder abordar.
- A pesar de que los costos de operación por kilómetro recorrido para un vehículo de baja capacidad son menores, al año los costos totales son más altos puesto que se programa una cantidad mayor de kilómetros.
- Dado que para los vehículos de mayor capacidad se programa una cantidad anual menor de kilómetros, la cantidad de emisiones contaminantes liberadas a la atmósfera también serán menores.
- Puesto que se opera un menor número de unidades, el uso de vehículos de mayor capacidad permite reducir los costos que se generan por brindar el servicio, por lo tanto, se logra que la tarifa técnica sea menor y la rentabilidad del sistema sea mayor.
- Por su tamaño, las unidades de alta capacidad generalmente demandan mayor espacio por lo que para poder utilizarlas se requiere contar con



infraestructura específica y personal debidamente capacitado. Además, al necesitar una cantidad menor de unidades la capacidad de respuesta del sistema ante contingencias es más reducida que en el caso de utilizar vehículos de menor capacidad.

Molinero (2005) señala que los usuarios siempre estarán interesados en contar con un servicio de *intervalos cortos* para minimizar el tiempo que esperan en las estaciones o paradas. Sin embargo, para un volumen de pasajeros dado por hora, resulta más barato operar un número más pequeño de vehículos grandes que un número mayor de vehículos pequeños por lo que el transportista está interesado en operar con vehículos de mayor capacidad a *intervalos más grandes*. Dicha situación provoca que la decisión sobre el tipo de flota a utilizar sea más compleja ya que se debe garantizar un servicio de calidad que satisfaga las necesidades de viaje de los usuarios y que al mismo tiempo minimice los costos de operación.

Habitualmente se prefiere la utilización de un solo tipo de vehículo para dar servicio en un corredor de transporte desechando la opción de operar vehículos de diferentes tamaños (**flota vehicular mixta**), según Wright & Hook (2007) la falta de homogeneidad en las unidades puede considerarse como una desventaja debido a las siguientes razones:

1. Comprar distintos tipos de vehículos tenderá a reducir las economías de escala en su adquisición y llevará a tener precios de unidades generalmente más elevados.
2. Los distintos tipos de vehículos requerirán necesidades de mantenimiento diferentes y refacciones distintas.
3. Al utilizar diferentes tipos de vehículo se reduce la flexibilidad operativa del sistema, especialmente cuando los daños u otros requerimientos de mantenimiento pueden ocasionar que algunos vehículos estén fuera de operación.
4. Los vehículos de diferente tamaño provocan que las estaciones también deban ser distintas, lo que puede resultar en la posible incapacidad de operar cierto tipo de vehículos en rutas que no cuenten con la infraestructura adecuada.

Desafortunadamente no siempre se puede optar por un solo tipo de flota vehicular, el crecimiento acelerado de la demanda genera la necesidad de adquirir y operar una mayor cantidad de unidades en una línea de transporte corriendo el riesgo de congestionar los carriles confinados del sistema, es por ello que los encargados de



la operación deben considerar la sustitución de su flota por vehículos de mayor capacidad.

Dado que se requiere de una inversión considerable para el cambio de las unidades y a la posibilidad de que algunos vehículos aún no hayan agotado su vida útil, el reemplazo de la flota tendrá que ser gradual por lo que en esa transición se brindará un servicio con unidades de diferente capacidad (flota vehicular mixta), situación que enfrenta actualmente la Línea 1 de Metrobús al disponer de 140 vehículos articulados y 27 biarticulados.

En un intento de aportar información que facilite la toma de decisiones sobre el tipo de flota a utilizar en un corredor de transporte con un carril confinado, en la **figura 2.26** se muestran los rangos de factibilidad para flotas articuladas, biarticuladas y mixtas considerando un intervalo máximo de operación de cuatro minutos (15 veh/hr) y un intervalo mínimo de 0.8333 minutos (72 veh/hr).

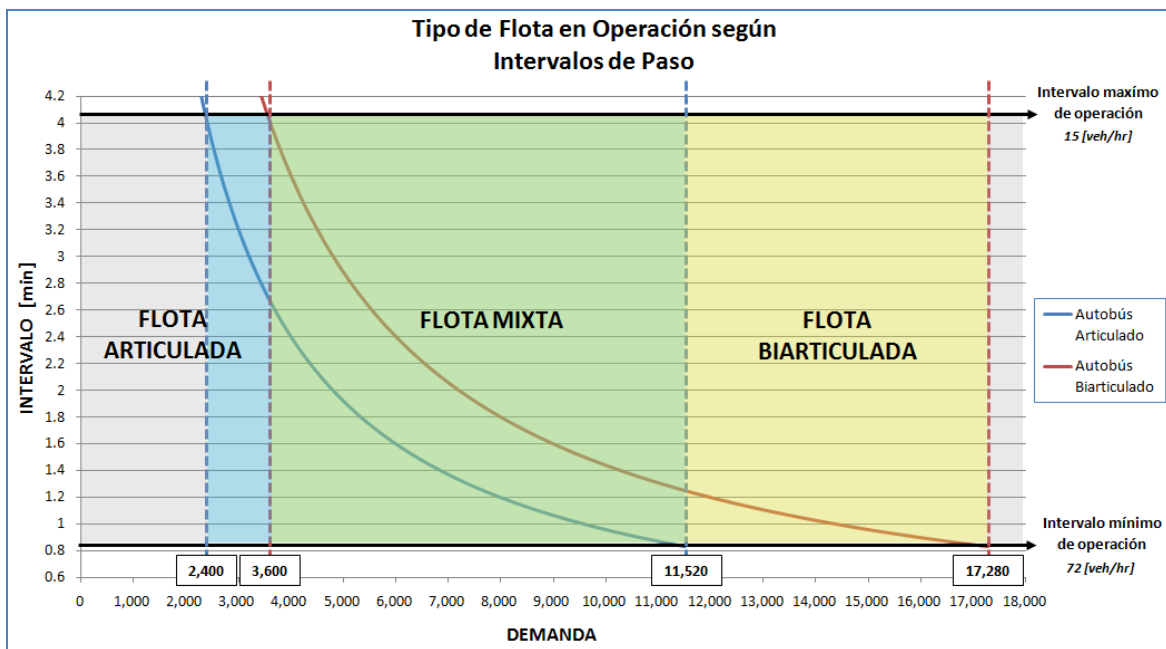


Figura 2.26. Rangos de factibilidad para los diversos tipos de flota vehicular en un corredor de transporte según los intervalos mínimo y máximo de operación. Fuente: Elaboración propia.

Es posible observar que la flota articulada es justificable si la demanda se encuentra entre los 2,400 y los 11,520 pphs (pasajeros por hora por sentido), mientras que la flota biarticulada es valida si la demanda oscila entre los 3,600 y los 17,280 pphs. Por lo tanto, si la demanda en un corredor de transporte es mayor a 3,600 pphs pero menor a 11,520 pphs es factible la utilización de flota vehicular mixta.



Capítulo 3

Equilibrio Oferta – Demanda de Transporte

Encontrar el balance adecuado entre la oferta y la demanda en cualquier sistema de transporte no es una tarea sencilla, pues la demanda es un factor que no se mantiene constante en el tiempo o en el espacio. Aunado a esto, el Sistema Metrobús cuenta con una flota vehicular mixta con restricciones de ocupación y utiliza un servicio de múltiples rutas dentro de un mismo corredor.

Teóricamente, el mejor apego entre los esquemas de oferta y demanda de transporte ocurre cuando a todo cambio en la demanda sucede un cambio respectivo en la oferta, Alceda (1997) señala que no es sencillo establecer el grado de apego aceptable de la oferta con respecto a una demanda debido a la manera tan diversificada como se manifiesta esta última, por lo tanto, para poder intentar establecer un equilibrio adecuado entre la oferta y la demanda lo primero que se debe realizar es un análisis detallado de la variabilidad de la demanda buscando identificar los siguientes aspectos:

- Principales días de operación (*hábil, sábado, domingo y días especiales*).
- Comportamiento de la demanda a lo largo del respectivo día de operación identificando *horas pico* y *horas valle*.
- Para la *Hora de Máxima Demanda (HMD)* identificar la Sección (SMD) y el *Volumen Horario de Máxima Demanda (VHMD)*. Si se ocupa un servicio de rutas dentro de un mismo corredor, como es el caso de Metrobús, se debe identificar cada uno de los tramos que integran dicho corredor y definir su HMD y VHMD.

La **figura 3.1** muestra un esquema general del análisis de la variabilidad de la demanda y los principales aspectos que deben considerarse para definir la oferta.

Una vez identificados los principales días de operación, las horas pico, horas valle y los respectivos volúmenes de demanda, es posible ajustar la oferta a la demanda de transporte mediante los dos procesos siguientes (**ver figura 3.2**):

- **El dimensionamiento del corredor:** Es el proceso mediante el cual es posible determinar el número de vehículos y rutas que se requieren para



satisfacer una demanda dada en un corredor o línea de transporte en la HMD.

- Programación del servicio:** Se refiere al proceso por el cual es posible establecer el orden de salida en terminales de cada vehículo en el sistema así como la descripción detallada de su jornada de trabajo diaria.

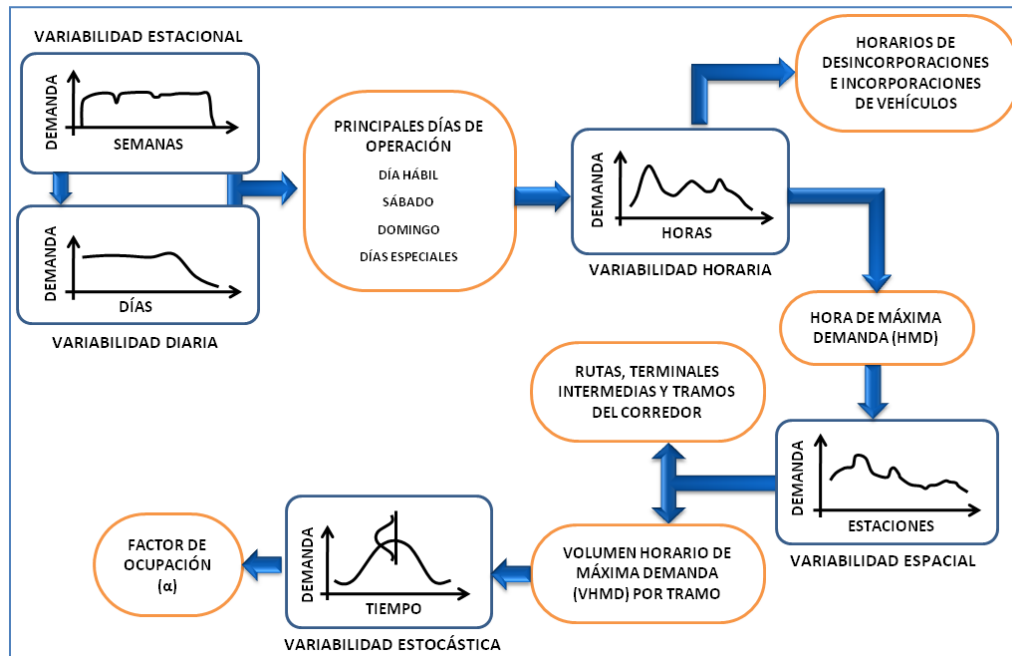


Figura 3.1. Principales aspectos que se deben considerar para determinar la oferta de transporte a partir del análisis de la variabilidad de la demanda. Fuente: Elaboración propia.

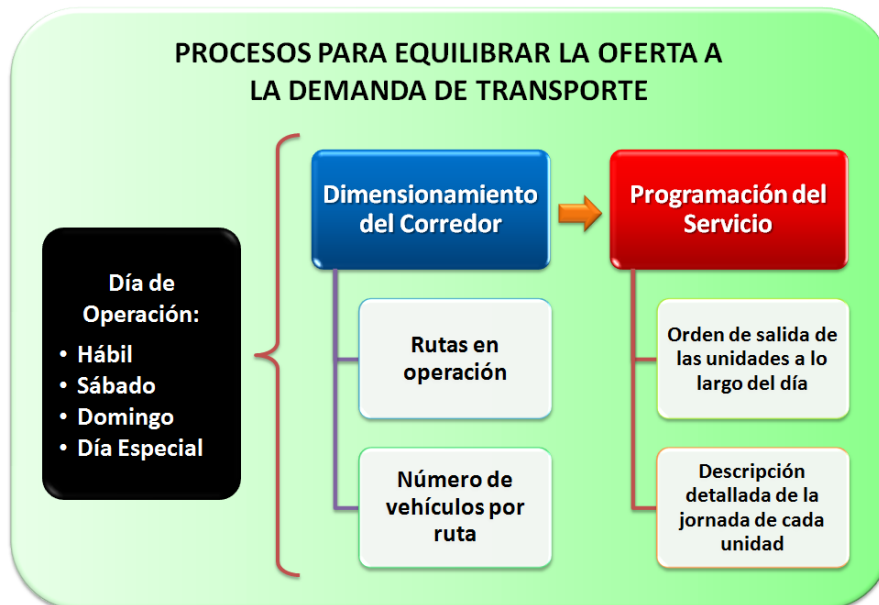


Figura 3.2. Principales procesos para la determinación de la oferta de transporte. Fuente: Elaboración propia.



3.1. Dimensionamiento de rutas de transporte

Molineró (2005) menciona que una parte esencial dentro de la planeación de la operación del transporte público es el *dimensionamiento de rutas*, cuyo objetivo es lograr un equilibrio entre la oferta de transporte y la demanda de usuarios.

El dimensionamiento de rutas consiste en la determinación de las rutas y el número de vehículos que se requieren en el sistema para satisfacer la demanda de usuarios en la HMD presente en un día típico de operación (día hábil, sábado, domingo o día especial) buscando garantizar la calidad y rentabilidad del servicio.

Para poder comprender el procedimiento de dimensionamiento de rutas de transporte, primero es necesario conocer los elementos o parámetros básicos que lo conforman. Dichos parámetros se pueden clasificar, según sus características, como *Parámetros constantes* y *Parámetros operativos*, a continuación se explica cada uno de estos grupos haciendo uso de conceptos descritos por Molineró (2005) y Alceda (1997).

3.1.1. Parámetros constantes

Se refieren a condiciones propias del corredor de transporte y del comportamiento de la demanda por lo que no dependen del tipo de vehículo a utilizar, los cuales son:

- **Longitud de la ruta (L):** Se refiere a la distancia total de la ruta, se mide en metros o en kilómetros y debe corresponder con la suma de las distancias entre paradas y retornos es terminales. Para propósitos de la presente tesis, se considerará dicha distancia en ambas direcciones (ida y vuelta).
- **Hora de máxima demanda (HMD):** Es el período del día correspondiente a la hora de mayor afluencia de pasaje en los servicios ordinarios de transporte.
- **Volumen de pasajeros (p):** Es el número de usuarios que pasan por un punto fijo de un corredor de transporte durante una hora u otro periodo específico de tiempo. Este parámetro varía conforme el recorrido de la ruta, hora del día, día de la semana y época del año.



- **Sección de máxima demanda (SMD):** Es la sección o punto dentro del corredor donde se registra el volumen máximo de pasajeros a bordo de las unidades en la HMD.
- **Volumen horario de máxima demanda (VHMD):** Es el volumen de pasajeros que se presenta en la SMD, es decir, es el volumen más alto de usuarios presentes en cualquier parada o sección a lo largo de una línea o corredor de transporte.
- **Volumen de diseño (P):** Se refiere al volumen máximo permisible de pasajeros que pueden ser atendidos por una ruta de transporte en la HMD. Usualmente en un servicio de terminal a terminal, dicho parámetro debe ser mayor o igual al VHMD.
- **Tiempo de recorrido (t_r):** Es el tiempo que tarda un vehículo en trasladarse por la ruta desde su salida en una terminal “A” hasta su llegada a la terminal opuesta “B”, usualmente se expresa en minutos.
- **Tiempo de retorno o permanencia en terminales (t_t):** Se trata del tiempo, medido en minutos, que pasan los vehículos de transporte en los puntos de terminal. Su propósito es contar con tiempo para dar vuelta al vehículo, regularizar los horarios de salida, permitir la limpieza de las unidades, dar un breve descanso a los operadores y, si es el caso, efectuar pequeñas reparaciones a las unidades.
- **Tiempo de ciclo o vuelta (t_c):** Es el tiempo total de viaje redondo para una unidad de transporte, esto es, el tiempo que tarda en volver a pasar la misma unidad por un punto determinado de una ruta, el cual se expresa normalmente en minutos. Este tiempo está dado por la siguiente expresión:

$$t_c = t_{rAB} + t_{tB} + t_{rBA} + t_{tA} \dots \dots \dots \text{ (ecuación 3.1)}$$

donde:

t_c = Tiempo de ciclo [min]

t_{rAB} = Tiempo de recorrido de la terminal “A” a la terminal “B” [min]

t_{tB} = Tiempo de terminal en “B” [min]

t_{rBA} = Tiempo de recorrido de la terminal “B” a la terminal “A” [min]

t_{tA} = Tiempo de terminal en “A” [min]



- **Tiempos muertos (t_m):** Son aquellos tiempos que ocupan los vehículos de transporte para trasladarse entre los lugares de pernocta y la terminal. Al ser un traslado en donde no se brinda servicio a los usuarios, estos tiempos no generan ningún valor para las empresas operadoras. Deben ser medidos directamente ya que no existe forma alguna de hacer generalizaciones.
- **Velocidad de operación (V_o):** Es la velocidad promedio que adoptan los vehículos a lo largo de su recorrido. Se calcula como la relación entre la longitud (en kilómetros) de la ruta en un sentido (l) y el tiempo que tarda la unidad en recorrer dicha longitud (en horas o minutos), tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$V_o = \frac{60 * l}{t_r} \dots \dots \dots \text{ (ecuación 3.2)}$$

donde:

V_o = Velocidad de operación [km/h]
 l = Longitud de la ruta en un sentido [km]
 t_r = Tiempo de recorrido [min]

- **Velocidad comercial (V_c):** Es la velocidad promedio que una unidad de transporte mantiene para dar una vuelta completa, se calcula de la siguiente manera:

$$V_c = \frac{60 * L}{t_c} \dots \dots \dots \text{ (ecuación 3.3)}$$

donde:

V_c = Velocidad comercial [km/h]
 L = Longitud de la ruta [km]
 t_c = Tiempo de ciclo [min]

3.1.2. Parámetros operativos

Estos parámetros dependen del tipo de vehículo a utilizar y se emplean para llevar a cabo la elaboración del esquema de operación o dimensionamiento en una ruta de transporte, los cuales son:

- **Capacidad vehicular (C_v):** Se refiere al número de pasajeros que puede llevar normalmente a bordo cada unidad según su tipo (articulada,



biarticulada, etc.), se expresa en pasajeros por vehículo [pas/veh]. Se calcula según la capacidad de carga operacional del vehículo y la distribución del espacio interior del mismo, sumando el número de asientos más los espacios de pie.

- **Factor de ocupación (α):** Es el cociente que se obtiene al dividir el número de pasajeros a bordo de un vehículo entre la capacidad del mismo. Puede expresarse como porcentaje o en decimales e indica la capacidad utilizada de la unidad al momento de ser observada. La razón de dicho parámetro resulta de la necesidad de dar holgura al sistema para hacer frente al *comportamiento estocástico de la demanda*.

Según Molinero (2005) el valor de este factor influye en las siguientes características de la operación del transporte público:

- *El nivel de comodidad del usuario:* Un valor alto de α trae como resultado un número considerable de usuarios de pie y la sobrecarga del vehículo.
- *Costo de operación:* El uso de un valor alto de α implica un menor número de unidades para transportar un número dado de usuarios que en el caso de utilizar un valor bajo de α . A su vez, una menor cantidad de unidades operando da como resultado una menor frecuencia y con ello, mayores tiempos de espera al usuario. Finalmente, un valor alto de α resulta en un mayor tiempo de ascenso/descenso con lo cual se reduce la velocidad de operación y se afecta directamente a los costos de operación.

La selección de un valor de α debe ser realizada de tal forma que se logre un equilibrio entre los factores antes mencionados ya que, de no hacerlo, puede provocar un bajo nivel de servicio. Molinero (2005) recomienda un valor máximo de α de 0.9 el cual debe ser utilizado para la HMD.

- **Frecuencia de operación (f):** Es el número de unidades que pasan por un punto específico de una ruta en un lapso de tiempo determinado, generalmente, una hora. La frecuencia está asociada con la demanda de servicio y define el ritmo con el cual trabajan los vehículos de transporte para satisfacerla. Se obtiene dividiendo el volumen de diseño de la ruta (P) entre el número promedio de pasajeros asignados a cada vehículo a través



de la selección de un valor para el factor de ocupación (α), tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$f = \frac{P}{\alpha * C_v} \dots \dots \dots \text{(ecuación 3.4)}$$

donde:

- f = Frecuencia de operación [veh/hr]
- P = Volumen de diseño de la ruta [pas/hr]
- α = Factor de ocupación
- C_v = Capacidad vehicular [pas/veh]

- **Intervalo de paso (i):** Es la porción de tiempo, comúnmente expresada en minutos, entre dos salidas sucesivas de vehículos de transporte público en una ruta. Su relación con la frecuencia está dada por la siguiente ecuación:

$$i = \frac{60}{f} \dots \dots \dots \text{(ecuación 3.5)}$$

donde:

- i = Intervalo de paso [min/veh]
- f = Frecuencia de operación [veh/hr]

Debido a su relación con la frecuencia de operación (f), la **ecuación 3.5** también puede expresarse de la siguiente manera:

$$f = \frac{P}{\alpha * C_v} = \frac{60}{i} \quad \therefore \quad i = \frac{60 * \alpha * C_v}{P} \dots \dots \dots \text{(ecuación 3.6)}$$

donde:

- i = Intervalo de paso [min/veh]
- f = Frecuencia de operación [veh/hr]
- P = Volumen de diseño de la ruta [pas/hr]
- α = Factor de ocupación
- C_v = Capacidad vehicular [pas/veh]

- **Capacidad de línea ofrecida (C):** Es el número total de espacios ofrecidos en un punto fijo de una ruta durante una hora. La capacidad de línea es básica para la planeación y diseño del transporte público, es resultado del



producto de la frecuencia y la capacidad vehicular. Naturalmente, se debe proveer un servicio con una capacidad igual o mayor que el VHMD.

$$C = f * C_v \geq VHMD \dots\dots\dots \text{(ecuación 3.7)}$$

donde:

C = Capacidad de línea [pas/hr]

f = Frecuencia de operación [veh/hr]

C_v = Capacidad vehicular [pas/veh]

$VHMD$ = Volumen Horario de Máxima Demanda [pas/hr]

- **Vehículos en operación (N):** Es el número de vehículos requeridos para dar servicio en una ruta, se calcula de la siguiente manera:

$$N = \frac{t_c}{i} \dots\dots\dots \text{(ecuación 3.8)}$$

donde:

N = Número de vehículos en operación [veh]

t_c = Tiempo de ciclo [min]

i = Intervalo [min/veh]

O bien:

$$N = T_c * f \dots\dots\dots \text{(ecuación 3.9)}$$

donde:

N = Número de vehículos en operación [veh]

T_c = Tiempo de ciclo [hr]

f = Frecuencia de operación [veh/hr]

- **Tamaño total del parque vehicular (N_p):** Es el número total de unidades con las que cuenta un sistema de transporte, las cuales deben cubrir la propia operación y las contingencias que se puedan presentar. Alceda (1997) resalta que para aquellos medios de transporte que se desplazan por sobre derechos de vía independientes, como es el caso de los Sistemas BRT, el problema del cumplimiento de los horarios se reduce a evitar contingencias o eventualidades en el equipo mediante un cuidadoso programa de mantenimiento y reparación.



Por lo tanto, el tamaño total del parque vehicular consistirá en la suma del número de vehículos en operación (**N**), los vehículos de reserva (**N_r**) para atender posibles contingencias y los vehículos que están en mantenimiento y reparación (**N_m**), tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$N_p = N + N_r + N_m \dots \dots \dots \text{ (ecuación 3.10)}$$

Alceda (1997) también sugiere valores para dichos parámetros, los cuales se muestran a continuación:

- **N_r** representa los vehículos de reserva para atender contingencias, el cual se conforma por:

$$N_r = R_c + R_d = 0.01 * N + 0.04 * N = 0.05 * N \dots \dots \dots \text{ (ecuación 3.11)}$$

donde:

- N* = Número de vehículos en operación [veh]
- R_c* = Vehículos de reserva por contingencias (1% de *N*)
- R_d* = Vehículos de reserva por variación de la demanda (4% de *N*)

- **N_m** representa los vehículos que están en mantenimiento y reparación, el cual se conforma por:

$$N_m = V_m + V_r = 0.05 * N + 0.05 * N = 0.1 * N \dots \dots \dots \text{ (ecuación 3.12)}$$

donde:

- N* = Número de vehículos en operación [veh]
- V_m* = Vehículos en mantenimiento (5% de *N*)
- V_r* = Vehículos en reparación (5% de *N*)

Por lo tanto, el número total de vehículos citado quedará conformado de la siguiente manera:

$$N_p = N + N_r + N_m = N * (1 + 0.05 + 0.1) = 1.15 * N \dots \dots \dots \text{ (ecuación 3.13)}$$

donde:

- N* = Vehículos requeridos para la operación
- N_p* = Número total de vehículos



Es decir, 15% adicional al número de unidades requeridas en operación para flota de reserva. Se aconseja el 20% de flota de reserva para vehículos de mayor capacidad, por ejemplo para vehículos biarticulados.

Molinero (2005) muestra por medio de las **figuras 3.3 y 3.4**, una representación gráfica de los parámetros antes descritos.

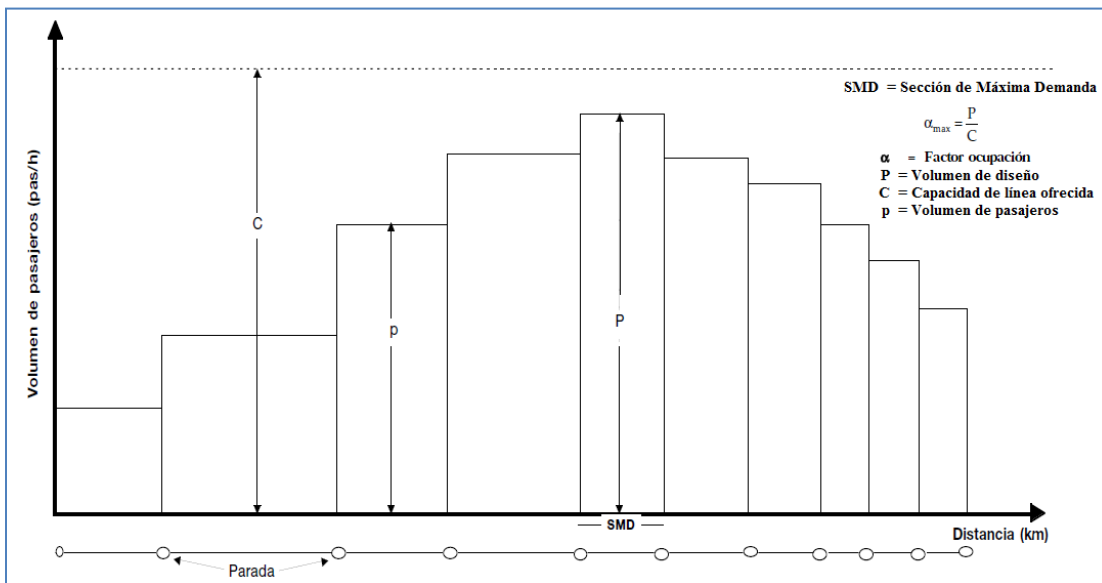


Figura 3.3. Representación gráfica de parámetros relativos a la distribución de la demanda de pasajeros y la capacidad del sistema. Fuente: Molinero (2005).

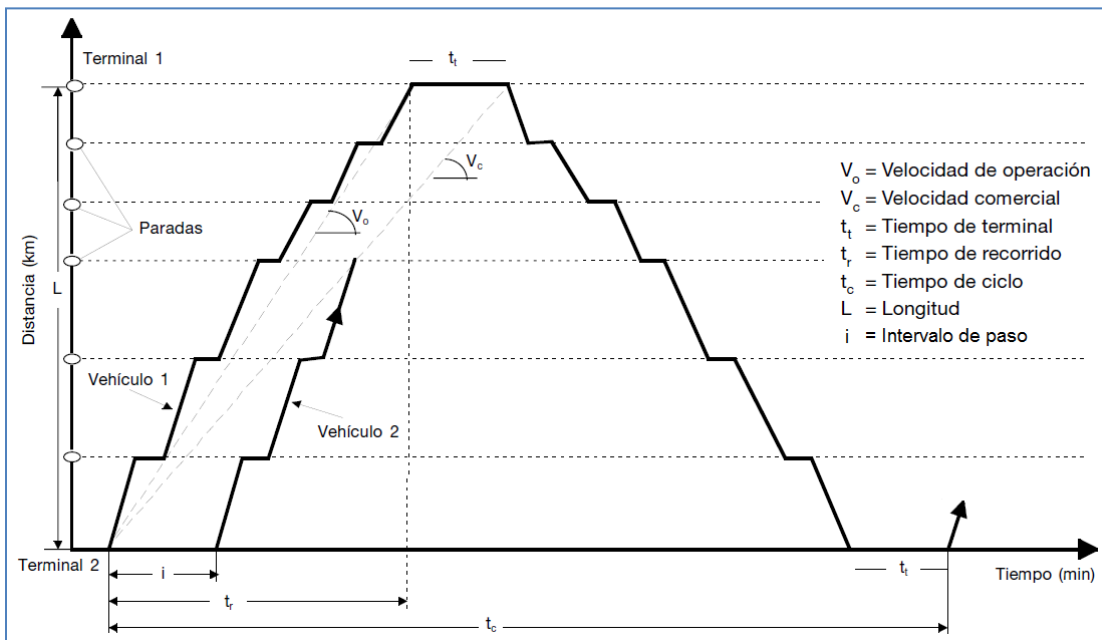


Figura 3.4. Representación gráfica de los parámetros relacionados al recorrido de los vehículos y a su programación. Fuente: Molinero (2005).



3.1.3. Procedimiento convencional de dimensionamiento de rutas de transporte

El procedimiento general que se sigue para el dimensionamiento de rutas de transporte se puede resumir tal y como se muestra en la **figura 3.5**.



Figura 3.5. Procedimiento general de dimensionamiento de rutas de transporte. Fuente: elaboración propia.

Dicho procedimiento se explica a continuación mediante un ejemplo aplicado a la ruta “Indios Verdes - El Caminero” de la Línea 1 de Metrobús, considerando únicamente el uso de vehículos articulados.

- **Recopilación de información requerida:** En la **tabla 3.1** se muestran los parámetros básicos que deben tomarse en cuenta para dimensionar una ruta, los cuales deben complementarse con información relacionada a requerimientos operativos y restricciones físicas del sistema:

Tabla 3.1. Parámetros básicos para el dimensionamiento de una ruta de transporte.

Parámetro	Simbología	Ejemplo: Metrobús L1		Unidad de medida	Como se obtiene
Longitud de la ruta	L	54.45		Km	Medida directa: Odómetro de carretilla
Tiempos de recorrido	t_r	Indios Verdes - El Caminero	79	min	Estudio de Ascenso-Descenso
		El Caminero - Indios Verdes	81		
Tiempos de terminal	t_t	Indios Verdes	2	min	Según contrato colectivo de trabajo
		El Caminero	3		
Volumen horario de máxima demanda	VHMD	10,500		pas / hr	Resultados del estudio de Ascenso-Descenso
Capacidad del vehículo	C_v	Vehículo articulado: 160		pas / veh	Especificaciones del vehículo
Factor de ocupación	α	0.9		---	Según norma de calidad de servicio

Fuente: Elaboración propia.



- **Determinación de la frecuencia e intervalo de operación:** El dimensionamiento de una ruta debe garantizar la cantidad de vehículos necesarios para cubrir la demanda máxima de pasajeros en el sistema durante la HMD, por lo que el volumen de diseño (**P**) será igual al **VHMD**.

En el ejemplo, esto implicaría que en la Línea 1 de Metrobús se ofreciera un servicio directo de terminal a terminal, por lo que la frecuencia de operación (**f**) para dicho servicio se calcularía de la siguiente manera a partir de la **ecuación 3.4**:

$$f = \frac{P}{\alpha * C_v} = \frac{VHMD}{\alpha * C_v} = \frac{10,500 [pas/hr]}{0.9 * 160 [pas/veh]} = 73 [veh/hr]$$

Al conocer la frecuencia de operación es posible también calcular el intervalo de paso entre cada vehículo utilizando la **ecuación 3.5**:

$$i = \frac{60}{f} = \frac{60 [min/hr]}{73 [veh/hr]} = 0.822 [min/veh] = 49 [seg/veh]$$

Por lo tanto, para cubrir una demanda de 10,500 pasajeros en la **HMD**, se requiere que en la **SMD** pasen 73 vehículos articulados cada hora operando a una capacidad del 90% por lo que, teóricamente, el tiempo de espera entre la salida y llegada de un vehículo a una estación es de 49 segundos.

- **Determinación del número total de vehículos en operación:** Puesto que para cubrir la demanda de usuarios un vehículo debe salir cada 49 segundos de una terminal, es necesario determinar cuántas unidades se requieren para cubrir el tiempo de ciclo de la ruta, es decir, el número total de vehículos (**N**) que salen de una terminal hasta que vuelve a llegar a ésta el primer vehículo que salió. Utilizando la **ecuación 3.1** es posible conocer el tiempo de ciclo de la Línea 1 de Metrobús:

$$t_c = t_{rAB} + t_{tB} + t_{rBA} + t_{tA} = 79 + 3 + 81 + 2 = 165 [min] = 2.75 [hrs]$$

El número total de vehículos en operación se obtiene mediante la aplicación de la **ecuación 3.8**:

$$N = \frac{t_c}{i} = \frac{165 [min]}{0.822 [min/veh]} = 201 [veh]$$



De manera alterna, también es posible calcular dicho parámetro utilizando la **ecuación 3.9**:

$$N = T_C * f = 2.75 [hrs] * 73 [veh/hr] = 201 [veh]$$

- Determinación del tamaño total del parque vehicular:** Se requieren 201 vehículos articulados operando, de terminal a terminal, en la Línea 1 de Metrobús para cubrir una demanda máxima de 10,500 usuarios, pero se recomienda tener una flota de reserva del 15% del total de vehículos en operación para cubrir contingencias o dar mantenimiento a las unidades sin tener que retirar vehículos del servicio, por lo que el tamaño total del parque vehicular (**N_p**) será:

$$N_p = 1.15 * N = 1.15 * 201 [veh] = 231 [veh]$$

Finalmente, considerando que el precio por cada vehículo articulado con capacidad para 160 pasajeros es de aproximadamente \$5, 082,540 pesos (MXN), la inversión total (**IT**) por concepto de adquisición de la flota vehicular será de:

$$IT = 5,082,540 [$/veh] * 231 [veh] = \$ 1,174,066,740 (MXN)$$

La **figura 3.6** muestra esquemáticamente el cálculo convencional para el dimensionamiento de una ruta de transporte, en ella es posible apreciar que el parámetro de partida, y por ende el más importante, es el **VHMD** ya que a partir de éste se calcula la frecuencia de operación (**f**), principal parámetro en la determinación del tamaño total de la flota vehicular (**N_p**).

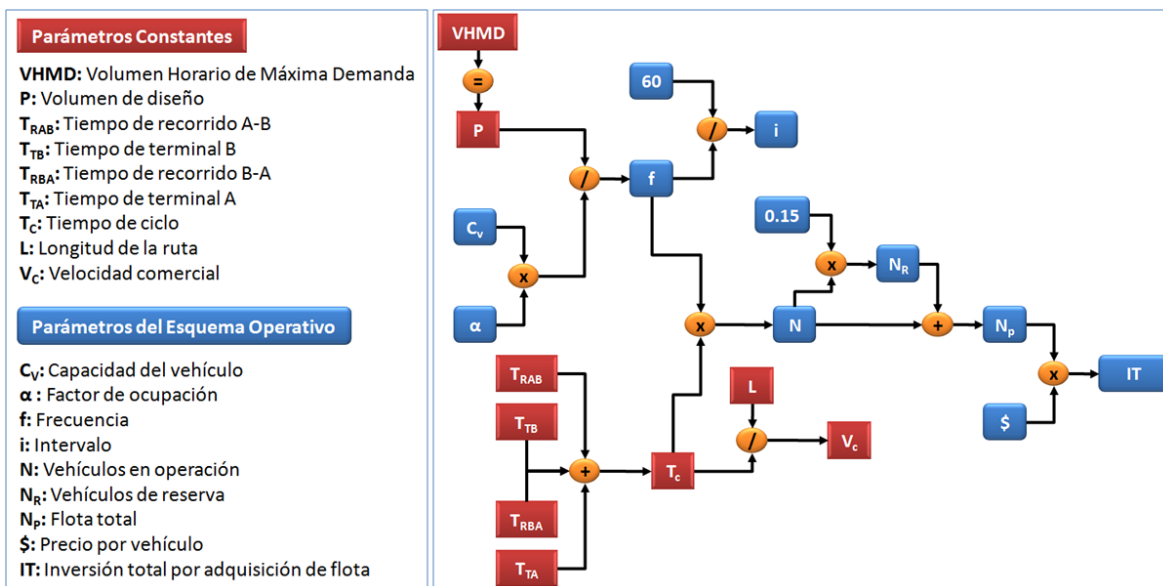


Figura 3.6. Cálculo convencional para el dimensionamiento de rutas de transporte. Fuente: Elaboración propia.



Puesto que el objetivo principal de la presente tesis es determinar una herramienta de cálculo que permita dimensionar un sistema tan complejo como lo es Metrobús, se retomará este tema en el siguiente capítulo, el cual está dedicado a la descripción de las limitantes del cálculo convencional de dimensionamiento de rutas y a las herramientas matemáticas que pueden ser utilizadas para superar dichas limitantes.

3.2. Programación del Servicio

Una vez determinado el número de vehículos en un corredor de transporte mediante el proceso de dimensionamiento es necesario definir el plan de trabajo o jornada para cada uno de los vehículos que estará en operación brindando servicio, a esto se le conoce como la *Programación del Servicio*.

Alceda (1997) define la Programación del Servicio en un sistema de transporte público como: “el establecimiento de la frecuencia de operación (o intervalos de salida) para cada uno de los periodos del día ajustando dichas frecuencia a las fluctuaciones de la demanda”. Molinero (2005) señala que es importante entender los elementos básicos que intervienen en la elaboración de una Programación del Servicio sin importar si se realiza manualmente o mediante la utilización de programas informáticos como HASTUS, EPON, Busman, Rucus o GoalBus.

Antes de explicar cómo se elabora una Programación del Servicio es necesario describir una serie de aspectos que deben ser considerados en dicha elaboración pues aportan información indispensable para poder ajustar la oferta a la demanda de transporte, los cuales son:

- **Número y tipo de vehículos por ruta:** Es el resultado del proceso de dimensionamiento de rutas.
- **Horarios de servicio:** Se refiere al periodo del día (hábil, sábado, domingo o especial) en el que un usuario tendrá a su disposición el servicio de transporte.
- **Franjas horarias:** Son las variaciones de los tiempos de recorrido de una ruta a lo largo del día debido a los retrasos que experimentan las unidades de transporte por la aglomeración de pasajeros en las paradas o estaciones así como en los cruces donde interactúan con el tránsito general, un fenómeno que Gershenson & Pineda (2009) denominan la “Inestabilidad de intervalos iguales” (**Anexo F**).



- Frecuencias básicas de operación:** Es la variación de las frecuencias de operación según el comportamiento de la demanda a lo largo del día. Los factores que afectan dicho comportamiento de la demanda están relacionados con los horarios de actividades comerciales, laborales, escolares, recreativas, de salud, etc. así como con la influencia de zonas habitacionales, vialidades y modos de transporte cercanos a los corredores de transporte. Por ejemplo, la **figura 3.7** muestra la variación horaria de un día hábil típico en la Línea 1 de Metrobús en la que es posible identificar cinco tipos de periodos del día donde la demanda cambia significativamente y en los cuales debe utilizarse un determinado tipo de frecuencia de operación:

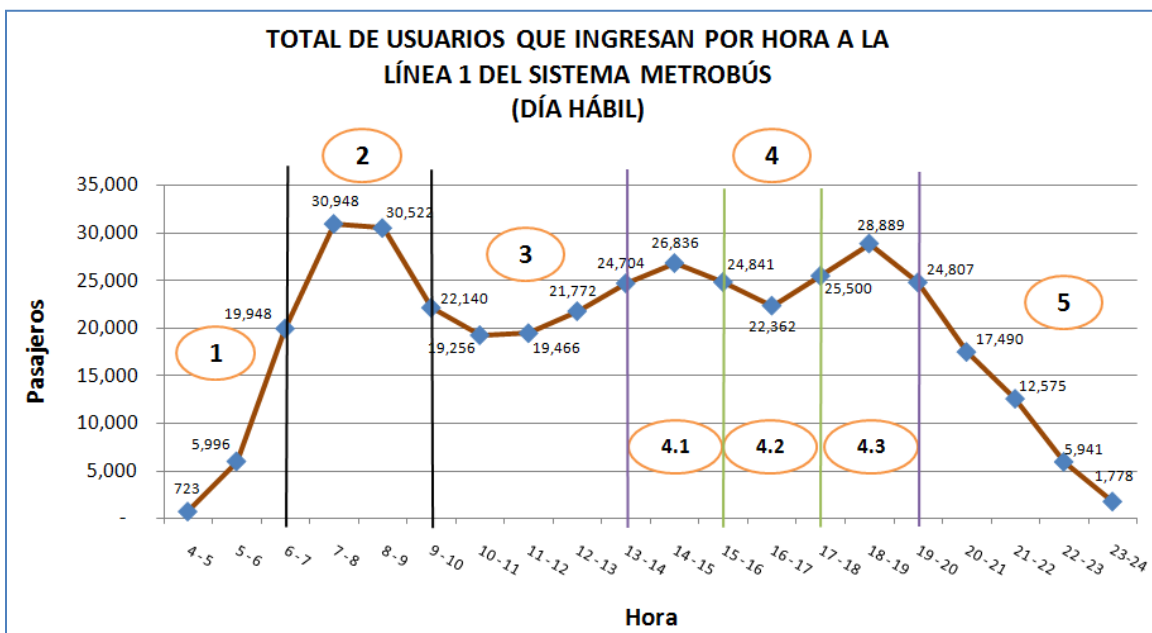


Figura 3.7. Frecuencias básicas de operación según la variación horaria del comportamiento de la demanda. Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.

- 1. Frecuencia Inicial:** Aplicable entre las 4:00 y las 6:00 hrs. Es decir, entre la hora de inicio del servicio y el comienzo de la Hora de Máxima Demanda (HMD).
- 2. Frecuencia de HMD:** Aplicable entre las 6:00 y las 10:00 hrs, o según se presente la HMD.
- 3. Frecuencia Valle:** Aplicable a partir de la terminación del período de mayor demanda y el inicio del periodo punta del medio día.
- 4. Frecuencia Vespertina:** Puesto que el periodo pico de medio día (4.1) dura muy poco al igual que el periodo valle vespertino (4.2), por razones de simplicidad y nivel de servicio es aconsejable



considerarlos parte del periodo de mayor demanda vespertino (4.3) aplicable de las 14:00 a las 20:00 hrs.

- 5. Frecuencia Nocturna: aplicable desde las 20:00 hrs hasta la conclusión del servicio.

Los cambios necesarios entre las frecuencias básicas de operación se logran mediante la incorporación o desincorporación paulatina de vehículos de una ruta según el periodo del día.

- **Puntos de incorporación y desincorporación de unidades:** Se refiere a la ubicación y capacidad de los patios donde pernoctan los vehículos así como los lugares de almacenamiento temporal de los mismos durante periodos valle del día.

La información descrita anteriormente es conocida con el nombre de “*Información Básica de Programación*” y sirve de insumo para la herramienta principal con la que el Sistema Metrobús de la Ciudad de México establece la Programación del Servicio, mejor conocida como la Matriz de Viajes.

3.2.1. Matriz de Viajes

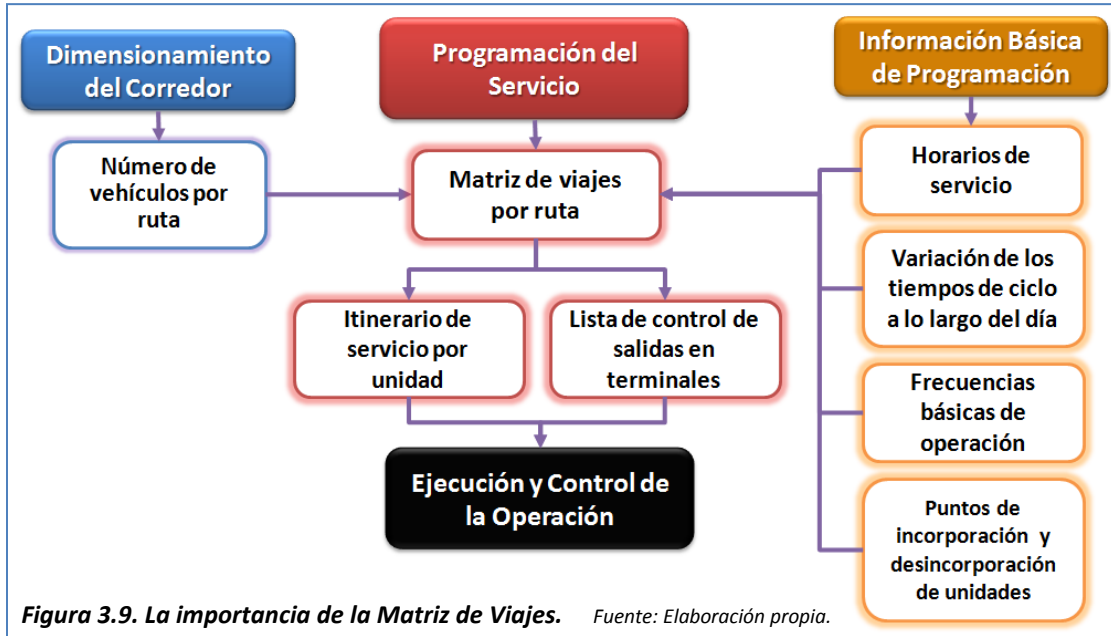
La Matriz de Viajes es el documento que contiene, en un arreglo matricial, los itinerarios de servicio para cada uno de los vehículos que operan en una ruta de transporte. Un itinerario de servicio es la descripción detalla de la ubicación espacio-temporal de cada vehículo a lo largo del día o jornada. La **figura 3.8** muestra un ejemplo de una Matriz de Viajes para una ruta con doce vehículos en operación.

CORRIDA	ORIGEN-DESTINO	DESCRIPCIÓN DE ITINERARIOS POR VUELTA																		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9									
1	Terminal A		04:56	06:47	06:49	08:41	08:43	10:36			12:33	14:26	14:28	16:21	16:23	18:18	18:20	20:16	20:18	22:12
	Terminal B		05:50	05:53	07:43	07:46	09:38	09:41			13:27	13:30	15:22	15:25	17:18	17:21	19:16	19:19	21:13	21:16
2	Terminal A				06:59	08:50	08:52	10:45	10:47	12:40	12:42	14:35	14:37	16:30	16:32	18:28	18:30	20:26	20:28	22:23
	Terminal B				07:53	07:56	09:47	09:50	11:42	11:45	13:37	13:40	15:32	15:35	17:28	17:31	19:26	19:29	21:24	21:27
3 BI	Terminal A		05:14	07:06	07:08	09:00	09:02	10:55	10:57	12:50	12:52	14:45	14:47	16:40	16:42	18:37	18:39	20:35	20:37	22:32
	Terminal B		06:08	06:11	08:02	08:05	09:57	10:00	11:51	11:54	13:48	13:51	15:42	15:45	17:38	17:41	19:35	19:38	21:33	21:36
4	Terminal A				07:17	09:10	09:12	11:05			13:02	14:55	14:57	16:50	16:52	18:47	18:49	20:45	20:47	22:42
	Terminal B				08:12	08:15	10:07	10:10			13:57	14:00	15:51	15:54	17:47	17:50	19:45	19:48	21:43	21:46
5	Terminal A		05:34	07:25	07:27	09:19	09:21	11:14	11:16	13:09	13:11	15:04	15:06	16:59	17:01	18:57	18:59	20:55	20:57	22:51
	Terminal B		06:28	06:31	08:21	08:24	10:15	10:18	12:11	12:14	14:06	14:09	16:01	16:04	17:57	18:00	19:55	19:58	21:52	21:55
6	Terminal A				07:36	09:29	09:31	11:24	11:26	13:19	13:21	15:14	15:16	17:09	17:11	19:07	19:09	21:04	21:06	23:00
	Terminal B				08:31	08:34	10:25	10:28	12:21	12:24	14:16	14:19	16:11	16:14	18:07	18:10	20:05	20:08	22:01	22:04
7 BI	Terminal A	05:51	05:53	07:43	07:45	09:38	09:40					15:23	15:25	17:19	17:21	19:17	19:19	21:14	21:16	
	Terminal B	04:58	06:46	06:49	08:40	08:43	10:35					14:29	16:21	16:24	18:17	18:20	20:15	20:18	22:11	
8	Terminal A		06:02	07:53	07:55	09:48	09:50	11:43	11:45	13:38	13:40	15:33	15:35	17:29	17:31	19:27	19:29	21:23	21:25	23:20
	Terminal B		06:56	06:59	08:50	08:53	10:46	10:49	12:40	12:43	14:36	14:39	16:30	16:33	18:28	18:31	20:24	20:27	22:21	22:24
9	Terminal A	06:10	06:12	08:03	08:05	09:58	10:00	11:53	11:55	13:48	13:50	15:43	15:45	17:38	17:40	19:36	19:38	21:33	21:35	
	Terminal B	05:17	07:05	07:08	08:59	09:02	10:56	10:59	12:50	12:53	14:45	14:48	16:39	16:42	18:36	18:39	20:34	20:37	22:30	
10	Terminal A		06:20	08:12	08:14	10:07	10:09	12:02			13:59	15:52	15:54	17:48	17:50	19:46	19:48	21:43	21:45	23:38
	Terminal B		07:14	07:17	09:09	09:12	11:05	11:08			14:54	14:57	16:49	16:52	18:46	18:49	20:44	20:47	22:39	22:42
11 BI	Terminal A	06:29	06:31	08:22	08:24	10:17	10:19	12:12	12:14	14:07	14:09	16:02	16:04	17:58	18:00	19:56	19:58	21:52	21:54	
	Terminal B	05:36	07:24	07:27	09:19	09:22	11:14	11:17	13:09	13:12	15:04	15:07	16:59	17:02	18:56	18:59	20:54	20:57	22:49	
12	Terminal A		06:40	08:31	08:33	10:26	10:28	12:21	12:23	14:16	14:18	16:11	16:13	18:08	18:10	20:06	20:08	22:02	22:04	23:59
	Terminal B		07:34	07:37	09:28	09:31	11:23	11:26	13:18	13:21	15:13	15:16	17:08	17:11	19:06	19:09	21:03	21:06	23:00	

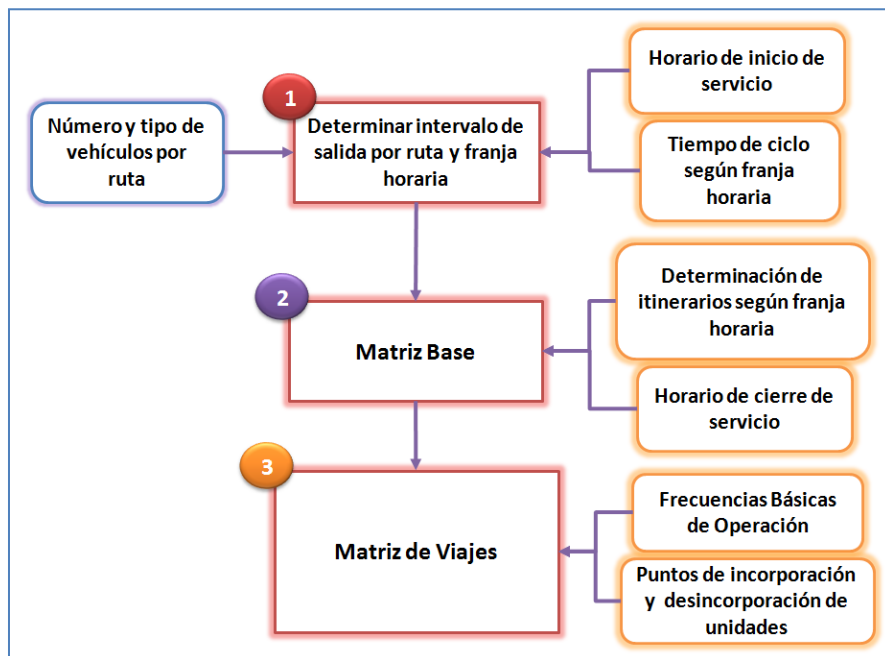
Figura 3.8. Matriz de Viajes para una Ruta con 12 vehículos en operación. Fuente: Elaboración propia.



La importancia de la Matriz de Viajes radica en que es el medio por el cual se transmite la información generada en la planeación del servicio hacia las áreas encargadas de la ejecución y control de la operación (**ver figura 3.9**).



A continuación se describe de manera general el proceso de elaboración de una Matriz de Viajes para una ruta basado en la **figura 3.10** que muestra el flujo de información a lo largo de la construcción de dicha matriz.





- 1. Determinación del intervalo de salidas por franja horaria:** El intervalo de paso de una ruta se puede calcular utilizando la siguiente expresión, derivada de la **ecuación 3.8**:

$$i = \frac{t_c}{N} \dots \dots \dots \text{(ecuación 3.14)}$$

donde:

i = Intervalo [min/veh]

t_c = Tiempo de ciclo [min]

N = Número de vehículos en operación [veh]

Definir el intervalo de salida de vehículos en una terminal no es del todo sencillo pues, generalmente, en la operación resulta más práctico establecer dichos intervalos utilizando minutos cerrados, es decir, sin considerar los segundos. La complejidad se presenta cuando el cociente entre el tiempo de ciclo de una ruta y el número de unidades asignadas a la misma no da como resultado un número entero. En este caso, para que los intervalos queden expresados únicamente en términos de minutos se requiere que las unidades tengan intervalos de salida diferentes.

Por ejemplo, en una ruta con tiempo de ciclo de 112 minutos han sido asignadas 12 unidades lo cual implicaría un intervalo de 9.333 minutos. Si sólo se toma la parte entera de dicho resultado, la división quedará con un residuo de 4 unidades, tal y como se muestra en la siguiente operación:

$$\begin{array}{r} 9 \\ 12 \overline{) 112} \\ \underline{108} \\ 4 \end{array}$$

Por lo tanto, ocho unidades tendrán un intervalo de 9 minutos mientras que las cuatro restantes operarán a un intervalo de 10 minutos. Es importante resaltar que las cuatro unidades que operan a un intervalo de 10 minutos tienen que ser distribuidas homogéneamente entre las ocho restantes para garantizar un servicio uniforme, lo mismo sucede si se tienen vehículos de diferente capacidad en una ruta.

La **figura 3.11** muestra el establecimiento final de los intervalos de salida para el ejemplo dado con tres unidades biarticuladas y que comienza a dar servicio a las 5:00 a.m.



Corrida	Salida	Intervalo
1	05:00	
2	05:10	00:10
3 BI	05:19	00:09
4	05:28	00:09
5	05:38	00:10
6	05:47	00:09
7 BI	05:56	00:09
8	06:06	00:10
9	06:15	00:09
10	06:24	00:09
11 BI	06:34	00:10
12	06:43	00:09

Figura 3.11. Ejemplo: determinación final de intervalos de salida.

Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior debe hacerse para cada franja horaria, es decir, cada vez que cambien los tiempos de recorrido de una ruta a lo largo del día. La **tabla 3.2** muestra un ejemplo de las franjas horarias presentes en la ruta A4 (*Glorieta de Insurgentes – El Caminero*) de la Línea 1 de Metrobús.

Tabla 3.2. Franjas horarias de la Ruta A4 de la Línea 1 de Metrobús

FRANJAS	Retorno GI	Recorrido GI-EC	Retorno EC	Recorrido EC-GI	Tiempo de Ciclo
5:00 - 7:30	00:02	00:53	00:03	00:54	01:52
7:30 - 17:00	00:02	00:55	00:03	00:55	01:55
17:00 - 21:00	00:02	00:56	00:03	00:57	01:58
21:00 - 00:00	00:02	00:54	00:03	00:53	01:52

Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.

- 2. Elaboración de itinerarios según franja horaria:** Una vez identificados los intervalos de salida para cada franja horaria así como sus respectivos componentes de tiempo de ciclo (tiempos de recorrido y retorno en terminales), se procede a la elaboración de los itinerarios para cada uno de los vehículos en la ruta. La Matriz de Viajes está conformada por los elementos que se muestran en la **figura 3.12**:

Corrida	Origen-Destino	Itinerario Vuelta 1		Itinerario Vuelta 2		Itinerario Vuelta 3	
1	Terminal A	Ω	δ	ϵ	δ	ϵ	δ
	Terminal B	β_1	γ	β	γ	β	γ

Figura 3.12. Elementos que conforman la Matriz de Viajes. Fuente: Elaboración propia.



donde:

Ω = Hora de salida de la terminal A (según intervalos de operación)

β_1 = Hora de llegada a la terminal B a partir de Ω

γ = Hora de salida de la terminal B

δ = Hora de llegada a la terminal A

ε = Hora de salida de la terminal A

β = Hora de llegada a la terminal B a partir de ε

Cada componente de la Matriz de Viajes se calcula de la siguiente manera:

$$\beta_1 = \Omega + t_{AB} \dots \dots \dots \text{(ecuación 3.15)}$$

$$\gamma = \beta + t_B \dots \dots \dots \text{(ecuación 3.16)}$$

$$\delta = \gamma + t_{BA} \dots \dots \dots \text{(ecuación 3.17)}$$

$$\varepsilon = \delta + t_A \dots \dots \dots \text{(ecuación 3.18)}$$

$$\beta = \varepsilon + t_{AB} \dots \dots \dots \text{(ecuación 3.19)}$$

donde:

t_{AB} = tiempo de recorrido de la terminal A a la terminal B [min]

t_A = tiempo de retorno en la terminal A [min]

t_{BA} = tiempo de recorrido de la terminal B a la terminal A [min]

t_B = tiempo de retorno en la terminal B [min]

La **figura 3.13** muestra un ejemplo de cómo se construye el itinerario para las primeras dos vueltas de un vehículo en una Matriz de Viajes.

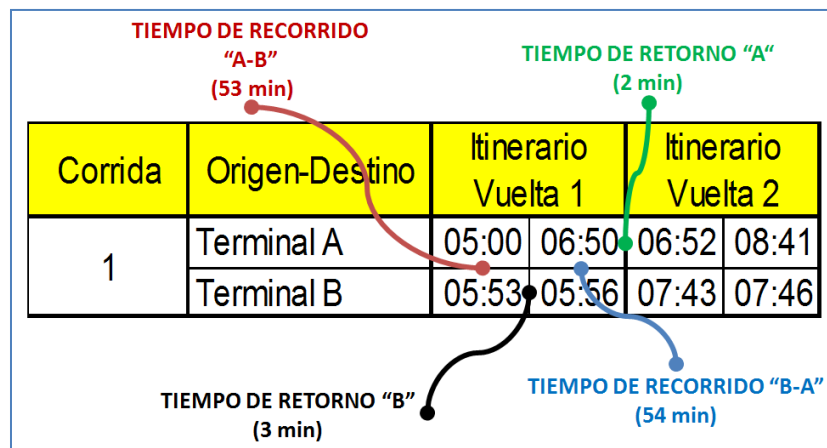


Figura 3.13. Itinerarios de servicio de un vehículo en una Matriz de Viajes.

Fuente: Elaboración propia.

Estos cálculos se repetirán para cada uno de los vehículos asignados a una ruta conforme a las franjas horarias de la misma hasta que se alcance la



hora de cierre de servicio en terminales, tal y como se muestra en la **figura 3.14**. A la matriz resultante se le conoce con el nombre de Matriz Base.

Corrida	Origen-Destino	Itinerario Vuelta 1	Itinerario Vuelta 2	Itinerario Vuelta 3	Itinerario Vuelta 4	Itinerario Vuelta 5	Itinerario Vuelta 6	Itinerario Vuelta 7	Itinerario Vuelta 8	Itinerario Vuelta 9									
1	Terminal A	05:00	06:50	06:52	08:41	08:43	10:36	10:38	12:31	12:33	14:26	14:28	16:21	16:23	18:18	18:20	20:16	20:18	22:11
	Terminal B	05:53	07:43	07:46	09:38	09:41	11:33	11:36	13:28	13:31	15:23	15:26	17:18	17:21	19:16	19:19	21:13	21:16	
2	Terminal A	05:10	07:00	07:02	08:50	08:52	10:45	10:47	12:40	12:42	14:35	14:37	16:30	16:32	18:28	18:30	20:26	20:28	22:21
	Terminal B	06:03	07:53	07:56	09:47	09:50	11:42	11:45	13:37	13:40	15:32	15:35	17:28	17:31	19:26	19:29	21:23	21:26	
3 BI	Terminal A	05:19	07:09	07:11	09:00	09:02	10:55	10:57	12:50	12:52	14:45	14:47	16:40	16:42	18:37	18:39	20:35	20:37	22:30
	Terminal B	06:12	08:02	08:05	09:57	10:00	11:52	11:55	13:47	13:50	15:42	15:45	17:37	17:40	19:35	19:38	21:32	21:35	
4	Terminal A	05:28	07:18	07:20	09:10	09:12	11:05	11:07	13:00	13:02	14:55	14:57	16:50	16:52	18:47	18:49	20:45	20:47	22:40
	Terminal B	06:21	08:12	08:15	10:07	10:10	12:02	12:05	13:57	14:00	15:52	15:55	17:47	17:50	19:45	19:48	21:42	21:45	
5	Terminal A	05:37	07:28	07:30	09:19	09:21	11:14	11:16	13:09	13:11	15:04	15:06	16:59	17:01	18:57	18:59	20:55	20:57	22:50
	Terminal B	06:30	08:21	08:24	10:16	10:19	12:12	12:14	14:06	14:09	16:01	16:04	17:57	18:00	19:55	19:58	21:52	21:55	
6	Terminal A	05:47	07:37	07:39	09:29	09:31	11:24	11:26	13:19	13:21	15:14	15:16	17:09	17:11	19:09	19:11	21:04	21:06	22:59
	Terminal B	06:40	08:31	08:34	10:26	10:29	12:22	12:24	14:16	14:19	16:11	16:14	18:07	18:10	20:05	20:08	22:00	22:04	
7 BI	Terminal A	05:47	07:37	07:39	09:38	09:40	11:33	11:35	13:28	13:30	15:23	15:25	17:19	17:21	19:19	19:21	21:14	21:16	23:09
	Terminal B	06:40	08:31	08:34	10:35	10:38	12:33	12:35	14:28	14:30	16:23	16:25	18:17	18:19	20:15	20:18	22:10	22:14	
8	Terminal A	06:06	07:56	07:58	09:48	09:50	11:44	11:46	13:38	13:40	15:33	15:35	17:29	17:31	19:29	19:31	21:23	21:25	23:18
	Terminal B	06:59	08:50	08:53	10:45	10:47	12:40	12:43	14:35	14:38	16:30	16:33	18:27	18:30	20:25	20:28	22:19	22:23	
9	Terminal A	06:15	08:03	08:05	09:58	10:00	11:53	11:55	13:48	13:50	15:43	15:45	17:38	17:40	19:36	19:38	21:33	21:35	23:28
	Terminal B	07:08	08:51	08:53	10:45	10:47	12:40	12:43	14:35	14:38	16:30	16:33	18:27	18:30	20:25	20:28	22:19	22:23	
10	Terminal A	06:24	08:12	08:14	10:07	10:09	12:02	12:04	13:57	13:59	15:52	15:54	17:48	17:50	19:46	19:48	21:43	21:45	23:38
	Terminal B	07:17	09:09	09:12	11:04	11:07	12:59	13:02	14:54	14:57	16:49	16:52	18:46	18:49	20:44	20:47	22:40	22:43	
11 BI	Terminal A	06:24	08:22	08:24	10:17	10:19	12:12	12:14	14:07	14:09	16:02	16:04	17:58	18:00	19:56	19:58	21:51	21:53	23:47
	Terminal B	07:24	09:27	09:29	11:22	11:24	13:17	13:19	15:12	15:14	17:07	17:09	19:03	19:05	21:00	21:02	22:55	22:57	
12	Terminal A	06:43	08:31	08:33	10:26	10:28	12:21	12:23	14:16	14:18	16:11	16:13	18:08	18:10	20:06	20:08	22:04	22:06	23:57
	Terminal B	07:33	09:26	09:28	11:23	11:25	13:18	13:20	15:13	15:15	17:08	17:10	19:06	19:08	21:04	21:06	23:02	23:04	

Figura 3.14. Franjas horarias en una Matriz Base. Fuente: Elaboración propia.

3. Incorporación y desincorporación de unidades: Ya elaborada la Matriz Base es necesario identificar el número de unidades que abrirán y cerrarán el servicio en cada una de las terminales según los horarios de servicio de la ruta. Esta información es proporcionada por la ubicación y capacidad de los patios de pernocta de los vehículos.

Una vez definidas las Frecuencias Básicas de Operación de la ruta, es necesario conocer la ubicación y capacidad de los lugares de almacenamiento temporal para determinar el número máximo de unidades que tendrán que desincorporar en el periodo valle del día. En la **figura 3.15** es posible observar cómo se distribuyen las Frecuencias Básicas de Operación en una Matriz de Viajes.

Es importante mencionar que en los itinerarios de las unidades que brinden servicio durante el periodo valle del día, se tendrá que reajustar la hora de salida en terminales para dicho periodo retrasando unos minutos la salida y así ajustar la frecuencia de operación y evitar que los usuarios perciban los “huecos de servicio” (falta de unidades por la desincorporación de vehículos).



CORRIDA	ORIGEN-DESTINO	DESCRIPCIÓN DE ITINERARIOS POR VUELTA																		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9									
1	Terminal A	04:56	06:47	06:49	08:41	08:43	10:36			12:33	14:26	14:28	16:21	16:23	18:18	18:20	20:16	20:18	22:12	
	Terminal B	05:50	05:53	07:43	07:46	09:38	09:41			13:27	13:30	15:22	15:25	17:18	17:21	19:16	19:19	21:13	21:16	
2	Terminal A		06:59	08:50	08:52	10:45	10:47	12:40		12:42	14:35	14:37	16:30	16:32	18:28	18:30	20:26	20:28	22:23	
	Terminal B			07:53	07:56	09:47	09:50	11:42	11:45	13:37	13:40	15:32	15:35	17:28	17:31	19:26	19:29	21:24	21:27	
3 BI	Terminal A	05:14	07:06	07:08	09:00	09:02	10:55	10:57	12:50	12:52	14:45	14:47	16:40	16:42	18:37	18:39	20:35	20:37	22:32	
	Terminal B	06:08	06:11	08:02	08:05	09:57	10:00	11:51	11:54	13:48	13:51	15:42	15:45	17:38	17:41	19:35	19:38	21:33	21:36	
4	Terminal A			07:17	09:10	09:12	11:05			13:02	14:55	14:57	16:50	16:52	18:47	18:49	20:45	20:47	22:42	
	Terminal B			08:12	08:15	10:07	10:10			13:57	14:00	15:51	15:54	17:47	17:50	19:45	19:48	21:43	21:46	
5	Terminal A		05:34	07:25	07:27	09:19	09:21	11:14	11:16	13:09	13:11	15:04	15:06	16:59	17:01	18:57	18:59	20:55	20:57	22:51
	Terminal B		06:28	06:31	08:21	08:24	10:15	10:18	12:11	12:14	14:06	14:09	16:01	16:04	17:57	18:00	19:55	19:58	21:52	21:55
6	Terminal A			07:36	09:29	09:31	11:24	11:26	13:19	13:21	15:14	15:16	17:09	17:11	19:07	19:09	21:04	21:06	23:00	
	Terminal B			08:31	08:34	10:25	10:28	12:21	12:24	14:16	14:19	16:11	16:14	18:07	18:10	20:05	20:08	22:01	22:04	
7 BI	Terminal A	06:51	05:53	07:43	07:45	09:38	09:40				15:23	15:25	17:19	17:21	19:17	19:19	21:14	21:16		
	Terminal B	06:58	06:46	06:49	08:40	08:43	10:35				14:29	16:21	16:24	18:17	18:20	20:15	20:18	22:11		
8	Terminal A		06:02	07:53	07:55	09:48	09:50	11:43	11:45	13:38	13:40	15:33	15:35	17:29	17:31	19:27	19:29	21:23	21:25	23:20
	Terminal B		06:56	06:59	08:50	08:53	10:46	10:49	12:40	12:43	14:36	14:39	16:30	16:33	18:28	18:31	20:24	20:27	22:21	22:24
9	Terminal A	06:10	06:12	08:03	08:05	09:58	10:00	11:53	11:55	13:48	13:50	15:43	15:45	17:38	17:40	19:36	19:38	21:33	21:35	
	Terminal B	06:17	07:05	07:08	08:59	09:02	10:56	10:59	12:50	12:53	14:45	14:48	16:39	16:42	18:36	18:39	20:34	20:37	22:30	
10	Terminal A		06:20	08:12	08:14	10:07	10:09	12:02			13:59	15:52	15:54	17:48	17:50	19:46	19:48	21:43	21:45	23:38
	Terminal B		07:14	07:17	09:09	09:12	11:05	11:08			14:54	14:57	16:49	16:52	18:46	18:49	20:44	20:47	22:39	22:42
11 BI	Terminal A	06:29	06:31	08:22	08:24	10:17	10:19	12:12	12:14	14:07	14:09	16:02	16:04	17:58	18:00	19:56	19:58	21:52	21:54	
	Terminal B	06:36	07:24	07:27	09:19	09:22	11:14	11:17	13:09	13:12	15:04	15:07	16:59	17:02	18:56	18:59	20:54	20:57	22:49	
12	Terminal A		06:40	08:31	08:33	10:26	10:28	12:21	12:23	14:16	14:18	16:11	16:13	18:08	18:10	20:06	20:08	22:04	22:06	23:59
	Terminal B		07:34	07:37	09:28	09:31	11:23	11:26	13:18	13:21	15:13	15:16	17:08	17:11	19:06	19:09	21:03	21:06	23:00	

Figura 3.15. Frecuencias Básicas de Operación en una Matriz de Viajes. Fuente: Elaboración propia.

En el **Anexo G** se presentan las Matrices de Viaje de las diversas rutas que, a la fecha, brindan servicio en la Línea 1 del Sistema Metrobús.

3.2.2. Documentos de ejecución y control operativo

La información generada en la programación del servicio tiene que comunicarse de una manera sencilla y precisa a las áreas encargadas de ejecutar y controlar la operación. Alceda (1997) señala que el control se aplica al acto de cuidar la correcta interpretación y aplicación del programa operativo. También, menciona que el control de la operación tendrá los siguientes objetivos:

- ✓ Comprobar la existencia y actualidad del programa operativo del servicio.
- ✓ Inspeccionar si el programa se está respetando en todas sus fases.
- ✓ Verificar que sus componentes sean los adecuados y correspondan con las características de la demanda.
- ✓ Dirigir la logística de la operación para que los recursos sean aplicados con propiedad y oportunidad.

Para comunicar de manera clara la información derivada de la programación del servicio, generalmente se utilizan dos tipos de documentos (**ver figura 3.16**):

- **Control de salidas en terminal:** Es el documento dirigido al personal de regulación y control de la operación, consiste en una lista secuencial del



horario de salidas de las unidades que brindarán servicio en una ruta. Se elabora para cada una de las terminales de un corredor donde el personal de regulación y control verificará el cumplimiento de dichos horarios.

- **Itinerarios de servicio por unidad:** Es el documento dirigido a los operadores de las unidades o empresas operadoras, el cual consiste en la descripción detallada de las horas de salida y arribo, de cada una de las unidades en operación, a las terminales de una ruta durante su jornada de trabajo.



Figura 3.16. Principales documentos de ejecución y control operativo derivados de la Matriz de Viajes. Fuente: Elaboración propia.

No existe un formato universal de cómo elaborar cada uno de los documentos anteriormente descritos pues cada sistema de transporte tendrá que elaborar su documentación acorde a sus características y necesidades. Por ejemplo, en algunos sistemas se pudiera considerar importante el registro de kilometraje de las unidades en los controles de salida en terminales, o los horarios de cambio de turno para los operadores en los itinerarios de servicio. En el **Anexo H** se



presentan los formatos de controles de salida en terminales e itinerarios de servicio utilizados por el Sistema Metrobús de la Ciudad de México.

Es importante mencionar que la Matriz de Viajes, al describir vuelta a vuelta el recorrido de las unidades, aporta información relacionada al kilometraje total que se realizará en una ruta. Hay que recordar que generalmente en un Sistema BRT se paga a las empresas operadoras por kilómetro recorrido, por lo que al finalizar una Matriz de Viajes se deben asignar las corridas a las empresas operadoras con base en su porcentaje de participación del kilometraje total.

La **figura 3.17** muestra un ejemplo de la asignación de empresas en una Matriz de Viajes, en ella es posible observar que de las 100 vueltas que se generan en la programación del servicio 32 son asignadas a la empresa E1, 33 a la empresa E2 y 35 para la empresa E3.

CORRIDA	EMPRESA	ORIGEN-DESTINO	DESCRIPCIÓN DE ITINERARIOS POR VUELTA																		
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9									
1	E1	Terminal A	04:56	06:47	06:49	08:41	08:43	10:36			12:33	14:26	14:28	16:21	16:23	18:18	18:20	20:16	20:18	22:12	
		Terminal B	05:50	05:53	07:43	07:46	09:38	09:41			13:27	13:30	15:22	15:25	17:18	17:21	19:16	19:19	21:13	21:16	
2	E3	Terminal A			06:59	08:50	08:52	10:45	10:47	12:40	12:42	14:35	14:37	16:30	16:32	18:28	18:30	20:26	20:28	22:23	
		Terminal B			07:53	07:56	09:47	09:50	11:42	11:45	13:37	13:40	15:32	15:35	17:28	17:31	19:26	19:29	21:24	21:27	
3 BI	E2	Terminal A	05:14	07:06	07:08	09:00	09:02	10:55	10:57	12:50	12:52	14:45	14:47	16:40	16:42	18:37	18:39	20:35	20:37	22:32	
		Terminal B	06:08	06:11	08:02	08:05	09:57	10:00	11:51	11:54	13:48	13:51	15:42	15:45	17:38	17:41	19:35	19:38	21:33	21:36	
4	E2	Terminal A			07:17	09:10	09:12	11:06			13:02	14:55	14:57	16:50	16:52	18:47	18:49	20:45	20:47	22:42	
		Terminal B			08:12	08:15	10:07	10:10			13:57	14:00	15:51	15:54	17:47	17:50	19:45	19:48	21:43	21:46	
5	E1	Terminal A	05:34	07:25	07:27	09:19	09:21	11:14	11:16	13:09	13:11	15:04	15:06	16:59	17:01	18:57	18:59	20:55	20:57	22:51	
		Terminal B	06:28	06:31	08:21	08:24	10:15	10:18	12:11	12:14	14:06	14:09	16:01	16:04	17:57	18:00	19:55	19:58	21:52	21:55	
6	E2	Terminal A			07:36	09:29	09:31	11:24	11:26	13:19	13:21	15:14	15:16	17:09	17:11	19:07	19:09	21:04	21:06	23:00	
		Terminal B			08:31	08:34	10:25	10:28	12:21	12:24	14:16	14:19	16:11	16:14	18:07	18:10	20:05	20:08	22:01	22:04	
7 BI	E1	Terminal A	05:51	05:53	07:43	07:45	09:38	09:40				15:23	15:25	17:19	17:21	19:17	19:19	21:14	21:16		
		Terminal B	04:58	06:46	06:49	08:40	08:43	10:35				14:29	16:21	16:24	18:17	18:20	20:15	20:18	22:11		
8	E3	Terminal A		06:02	07:53	07:55	09:48	09:50	11:43	11:45	13:38	13:40	15:33	15:35	17:29	17:31	19:27	19:29	21:23	21:25	23:20
		Terminal B		06:56	06:59	08:50	08:53	10:46	10:49	12:40	12:43	14:36	14:39	16:30	16:33	18:28	18:31	20:24	20:27	22:21	22:24
9	E3	Terminal A	06:10	06:12	08:03	08:05	09:58	10:00	11:53	11:55	13:48	13:50	15:43	15:45	17:38	17:40	19:36	19:38	21:33	21:35	
		Terminal B	05:17	07:05	07:08	08:59	09:02	10:56	10:59	12:50	12:53	14:45	14:48	16:39	16:42	18:36	18:39	20:34	20:37	22:30	
10	E1	Terminal A		06:20	08:12	08:14	10:07	10:09	12:02			13:59	15:52	15:54	17:48	17:50	19:46	19:48	21:43	21:45	23:38
		Terminal B		07:14	07:17	09:09	09:12	11:05	11:08			14:54	14:57	16:49	16:52	18:46	18:49	20:44	20:47	22:39	22:42
11 BI	E3	Terminal A	06:29	06:31	08:22	08:24	10:17	10:19	12:12	12:14	14:07	14:09	16:02	16:04	17:58	18:00	19:56	19:58	21:52	21:54	
		Terminal B	05:36	07:24	07:27	09:19	09:22	11:14	11:17	13:09	13:12	15:04	15:07	16:59	17:02	18:56	18:59	20:54	20:57	22:49	
12	E2	Terminal A		06:40	08:31	08:33	10:26	10:28	12:21	12:23	14:16	14:18	16:11	16:13	18:08	18:10	20:06	20:08	22:02	22:04	23:59
		Terminal B		07:34	07:37	09:28	09:31	11:23	11:26	13:18	13:21	15:13	15:16	17:08	17:11	19:06	19:09	21:03	21:06	23:00	23:03

Figura 3.17. Asignación de empresas en una Matriz de Viajes. Fuente: Elaboración propia.



Capítulo 4

El Modelado Matemático como Herramienta de Cálculo para el Dimensionamiento de Rutas

4.1. Limitantes del procedimiento convencional de dimensionamiento de rutas de transporte

El cálculo convencional de dimensionamiento de rutas es uno de los más utilizados en los sistemas de transporte público debido a su simplicidad, es por ello que hasta el momento nadie se atreve a cuestionarlo. Sin embargo, el uso actual de técnicas más complejas para la planeación y operación del transporte han hecho evidentes las limitaciones que este método tiene por lo que es necesario considerar su mejoramiento o sustitución por alguno más preciso.

Las dos principales limitantes del procedimiento convencional que impiden su uso bajo esquemas de servicio como los que se adoptan en el Sistema Metrobús de la Ciudad de México son:

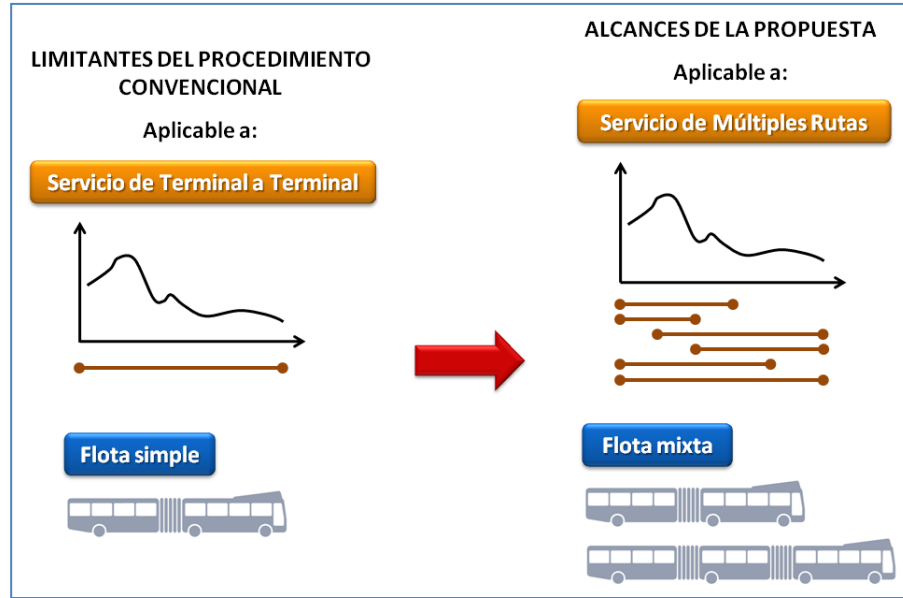
- I. **Sólo es útil para dimensionar corredores con servicio de terminal a terminal** (Metrobús maneja un conjunto de rutas de servicio para un mismo corredor).
- II. **Únicamente considera el uso de un tipo de vehículo** (Metrobús maneja una flota vehicular mixta con vehículos articulados y biarticulados).

Es por esto que se pretende generar un nuevo procedimiento de cálculo para el dimensionamiento de rutas que esté basado en el convencional y que sea capaz de cumplir con las exigencias actuales de los sistemas de transporte como Metrobús.

La **figura 4.1** muestra los alcances que deben lograrse en la transición del proceso convencional hacia uno más flexible que permita el dimensionamiento de múltiples rutas con flota vehicular mixta.

Figura 4.1. Limitantes del cálculo convencional de dimensionamiento y alcances que debe lograr la propuesta de cálculo.

Fuente: Elaboración propia.



4.2. ¿Cómo superar las limitantes del procedimiento convencional de dimensionamiento de rutas?

Para poder superar las limitantes antes descritas del cálculo convencional de dimensionamiento de rutas y generar uno que pueda aplicarse bajo esquemas operativos como los de la Línea 1 de Metrobús, es necesario redefinir el concepto de los siguientes parámetros:

1. **Diversificación del Volumen Horario de Máxima Demanda (VHMD):** Hay que recordar que la utilización de múltiples rutas en un mismo corredor de transporte permite diversificar la frecuencia de operación a lo largo del corredor por lo que es posible ajustar la oferta con la demanda de transporte evitando así el desperdicio de recursos por sobreoferta.

Puesto que dichas rutas se forman a través del establecimiento de terminales intermedias que dividen al corredor en tramos (tal y como se explicó en el capítulo 2), cada ruta dará servicio a diferentes tramos dependiendo de su cobertura. Hacer esto implica que para cada tramo tendrá que estimarse un determinado **VHMD**, por lo que la suma de los Volúmenes de Diseño (**P**) de las rutas que pasen por un determinado tramo deberá ser mayor o igual al **VHMD** asignado al mismo.

Por ejemplo, en el tramo “Indios Verdes (IV) – Buenavista (BV)” de la Línea 1 de Metrobús dan servicio las rutas A_1 , A_2 y A_7 , por lo que la suma de sus



respectivos volúmenes de diseño (**P**) deberá ser mayor o igual al **VHMD** presente en ese tramo con valor de 8,400 pph en sentido norte-sur (ver figura 4.2).

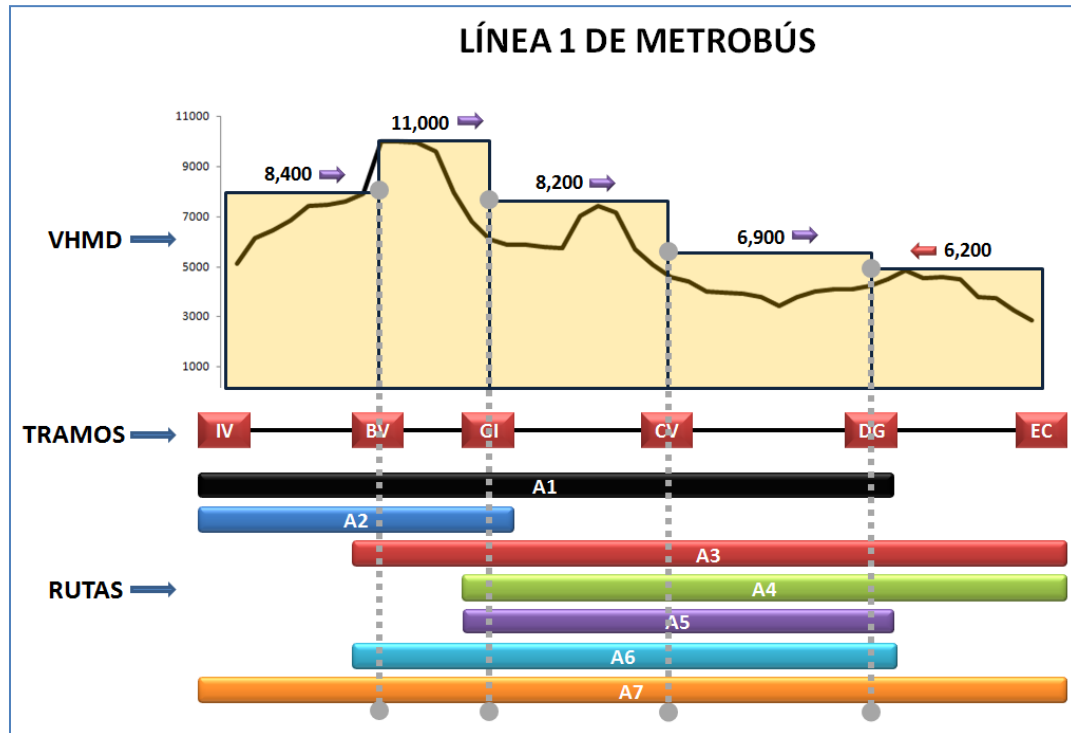


Figura 4.2. Diversificación del VHMD en la Línea 1 de Metrobús por el uso de múltiples rutas.
Fuente: Elaboración propia con información de Metrobús.

- 2. Redefinición del concepto de frecuencia de operación (f):** Utilizar flota vehicular mixta implica considerar que dicha flota estará integrada por vehículos de diferente capacidad, por lo que el cálculo de la frecuencia de operación (**f**) en una ruta de transporte deberá diferenciar la cantidad y el tipo de unidades que se ocupan. Por lo tanto, la frecuencia de operación estará integrada por **sub-frecuencias de operación**, es decir, el número de vehículos que, según su tipo o capacidad, pasen por un punto específico de una ruta en una hora.

La **figura 4.3** muestra la diferencia entre el punto de vista convencional de la frecuencia de operación y el punto de vista propuesto en la presente tesis, en donde éste último hace referencia al número y tipo de unidad que se utiliza a través de sub-frecuencias de operación.

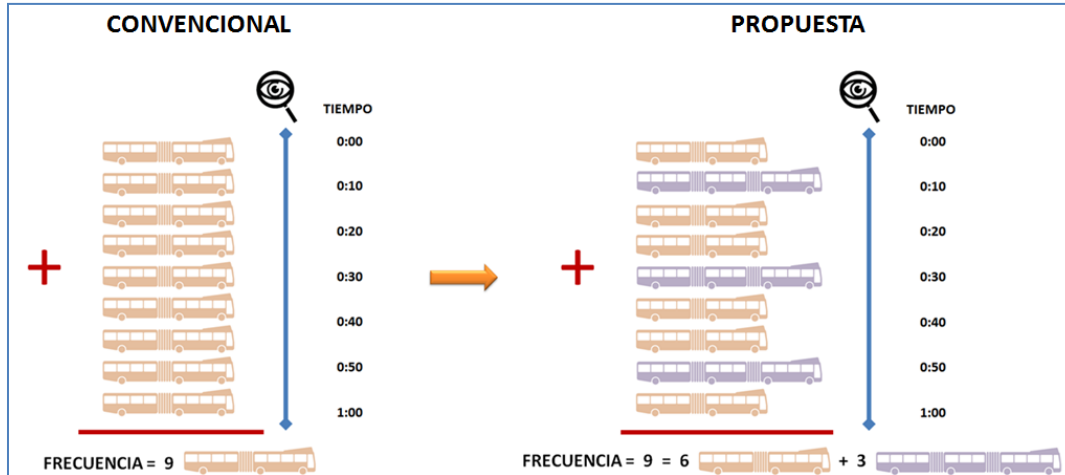


Figura 4.3. Diferencia entre el cálculo de la frecuencia en un proceso convencional de dimensionamiento y uno propuesto que considere el uso de flota vehicular mixta. Fuente: Elaboración propia.

Para superar las limitantes del procedimiento convencional de dimensionamiento de rutas de transporte, el parámetro conocido como frecuencia de operación (f) estará integrado por sub-frecuencias según los tipos de vehículo que se utilicen (x), y la suma de los volúmenes de diseño (P) de las rutas (n) que pasen por un tramo (m) del corredor tendrá que ser mayor o igual al volumen horario de máxima demanda de ese tramo ($VHMD_m$), tal y como se muestra en las **ecuaciones 4.1** y **4.2** respectivamente.

$$f = f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_x \dots \dots \dots \text{ (ecuación 4.1)}$$

$$\sum P_n \geq VHMD_m \quad \forall n \in m \dots \dots \dots \text{ (ecuación 4.2)}$$

Ahora lo que resta es integrar ambas ecuaciones para así poderlas considerar en un nuevo procedimiento de dimensionamiento, más flexible y capaz de dimensionar múltiples rutas en un corredor con flota vehicular mixta. Para ello, el cálculo del volumen de diseño (P) en una ruta se modificará de la siguiente manera:

- 1) Despejando el volumen de diseño (P) de la **ecuación 3.4** se tiene lo siguiente:

$$P = \alpha * C_v * f \dots \dots \dots \text{ (ecuación 4.3)}$$

donde:

- α = Factor de ocupación
- C_v = Capacidad vehicular [pas/veh]
- f = Frecuencia de operación [veh/hr]
- P = Volumen de diseño [pas/hr]



- 2) Si, por ejemplo, el parque vehicular de un sistema de transporte está conformado por dos tipos diferentes de vehículos, la frecuencia de operación en una ruta será:

$$f = f_1 + f_2 \dots \dots \dots \text{(ecuación 4.4)}$$

donde:

f = Frecuencia total de operación [veh/hr]

f_1 = Sub-frecuencia de operación 1 para los vehículos del tipo 1 [veh/h]

f_2 = Sub-frecuencia de operación 2 para los vehículos del tipo 2 [veh/h]

- 3) Sustituyendo la **ecuación 4.4** en la **ecuación 4.3** se obtiene que el volumen de diseño P es:

$$P = \alpha * C_v * (f_1 + f_2) \dots \dots \dots \text{(ecuación 4.5)}$$

- 4) Por último, debido a que los vehículos tienen distinta capacidad vehicular (C_v) cada sub-frecuencia de operación tendrá que ser multiplicada por la respectiva capacidad del vehículo que represente, por lo que la **ecuación 4.5** se modificará de la siguiente manera:

$$P = \alpha * (C_{v1} * f_1 + C_{v2} * f_2) \dots \dots \dots \text{(ecuación 4.6)}$$

donde:

P = Volumen de diseño [pas/hr]

α = Factor de ocupación

f_1 = Sub-frecuencia de operación 1 para los vehículos del tipo 1 [veh/h]

f_2 = Sub-frecuencia de operación 2 para los vehículos del tipo 2 [veh/h]

C_{v1} = Capacidad vehicular para los vehículos del tipo 1 [pas/veh]

C_{v2} = Capacidad vehicular para los vehículos del tipo 2 [pas/veh]

De esta forma, el volumen de diseño de una ruta estará dado en función de los tipos de unidad que integren la flota vehicular a través de sub-frecuencias de operación.

La **figura 4.4** muestra esquemáticamente el **cálculo propuesto** para el dimensionamiento de rutas, en ella es posible observar que el parámetro de partida ya no es el **VHMD** sino la frecuencia de operación (f), la cual está integrada por sub-frecuencias (f_x). El **VHMD** ahora es tomado como una **restricción** y se realiza un análisis integral del corredor de transporte dependiendo sus rutas y los tipos de vehículo que conformen su flota.

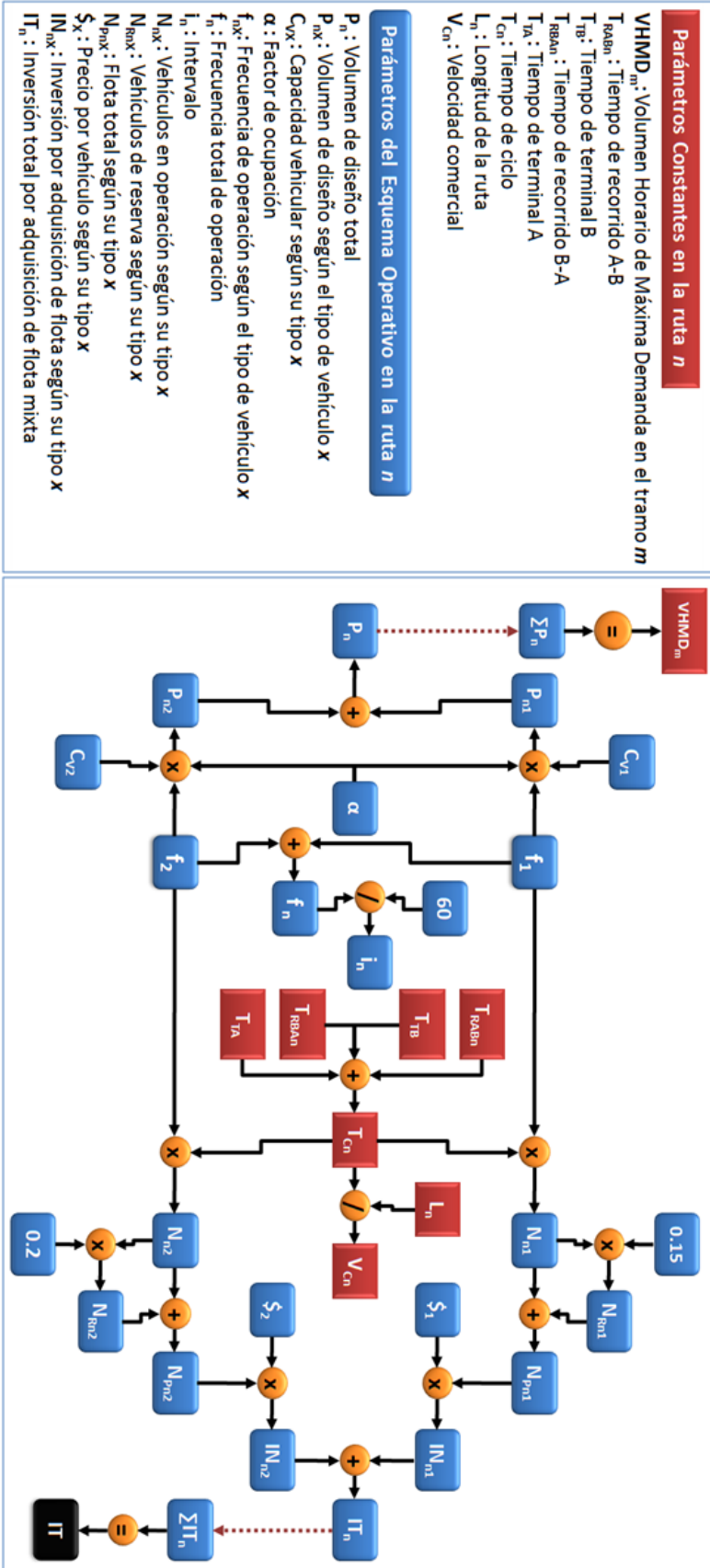


Figura 4.4. Cálculo propuesto para el dimensionamiento de múltiples rutas de transporte con flota vehicular mixta integrada por dos tipos de unidad.

Fuente: Elaboración propia.



Debido a la complejidad y cantidad de variables que involucra el cálculo propuesto, surge el reto de encontrar la manera de calcular los valores más adecuados de las sub-frecuencias de operación (f_x) que permitan satisfacer la demanda de transporte de la mejor manera posible. Es por ello que los encargados de la operación requieren de una herramienta que les permita considerar cada uno de estos factores con el objeto de ofrecer un servicio acorde a las necesidades de los usuarios, optimizar el uso de la flota vehicular, minimizar los costos de operación y formular diversos escenarios para ayudar en la toma de decisiones ante futuros proyectos o cambios significativos en el sistema y en su demanda.

4.3. Procedimiento propuesto para el dimensionamiento de rutas de transporte

El dimensionamiento de múltiples rutas de transporte con flota vehicular mixta debe ser afrontado como un **problema de optimización**, pues se debe garantizar la mejor asignación posible de vehículos a un conjunto de rutas para que se cumplan una serie de restricciones y, que a su vez, sea aplicable en múltiples escenarios.

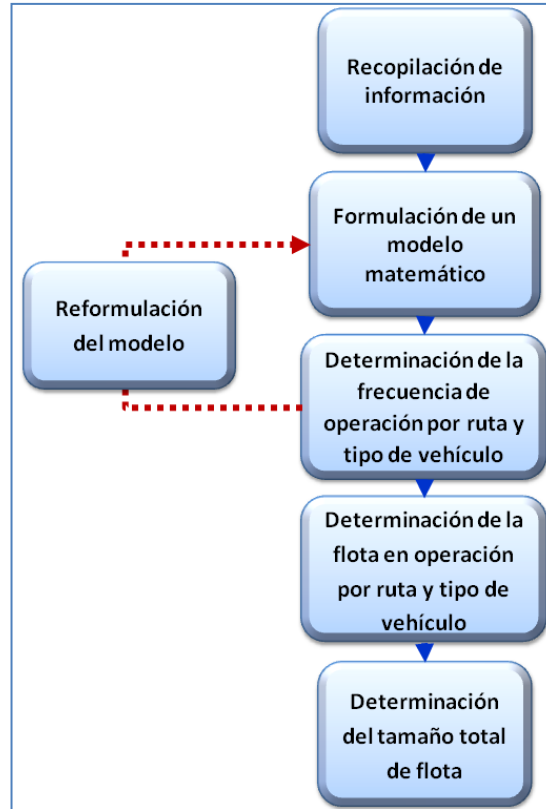
Alceda (1997) sugiere que un problema con estas características puede ser tratado mediante el uso de computadoras a través de modelos o programas propios para el objetivo buscado, lo que permitirá realizar una multitud de cálculos de una manera controlada que intenten reproducir el sistema de estudio de una manera realista. De igual manera, Wright & Hook (2007) mencionan que el proceso de modelación del transporte público puede contribuir a determinar la forma óptima de adecuar la oferta (rutas y vehículos) a la demanda de transporte. Así mismo, señalan que la modelación puede ayudar a proyectar condiciones futuras de los sistemas de estudio en diversos escenarios, lo que permite prever los programas de crecimiento, analizar y evaluar proyectos y determinar el orden de prioridad de las estrategias de inversión y gestión de recursos.

Es por ello que se propone que el procedimiento convencional de dimensionamiento de rutas de transporte se modifique para que incluya la formulación de modelos matemáticos, herramienta que permitirá realizar un análisis integral (por ruta y por tipo de vehículo) del corredor en cuestión, tal y como se muestra en la **figura 4.5**.



Figura 4.5. Procedimiento propuesto de dimensionamiento de rutas de transporte con flota vehicular mixta.

Fuente: Elaboración propia.



De esta manera, la frecuencia de operación ya no se determinará por medio del cálculo directo sino a través de la representación del problema mediante modelos matemáticos que serán resueltos con algoritmos de *Investigación de Operaciones*.

Por lo tanto, es necesario que la información básica que sirve de “*entrada*” al modelo no sólo incluya los parámetros constantes para el dimensionamiento de rutas, sino también, información relacionada a las características físicas del corredor, a la situación actual y deseada del sistema e, inclusive, algunos parámetros de carácter financiero; es decir, toda aquella información relevante del sistema de estudio que permita comprender y formular los componentes principales de un modelo matemático. La **figura 4.6** muestra un diagrama de caja negra sobre la formulación de un modelo que permita determinar las frecuencias de operación en corredores de transporte con múltiples rutas y flota vehicular mixta que mejor se ajusten a la demanda de transporte.

El tema de la modelación matemática se describe de manera detallada en lo que resta del presente capítulo, mientras que la formulación y aplicación del modelo matemático para el dimensionamiento de rutas con flota vehicular mixta en Sistemas BRT se desarrolla en el quinto y último capítulo de la tesis.

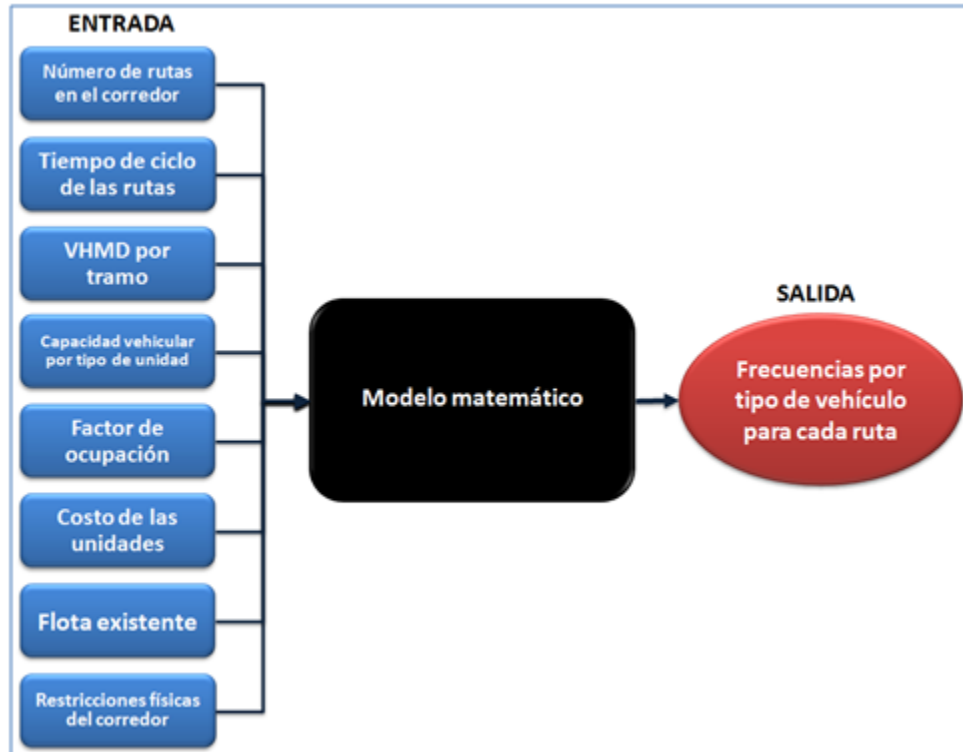


Figura 4.6. Diagrama de caja negra sobre la formulación de un modelo matemático para dimensionar rutas de transporte con flota vehicular mixta. Fuente: Elaboración propia.

4.4. Modelado matemático

Un **modelo**, según Ortúzar (2008), es una representación simplificada de la realidad o sistema de interés, el cual se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento. Para propósitos de la presente tesis, se utilizará el concepto de **modelos matemáticos**, los cuales intentan replicar un sistema y su comportamiento por medio de **ecuaciones matemáticas** basadas en ciertas **hipótesis teóricas**.

Debido a que un modelo se formula según las características del problema de estudio, su valor se limita a un conjunto de problemas que satisfagan ciertas condiciones específicas, es decir, un modelo sólo es válido según el contexto donde se va a utilizar. Es por ello que para su formulación, calibración y uso, se necesita conocer profundamente el sistema y el problema asociado al mismo.

4.4.1. Etapas en el uso de modelos matemáticos

En la **Investigación de Operaciones**, rama de las matemáticas enfocada en la resolución de problemas de optimización de recursos mediante el uso de modelos



matemáticos, se establecen las siguientes etapas (**figura 4.7**) para el desarrollo y aplicación de un modelo matemático (Taha (2004), Hillier (2002) y Bronson (1993)):

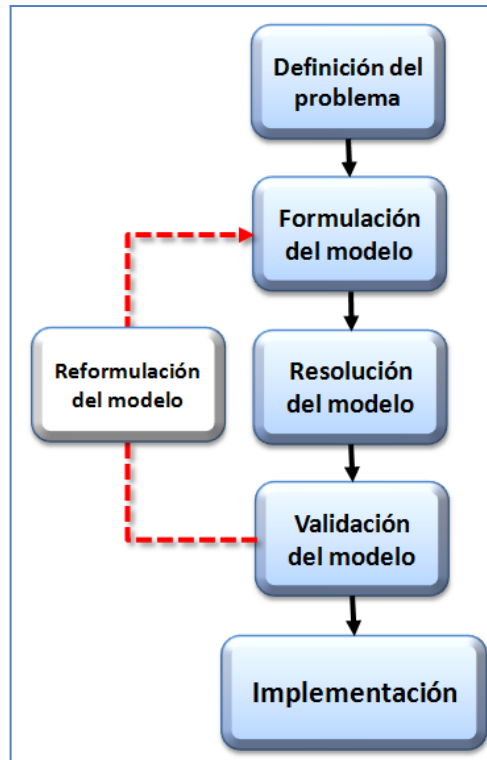


Figura 4.7. Etapas generales en el uso de un modelo matemático.

Fuente: elaboración propia.

Etapa 1. Definición del problema: Consiste en recolectar y analizar información relevante acerca del sistema y su problema con el fin de conocer sus características y lograr un entendimiento claro de los mismos, esto permite definir los alcances que se pretenden lograr con la modelación.

Etapa 2. Formulación de un modelo que represente al problema: Esta etapa se refiere a la descripción del problema mediante la construcción de un modelo matemático que a través del uso de ecuaciones e inecuaciones matemáticas represente, en esencia, los siguientes tres elementos del problema: 1) las variables de decisión o alternativas de solución, 2) el objetivo de estudio y 3) las restricciones bajo las cuales funciona el sistema modelado. Con esto es posible definir el tipo y tamaño del problema y poder así elegir la técnica más adecuada para su solución.

Etapa 3. Resolución del modelo: Dependiendo de las características del modelo creado se elegirá la técnica de Investigación de Operaciones más conveniente (**ver tabla 4.1**) con la que a través del uso de algoritmos se obtendrá una solución. Debido a la cantidad de cálculos iterativos en el manejo de algoritmos, es



recomendable hacer uso de software especializado como: TORA, Excel Solver, WinQSB, LINDO, LINGO, CPLEX, GAMS, etc.

Tabla 4.1. Lista parcial de las técnicas de Investigación de Operaciones utilizadas en la solución de modelos matemáticos.

Técnica	Diseñada para:
Programación Lineal	Modelos con funciones objetivo y restricciones estrictamente lineales.
Programación Lineal Entera	Modelos con funciones objetivo y restricciones estrictamente lineales pero donde las variables de decisión toman valores enteros.
Programación Dinámica	Modelos que debido a su complejidad se tienen que descomponer en sub-problemas más pequeños para su solución.
Programación de Red	Problemas que se pueden modelar como una red de flujo.
Programación no Lineal	Modelos donde las funciones del modelo son no lineales.
Heurísticas	Modelos tan complejos que es imposible resolverlos con cualquiera de los algoritmos disponibles de optimización, donde se abandona la búsqueda de una solución óptima para sólo buscar una solución factible.

Fuente: Taha (2004).

Etap 4. Validación y refinamiento del modelo: Una vez que se ha logrado obtener una solución es necesario comprobar que el modelo propuesto cumpla su objetivo verificando que los resultados sean validos y tengan coherencia con el sistema de estudio. En esta etapa es bueno poner a prueba el modelo generado aplicándolo en diversos escenarios, esto es de gran ayuda pues permite identificar y corregir las fallas que puedan presentarse e, inclusive, reformular el modelo matemático con el fin de mejorar la confiabilidad del mismo.

Etap 5. Implementación de la solución del modelo: Si el modelo es validado y logra representar considerablemente al sistema de estudio y su problema, los resultados deben traducirse a instrucciones claras de operación que faciliten su implantación real. Esta etapa podría incluir jornadas de capacitación para los usuarios del modelo.



Dichas etapas se irán desarrollando implícitamente a lo largo de la tesis, hasta el momento se ha pretendido cumplir con la primera de ellas pues se han descrito la mayoría de las características del caso de estudio y su problema. Pero antes de definir las “*hipótesis teóricas*” que ayuden a formular las ecuaciones matemáticas para la representación del sistema en un modelo matemático, es necesario conocer las características de los problemas y las técnicas de Investigación de Operaciones que mejor se adecuen al problema: el dimensionamiento de rutas de transporte con flota vehicular mixta.

A continuación se describirán, de manera general, las características de los problemas de optimización y la técnica de modelación más popular, la Programación Lineal.

4.4.2. Problemas de optimización

En un problema de optimización se busca la mejor manera posible, según un objetivo definido, de distribuir o asignar recursos finitos entre actividades que “compiten” por ellos. Para hacer frente a este tipo de problemas se recurre al uso de modelos matemáticos que representen al sistema y busquen maximizar o minimizar algún aspecto relevante del mismo y que dependa directa o indirectamente de los recursos en cuestión. Dicha representación deberá estar conformada por los siguientes tres elementos (Taha (2004), Hillier (2002) y Bronson (1993)):

- **Variables de decisión:** Son incógnitas que deben ser determinadas a partir de la solución del modelo, representan las decisiones o alternativas cuantificables que pueden tomarse en la búsqueda del objetivo deseado. Dichas variables pueden ser independientes entre sí o estar relacionadas a través de una o más restricciones.
- **Función objetivo:** Es una función matemática de las variables de decisión que representa el objetivo o la característica del sistema que se desea optimizar.
- **Restricciones:** Se refieren al conjunto de requerimientos, limitantes y relaciones (explícitas e implícitas) entre las variables de decisión que se deben satisfacer para dar sentido a la solución del problema, con ello es posible acotar los resultados del modelo a un conjunto de valores admisibles o factibles según la naturaleza del problema en cuestión. Dichas



restricciones se expresan en términos matemáticos en forma de ecuaciones o inecuaciones.

Definir de manera correcta las variables de decisión es esencial para el buen desarrollo de un modelo matemático pues dicha tarea facilitará la construcción de la función objetivo, las restricciones y la identificación de la técnica más adecuada para la resolución del problema. Una vez determinados los tres elementos del modelo matemático, se suelen presentar como se muestra en el **grupo de ecuaciones 4.7**.

Optimizar:

$$(\text{max o min}) z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Sujeto a:

$$\left. \begin{array}{l} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \dots \dots \dots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \leq \\ = \\ \geq \end{array} \left\{ \begin{array}{l} b_1 \\ b_2 \dots \dots \text{(grupo de ecuaciones 4.7)} \\ \dots \\ b_m \end{array} \right.$$

donde:

- x_i [$i = 1, 2, \dots, n$] representa a las variables de decisión;
- $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ representa a la función objetivo;
- cada $g_j(x_1, x_2, \dots, x_n)$ [$j = 1, 2, \dots, m$] representa las restricciones y
- b_j [$j = 1, 2, \dots, m$] son constantes.

Resolver un problema de optimización a través de un modelo matemático consiste en encontrar el valor que deben tomar las variables de decisión para satisfacer el conjunto de restricciones dadas de manera que se maximice o minimice, según sea el caso, la función objetivo.

Según Taha (2004) una solución del modelo es **factible** si satisface todas las restricciones y es **óptima** si, además de ser factible, produce el mejor valor (máximo o mínimo) de la función objetivo. Puede darse el caso de que exista un cierto número de soluciones igualmente óptimas, en donde cualquiera de ellas se puede emplear.

La resolución de un modelo matemático para problemas de optimización se logra mediante la aplicación de diversas técnicas de *Investigación de Operaciones* (según las características del modelo) a través del uso de programas de cómputo



especiales. La Programación Lineal es una de las técnicas más populares y será utilizada en la presente tesis debido a que los *parámetros de operación* pueden expresarse en forma línea a partir de las sub-frecuencias de operación (ver figura 4.4).

4.4.2.1. Programación lineal (PL) y programación lineal entera (PLE)

La **programación lineal (PL)** se aplica a modelos de optimización en los que las funciones objetivo y las restricciones son estrictamente lineales, es decir, un modelo matemático es lineal si:

$$\begin{aligned} \text{función objetivo: } f(x_1, x_2, \dots, x_n) &= c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \\ \text{cada restricción: } g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) &= a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \end{aligned}$$

donde c_i y a_{ji} [$i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$] son constantes conocidas.

Por lo tanto, un modelo matemático de **PL** se puede representar como se muestra en el **grupo de ecuaciones 4.8**.

Optimizar:

$$(\max \text{ o } \min) z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

Sujeto a las restricciones:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n (\leq, \geq \text{ ó } =) b_1 & \dots \dots \text{(grupo de ecuaciones 4.8)} \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n (\leq, \geq \text{ ó } =) b_2 & \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots & \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n (\leq, \geq \text{ ó } =) b_m & \end{aligned}$$

Según las características del problema en cuestión, en ocasiones es necesario considerar **restricciones adicionales u ocultas** las cuales no se estipulan explícitamente en el problema pero se hacen evidentes cuando se plantea el modelo. Generalmente se refieren a características físicas de las variables de decisión, en especial, condiciones de no negatividad y/o de ser números enteros.

Restricciones adicionales:

No negatividad

$$x_i \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

Variables enteras

$$x_i = \text{Número entero} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$



En el caso de que algunas o todas las variables de decisión en un modelo de **PL** estén restringidas a tener valores enteros, dicho modelo será considerado como un problema de **programación lineal entera (PLE)**.

4.4.2.2. Resolución de problemas de PL y PLE

Generalmente, la solución de problema de **PL** o **PLE** se obtiene mediante la aplicación de algoritmos de *Investigación de Operaciones*, un algoritmo es un procedimiento que establece un conjunto de operaciones, reglas o serie de pasos, que se aplican de manera iterativa al problema para encontrar su solución.

El **Método Símplex** es uno de algoritmos más comunes que se aplica en la resolución de problemas de **PL**. Para poder utilizar dicho método se debe expresar el modelo matemático en su *forma estándar*, es decir, convertir todas las restricciones representadas como inecuaciones en relaciones de igualdad. Después, se manipulan dichas ecuaciones en una forma sistemática mediante un procedimiento iterativo basado en el álgebra matricial y el proceso de eliminación de Gauss-Jordan para resolver sistemas de ecuaciones lineales.

En el caso de problemas de **PLE** se puede obtener una primera aproximación de la solución mediante el empleo del *Método Símplex* (ignorando el requerimiento de variables enteras), si dicha solución no es entera, como sucede en la mayoría de los casos, se pueden redondear los componentes de la primera aproximación a los enteros factibles más próximos y obtener una segunda aproximación. Un procedimiento más eficiente que el redondeo de las soluciones del método símplex en la resolución problemas de **PLE** es el algoritmo de **Ramificación y Acotación** que, según Hillier (2002), se sustenta en la idea básica de: “*divide y vencerás*”.

Debido a que es sumamente complicado resolver directamente un problema entero, éste se divide en sub-problemas cada vez más pequeños. La división (**ramificación**) se hace mediante una partición del conjunto completo de soluciones factibles (que se obtienen aplicando el *Método Símplex*) en subconjuntos más pequeños que conserven todas las posibles soluciones enteras del problema original. El valor de la función objetivo para la primer solución entera que se encuentre al ejecutar iterativamente la bifurcación, se **acota** como la “*mejor solución*” para el problema y todos los subconjuntos cuyas soluciones, enteras o no, den valores de la función objetivo que indiquen que no es posible que contengan una solución mejor, se descartan. Si durante el proceso se descubre una nueva solución que ofrezca un mejor valor de la función objetivo que el inicial,



éste se vuelve a acotar como la nueva “*mejor solución*”. Dicho procedimiento se continúa realizando hasta que ya no sea posible encontrar una solución más efectiva, por lo que esta última será considerada como la solución óptima al problema entero en cuestión (Bronson 1993).

Debido a que el propósito de la presente tesis no es describir a detalle los algoritmos mencionados sino mostrar su aplicación en el análisis operativo de rutas de transporte, se recomienda al lector que desee conocer más a fondo dichos procedimientos consultar la bibliografía pertinente al tema de *Investigación de Operaciones* (Taha (2004), Hillier (2002) y Bronson (1993)).

4.4.3. Resolución de problemas de optimización en hojas de cálculo

Como se mencionó anteriormente, en la práctica los algoritmos para resolver problemas de PL y PLE se ejecutan mediante el uso de computadoras. Actualmente existe un amplio número de paquetes de software, lenguajes de modelado y complementos para hojas de cálculo que permiten ahorrar tiempo valioso en el análisis y resolución de problemas.

En ocasiones, el uso de paquetes de software requiere de una inversión monetaria para su adquisición así como de capacitación para el personal que lo va a manipular. Lo mismo sucede cuando se enfrenta a problemas demasiado grandes, en donde es necesario utilizar lenguajes de modelado para facilitar la formulación de modelos con cientos o miles de variables y restricciones, tales como GAMS, MPL o LINGO.

Por otro lado, las hojas de cálculo están a disposición de cualquier persona que tenga una computadora. Debido a que son una herramienta muy versátil y relativamente sencilla de utilizar, las hojas de cálculo son utilizadas de manera común en empresas públicas y privadas así como en instituciones académicas y de investigación; es por ello que algunos desarrolladores de software han creado complementos o solucionadores que permiten aplicar algoritmos de *Investigación de Operaciones* en la resolución de problemas de optimización formulados en hojas de cálculo.

Las hojas de cálculo son programas que permiten manipular datos numéricos y alfanuméricos dispuestos en forma de tablas compuestas por celdas, las cuales se suelen organizar en una matriz bidimensional de filas y columnas. A pesar de que existen muchísimos paquetes de hojas de cálculo en el mercado (**ver tabla 4.2**), Microsoft Office Excel es uno de los más populares.



Tabla 4.2. Lista de hojas de cálculo en el mercado.

Hoja de cálculo	Integrada en:
Calc	OpenOffice
Corel Quattro Pro	WordPerfect
Gnumeric	Gnome Office
KSpread	KOffice de Linux
Lotus 1-2-3	Lotus SmartSuite
Microsoft Excel	Microsoft Office
Numbers	iWork de Apple
StarOffice Calc	StarOffice

Fuente: Elaboración propia.

Para problemas sencillos (sin un gran número de variables de decisión), las hojas de cálculo como Microsoft Office Excel proporcionan una manera muy conveniente de analizar, formular y resolver problemas de **PL** o **PLE**. Usar hojas de cálculo para representar modelos matemáticos, permite trasladar el problema a un entorno más asequible para el decisor pues en ellas es sencillo formular los componentes de un modelo matemático, ver de inmediato los resultados de los cambios de las variables de decisión y aplicar algoritmos para encontrar una solución óptima mediante el uso de algún solucionador.

Entre los solucionadores más comunes encontramos a **Excel Solver** y a **What'sBest!**, desarrollados por Frontline Systems y LINDO Systems, respectivamente. Estos solucionadores son capaces de resolver modelos bastante grandes con miles de variables de decisión, sin embargo, aplicar un modelo de tales dimensiones en una hoja de cálculo resulta muy difícil de manejar por lo que, en dicho caso, es necesario usar software con lenguajes de modelado que permitan importar y exportar datos y resultados al formato de una hoja de cálculo.

A continuación se describe el uso de cada uno de los solucionadores antes mencionados para la hoja de cálculo *Microsoft Office Excel 2007*.

4.4.3.1. Excel Solver

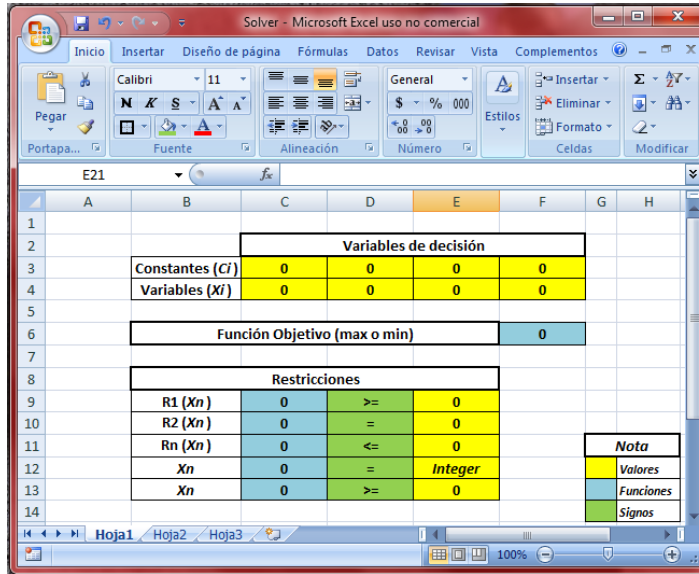
Microsoft Office Excel incluye una herramienta de análisis llamada **Solver**, la cual aplica algoritmos para encontrar una solución a un problema de optimización. Antes de poder utilizar dicho solucionador para resolver un problema de **PL** o **PLE**, es necesario formular el modelo matemático correspondiente y representarlo en una hoja de cálculo. No existe un formato estándar para dicha representación pues depende de la habilidad de la persona que realizará y analizará el modelo matemático, aun así es importante que se asignen celdas específicas (que estén relacionadas entre sí directa o indirectamente) para cada variable de decisión, la función objetivo y cada restricción funcional.

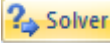


La **figura 4.8** muestra un ejemplo de la representación de un modelo matemático en una hoja de cálculo.

Figura 4.8. Formulación de un modelo matemático en una hoja de cálculo de Microsoft Office Excel

Fuente: Elaboración propia.



Una vez representado el modelo, se ejecuta el complemento Solver que se encuentra en la pestaña de Excel *Datos/Análisis/Solver* cuyo icono es el siguiente  y que, de no encontrarse, se activa como cualquier otro complemento de Excel. Al correrlo, se abrirá la ventana “*Parámetros de Solver*” que se muestra en la **figura 4.9**, la cual ha sido dividida en seis partes para poder explicar su funcionamiento.

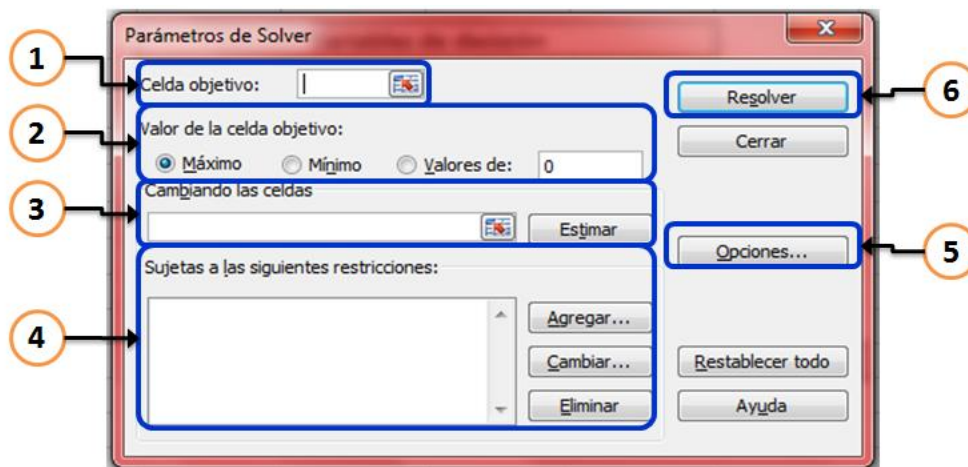



Figura 4.9. Ventana principal de Excel Solver Fuente: Elaboración propia con imágenes de Excel Solver.

Antes de comenzar a describir cada uno de los campos de la ventana “*Parámetros de Solver*” es importante mencionar que *Solver*, al igual que muchas herramientas



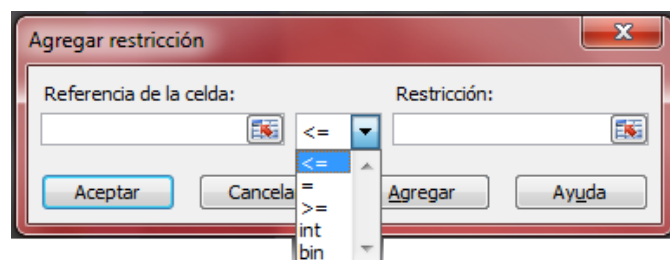
de análisis en Excel, requiere conocer la ubicación exacta de las celdas donde se localizan los componentes de un modelo en una hoja de cálculo, lo cual se puede hacer manualmente escribiendo las direcciones de las celdas o utilizando el siguiente icono  y haciendo clic en ellas.

La descripción básica de la utilización del complemento *Excel Solver* en la resolución de problemas de PL y PLE, se basa en la **figura 4.9** y es la siguiente:

1. La “*Celda objetivo*” se refiere a la celda de la hoja de cálculo que representa el valor de la función objetivo, la cual debe contener una fórmula.
2. Dependiendo del problema, en el campo “*Valor de la celda objetivo*” se selecciona “*Máximo*” si se busca maximizar la función objetivo, “*Mínimo*” si se quiere minimizarla o se escribe un valor en “*Valores de*” si se requiere un valor específico de la función.
3. El apartado de “*Cambiando las celdas*” hace referencia a las celdas de la hoja de cálculo que contienen los valores de las variables de decisión. Se puede utilizar el botón “*Estimar*” para que *Solver* proponga automáticamente dichas celdas, pero se aconseja que se asignen manualmente siguiendo el modelo matemático ya formulado.
4. Para añadir las restricciones del modelo se utiliza el botón “*Agregar*” en el campo “*Sujetas a las siguientes restricciones*”, con lo que aparecerá la ventana “*Agregar restricción*” que se muestra en la **figura 4.10**.

Figura 4.10. Ventana para agregar restricciones en Excel Solver

Fuente: Microsoft Office Excel Solver.



En “*Referencia de la celda*” se indica la celda de la hoja de cálculo que contenga la fórmula de la restricción, después se elige el signo de la misma (\leq , $=$ o \geq) y en “*Restricción*” se señala la celda o valor al que está sujeta la restricción. Si existe más de una restricción, se da clic en “*Agregar*” para que aparezca de nuevo la ventana “*Agregar restricción*”. Si se trata de un problema de PLE se agrega una restricción adicional para todas o cada una de las variables de decisión en donde, en vez de elegir un signo, se elige



“*int*” para indicar que deben tomar valores enteros, o “*bin*” si se trata de un problema binario. Si ya no hay más restricciones que agregar se da clic en “*Aceptar*” para regresar a la ventana “*Parámetros de Solver*”, la cual resumirá el modelo completo en términos de la hoja de cálculo (ver figura 4.11).

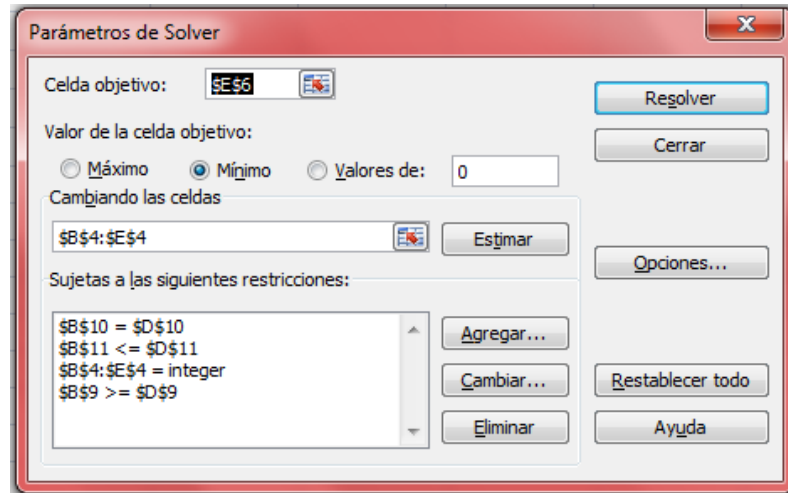


Figura 4.11. Resumen del modelo en términos de la hoja de cálculo en Excel Solver
Fuente: Microsoft Office Excel Solver.

5. Antes de resolver un modelo de PL o PLE con *Excel Solver*, se deben modificar algunas opciones que vienen por *default* en el complemento para indicar la manera en la que se resolverá el modelo, por lo que se da clic en “*Opciones*” para acceder a la siguiente ventana.

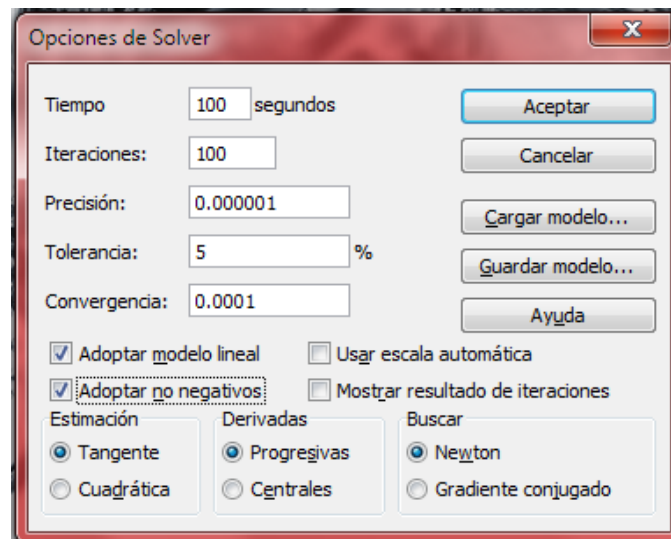


Figura 4.12. Opciones de Solver. Fuente: Microsoft Office Excel Solver.

Las opciones más importantes que deben activarse son: “*Adoptar modelo lineal*” y “*Adoptar no negativos*”, para regresar a la ventana “*Parámetros de*



Solver” se da clic en “*Aceptar*”. Con esto se le indica al solucionador que se trata de un problema de PL con restricciones de no negatividad.

6. Por último, se hace clic en “*Resolver*” para ejecutar *Solver* y encontrar una solución óptima al problema. Después de unos segundos aparecerá la ventana “*Resultados de Solver*” la cual indicará el estatus de los resultados a los que se llegó. Si *Solver* encontró una solución óptima, se mostrará un mensaje como el que se aprecia en la **figura 4.13**. Finalmente, se activa la opción “*Utilizar solución de Solver*” para mostrar en la hoja de cálculo los valores óptimos de las variables de decisión, el valor de la función objetivo y los resultados de cada una de las restricciones asignadas.

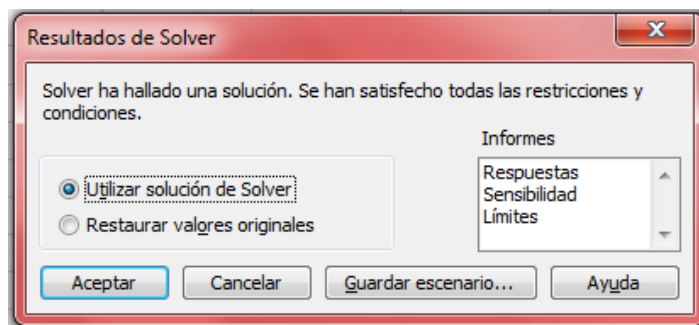


Figura 4.13. Ventana de Resultados de Solver

Fuente: Microsoft Office Excel Solver

Si el modelo no tiene soluciones factibles o una solución óptima, se indicará con los siguientes mensajes: “*Solver no pudo encontrar una solución factible*” o “*El conjunto de valores en las celdas no converge*”. Adicionalmente, se pueden obtener informes sobre los resultados seleccionando el campo “*Informes*” de la ventana “*Resultados de Solver*”.

La herramienta de análisis *Solver*, que viene integrada en *Microsoft Office Excel*, es un solucionador **básico** que ayuda a resolver modelos con un máximo de 200 variables de decisión y un número ilimitado de restricciones. Desafortunadamente, en ocasiones el solucionador pudiera llegar a tardarse demasiado en la resolución de un modelo de PLE, es por ello que se dispone de versiones comerciales más rápidas y poderosas desarrolladas por la misma empresa, Frontline Systems, llamadas *Premium Solver* y *Premium Solver Pro*.

4.4.3.2. What’sBest!

What’sBest! es un complemento para *Microsoft Office Excel* que permite resolver modelos de optimización en una hoja de cálculo. A diferencia de *Excel Solver*, *What’sBest!* es un solucionador comercial más eficiente y poderoso, en su versión de prueba es posible resolver modelos de hasta 300 variables de decisión (30



enteras) y 150 restricciones. De igual manera que *Solver*, antes de utilizar *What'sBest!* es necesario formular un modelo matemático y representarlo en una hoja de cálculo (**ver figura 4.8**).

Una vez instalado el solucionador en Excel, se podrá acceder a él a través de la pestaña “*Complementos*”, tal y como se muestra en la **figura 4.14** que, al igual que *Solver*, de no encontrarse se activará como cualquier otro complemento de Excel.

What'sBest! ofrece dos métodos interactivos para resolver modelos de PL o PLE en hojas de cálculo, el primero se basa en una “*Barra de herramientas*” la cual permite tener un rápido acceso a los comandos de mayor frecuencia de uso. El segundo consiste en el uso de un “*Menú (WB!)*” que proporciona acceso a toda la gama de comandos del solucionador.

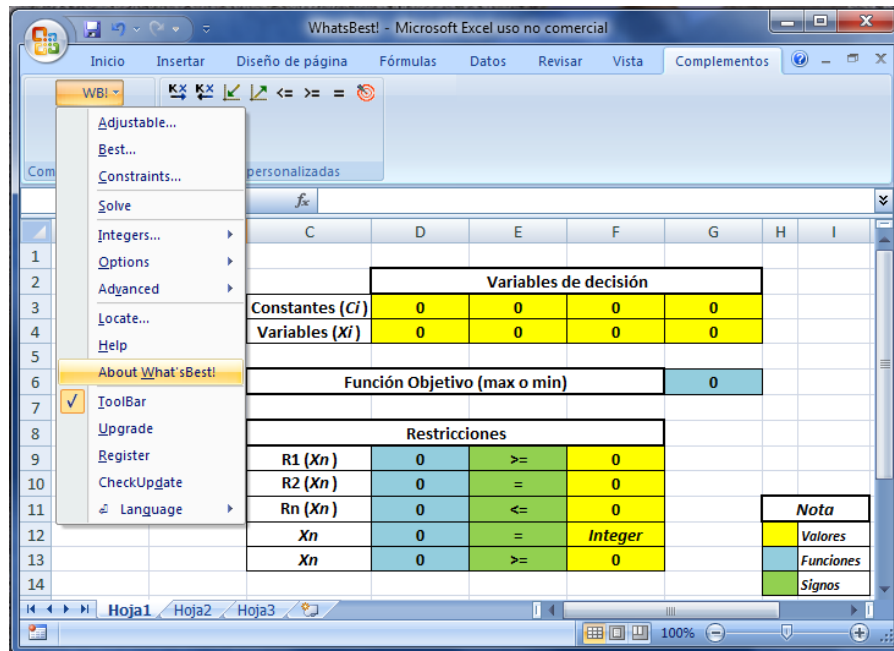


Figura 4.14. Complemento What'sBest! en Microsoft Office Excel. Fuente: Elaboración propia.

La **figura 4.15** muestra el *Menú (WB!)* y la ubicación de la *Barra de herramientas de What'sBest!* Así mismo, presenta un cuadro comparativo entre ambos métodos, señalando los principales comandos del solucionador que se utilizan para definir y resolver un modelo matemático.



Modelo matemático	Menú (WB!)	Barra de herramientas What'sBest!
Variables de decisión	Adjustable...	
Variables Enteras	Integers...	-
Función Objetivo	Best...	
Restricciones	Constraints...	
Resolver	Solve	

Figura 4.15. Comandos principales de What'sBest! en el Menú (WB!) y Barra de herramientas. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describirá el uso del *Menú (WB!)* mientras que en el **Anexo I** se puede encontrar la descripción del uso de la *Barra de herramientas* de este solucionador.

Aunque el menú de *What'sBest!* permite tener acceso a todos los comandos del solucionador, en este caso sólo se describirán aquellos que son básicos en la resolución de modelos de PL o PLE. Al igual que *Solver*, *What'sBest!* requiere conocer la ubicación exacta de las celdas dónde se localizan los componentes de un modelo matemático en una hoja de cálculo, lo cual puede hacerse manualmente escribiendo las direcciones de las celdas o utilizando el siguiente icono y haciendo clic en ellas.

- **Comando “Adjustable”:** Al seleccionar este comando aparecerá la ventana que se muestra en la **figura 4.16** con la cual es posible definir las celdas de la hoja de cálculo que contienen a las variables de decisión, esto se hace seleccionando “*Make Adjustable*”, con lo que el color del texto de la celda cambiará a azul.

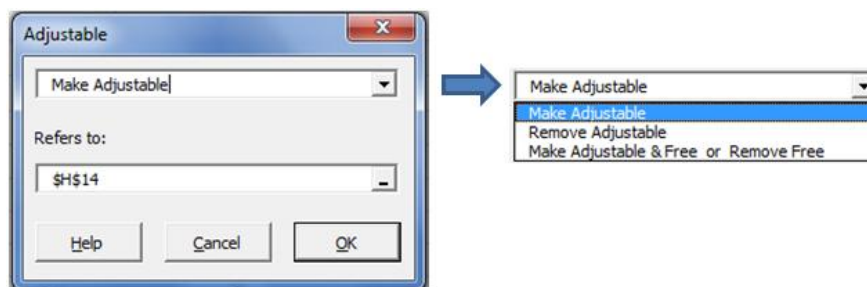


Figura 4.16. Ventana “Adjustable” para definir variables de decisión en What'sBest!

Fuente: LINDO Systems.




Es posible deshacer la selección de las celdas que se hayan definido erróneamente como variables de decisión eligiendo “*Remove Adjustable*”. Puesto que *What’sBest!* asume por *default* que todas las variables de decisión son mayores o iguales a cero, en el caso de que un modelo matemático pueda aceptar variables negativas se debe seleccionar la opción “*Make Adjustable & Free or Remove Free*” para definir las como variables libres.

- **Comando “Best”:** La ventana correspondiente a este comando se presenta en la **figura 4.17**, en ella es posible especificar la celda que representa a la función objetivo en la hoja de cálculo.



Figura 4.17. Ventana “Best” para definir la función objetivo en *What’sBest!* Fuente: LINDO Systems.

En el caso de buscar que el valor de la función objetivo sea el mínimo, se selecciona “*Minimize*” y, por el contrario, se selecciona “*Maximize*” si se buscara el máximo valor. En ambos casos el color de fondo de la celda objetivo cambia a azul. La opción “*None*” se utiliza para deshacer la selección de la celda marcada como función objetivo, cuyo fondo regresa a su color original (blanco).

- **Comando “Constraints”:** Este comando se utiliza en la definición de cada una de las restricciones del modelo matemático en una hoja de cálculo, para ello es recomendable destinar tres celdas seguidas en una misma fila para representar cada restricción. La primer celda debe contener la fórmula de la restricción, la cual debe especificarse en el campo “*Left Hand Side (LHS)*” de la ventana del comando (**ver figura 4.18**). La segunda celda va a contener el signo de la restricción (<=, =, >=), dicho signo se elige con el siguiente icono  y la celda que lo contiene se introduce en el campo “*Stored in*”. La opción “*None*” sirve para deshacer la asignación de los signos. La última celda debe contener el valor al cual está sujeta la restricción, la cual se especifica en el campo “*Right Hand Side (RHS)*”.

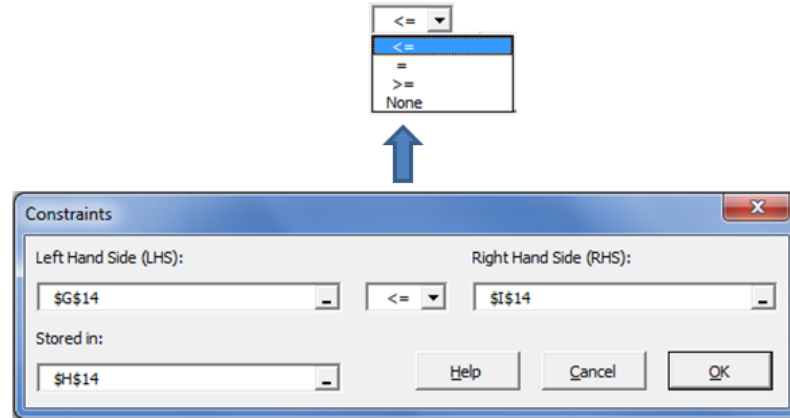


Figura 4.18. Ventana “Constraints” para definir restricciones en *What’sBest!* Fuente: LINDO Systems.

A diferencia de *Solver*, en *What’sBest!* no se pueden definir las restricciones de manera continua pues al dar OK se cierra la ventana del comando, por lo que se debe repetir el procedimiento antes descrito para seguir agregando restricciones.

- **Comando “Integers.../Integer-Binary”:** En el caso de trabajar con problemas de PLE, se selecciona este comando para definir todas aquellas celdas que contengan a las variables de decisión que deben tomar valores enteros, las cuales se indican en el campo “Refers to” de la ventana correspondiente a dicho comando (**figura 4.19**).

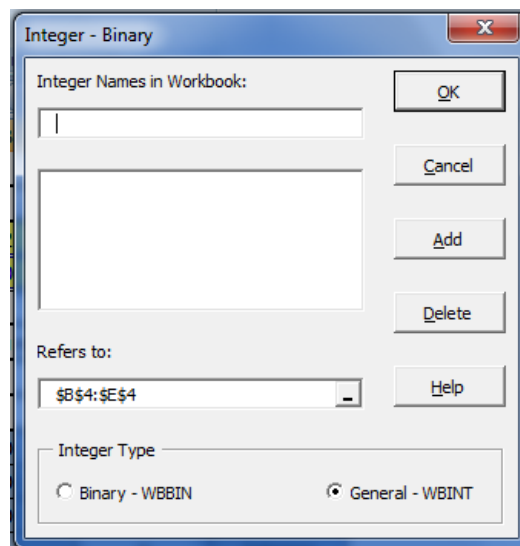


Figura 4.19. Ventana “Integer-Binary” para definir variables enteras en *What’sBest!*

Fuente: LINDO Systems.

En el campo “Integer Type” se selecciona la opción “General - WBINT” si se trata de un problema entero, o “Binary - WBBIN” si se trata de un problema binario. Por último, en el campo “Integer Names in Workbook” se ingresa un



nombre para el conjunto de celdas que contienen a las variables enteras y se da clic en “Add” y “OK”.

- **Comando “Solve”:** Una vez que se han definido todos los componentes del modelo en *What’sBest!*, se da clic en este comando para resolver el modelo. Mientras el solucionador trabaja, se mostrara la ventana “*What’sBest! Solver Status*” que se muestra en la siguiente figura.

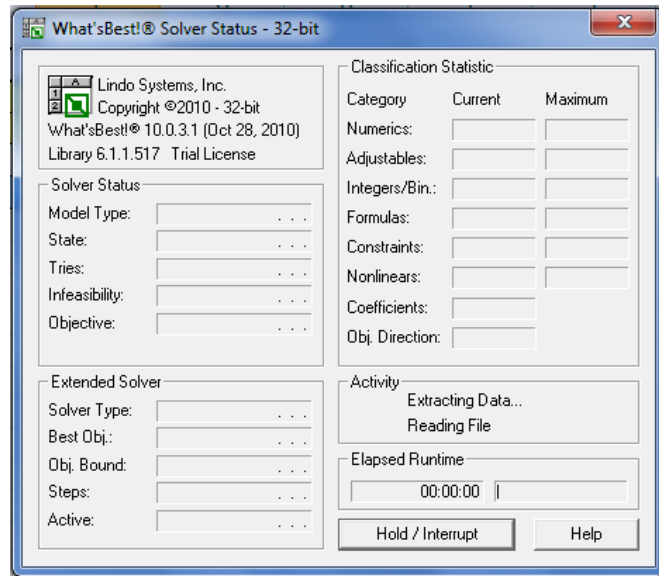


Figura 4.20. Ventana *What’sBest! Solver Status*

Fuente: LINDO Systems.

Una vez que *What’sBest!* termina de ejecutarse, regresa a la hoja de cálculo y cambia los valores de las celdas que representan a las variables de decisión por los valores óptimos encontrados, obteniéndose automáticamente el valor de la función objetivo y de las restricciones. Así mismo, se agrega al Libro de Excel una hoja de cálculo llamada “*WB! Status*” que contiene un informe detallado del modelo y su solución.



Capítulo 5

Modelo Matemático para el Dimensionamiento de Rutas con Flota Vehicular Mixta en Sistemas BRT

Generalmente, un modelo matemático se formula específicamente para representar un determinado sistema de estudio según sus características, necesidades y el problema en cuestión, pero si un modelo logra representar de forma razonable un problema puede aplicarse en uno o varios sistemas que tengan el mismo o parecido comportamiento. Para ello, los componentes de dicho modelo deberán estar representados por fórmulas matemáticas generales o flexibles, es decir, que se puedan ajustar a las necesidades de cualquier sistema de transporte que requiera de su aplicación.

Congruente con el objetivo de la presente tesis, a continuación se formulará un modelo matemático que permita dimensionar corredores de transporte público en Sistema BRT con servicios de rutas y flota vehicular mixta, tal y como es el caso del Sistema Metrobús de la Ciudad de México. Dicho modelo puede ser aplicable en otros sistemas de transporte que requieran dimensionar su servicio, para lo cual deben contar con las siguientes características:

- **Tiempos de recorrido estables:** Mediante la exclusividad o prioridad que reciban las unidades de un sistema de transporte en las vialidades es posible generalizar los tiempos de ciclo de sus rutas.
- **Estimación puntual y precisa de la demanda de transporte:** A través del establecimiento de estaciones o paradas fijas es posible concentrar y medir con certeza el volumen de demanda de un corredor.
- **Flexibilidad en el servicio:** Se refiere a la capacidad que debe tener un sistema de transporte para ajustar su oferta acorde a las características y requerimientos de su demanda a través de la variación de su frecuencia de operación, esto mediante el establecimiento de múltiples rutas dentro de un mismo corredor y el uso de vehículos autónomos (que no dependan de guías).
- **Flota simple o mixta:** A pesar de que el presente modelo está diseñado para sistemas de transporte con flota vehicular mixta (con más de dos tipos diferentes de vehículos), es posible utilizarlo en aquellos sistemas que se decidan por usar un sólo tipo de unidad pues se basa en la teoría general del dimensionamiento de rutas.



5.1. Variables de decisión

El objetivo principal del modelo es encontrar el valor de las frecuencias de operación (**f**) a las cuales deben operar cada una de las rutas que dan servicio en un mismo corredor o línea de transporte. Dicha frecuencia va a estar dada en función de sub-frecuencias (**f_x**) que dependen del tipo de vehículo a utilizar (**x**), por lo que la frecuencia de operación en una ruta será igual a la suma de tales sub-frecuencias, es decir:

$$f\{f_1, f_2, \dots, f_x\} = f_1 + f_2 + \dots + f_x = \sum_{i=1}^x f_i$$

Puesto que todas las ecuaciones utilizadas en el proceso de cálculo para el dimensionamiento de rutas de transporte pueden representarse de manera lineal en función de la frecuencia de operación (**f**), también podrán representarse en función de las sub-frecuencias (**f_x**), tal y como se muestra en la **tabla 5.1**:

Tabla 5.1. Parámetros básicos para el dimensionamiento de rutas en función de sub-frecuencias de operación.

Parámetro	Ecuación en términos de la frecuencia de operación (f)	Ecuación en términos de las sub-frecuencias de operación (f_x)
Volumen de diseño (P)	$P = \alpha * C_v * f$	$P = \alpha * (C_{v1} * f_1 + C_{v2} * f_2 + \dots + C_{vx} * f_x)$
Intervalo de paso (i)	$i = \frac{60}{f}$	$i = \frac{60}{f_1 + f_2 + \dots + f_x}$
Número de vehículos en operación (N)	$N = T_c * f$	$N = N_1 + N_2 + \dots + N_x = T_c * (f_1 + f_2 + \dots + f_x)$

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, las **sub-frecuencias de operación** serán consideradas como las **variables de decisión** del modelo matemático. Debido a que el análisis de dimensionamiento tiene que hacerse por cada ruta (**n**) y a que en los sistemas de transporte público no es común utilizar más de dos tipos diferentes de vehículo para brindar servicio (**x<=2**), las sub-frecuencias de operación por cada ruta se representarán de la siguiente manera:

$$f_n = f_{1n} + f_{2n}$$

donde:

f_n = Frecuencia de operación en la ruta *n* [veh/hr]

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta *n* para el tipo de vehículo 1 [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta *n* para el tipo de vehículo 2 [veh/hr]



5.2. Función Objetivo

La mayor parte los costos de operación y la percepción del nivel de servicio en un corredor de transporte dependen del número de vehículos que están en operación, es por ello que la función objetivo debe optimizar el uso de las unidades principalmente bajo los siguientes escenarios:

5.2.1. Escenario ideal o de flota nueva

Este escenario se presenta cuando en un sistema de transporte se desea conocer el tamaño de la flota vehicular óptima que debe ser adquirida para atender cierto volumen de demanda en un corredor. La función objetivo de este escenario buscará **minimizar la inversión total** que debe hacerse por la compra de los vehículos que se necesitan *en operación*, es decir:

$$\text{Min } Z = S_1 * \sum_{i=1}^n Tc_i * f_{1i} + S_2 * \sum_{i=1}^n Tc_i * f_{2i}$$

donde:

Tc_n = Tiempo de ciclo en la ruta n [hrs]

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 1 [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 2 [veh/hr]

S_1 = Precio del tipo de vehículo 1 [\$/veh]

S_2 = Precio del tipo de vehículo 2 [\$/veh]

5.2.2. Escenario real o de flota existente

Este escenario se presenta cuando en un sistema de transporte ya se dispone de cierta flota vehicular y se quiere obtener el máximo provecho de la misma, es decir, optimizar los recursos existentes. A diferencia del anterior, en este escenario la inversión por la adquisición de flota ya está hecha, por lo que la función objetivo buscará **maximizar el número total de espacios ofertados** en el sistema durante la HMD, por lo tanto, la función objetivo quedará de la siguiente manera:

$$\text{Max } Z = C_{v1} * \sum_{i=1}^n f_{1i} + C_{v2} * \sum_{i=1}^n f_{2i}$$

donde:

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 1 [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 2 [veh/hr]

C_{v1} = Capacidad vehicular para los vehículos del tipo 1 [pas/veh]

C_{v2} = Capacidad vehicular para los vehículos del tipo 2 [pas/veh]



5.3. Restricciones

Las restricciones del modelo van a depender en gran medida de los requerimientos y comportamiento de la demanda, las políticas de operación de los sistemas de transporte, las características físicas del corredor y las cualidades de las variables de decisión. Las principales restricciones que pueden presentarse en Sistemas BRT con servicios de rutas y flota vehicular mixta, son:

5.3.1. Restricción de demanda

Como se describió en el *capítulo 2*, un servicio de rutas se forma a través del establecimiento de terminales intermedias que dividen al corredor en **tramos**, cada tramo tendrá asignado un Volumen Horario de Máxima Demanda (**VHMD**) y cada ruta dará servicio a diferentes tramos dependiendo de su cobertura, tal y como se muestra en la **figura 5.1**.

Terminal	A	E	K	Q	U	Z
Tramo	1	2	3	...	m	
VHMD	VHMD1	VHMD2	VHMD3	...	VHMDm	
Ruta 1	P1	P1	P1			
Ruta 2	P2	P2				
Ruta 3		P3	P3	...		P3
Ruta 4				P4	...	P4
Ruta 5	P5	P5	P5	...		
...						
Ruta n	Pn	Pn	Pn	...		Pn

Figura 5.1. Relación entre rutas, tramos y VHMD en un corredor de transporte. Fuente: Elaboración propia.

La restricción del modelo que asegure la satisfacción de los volúmenes de demanda presentes a lo largo del corredor, debe procurar que la suma total de los volúmenes de diseño (**P**) de las rutas que pasen por un determinado tramo (**m**), sea mayor o igual al VHMD que se presenta en el mismo (**VHMD_m**), por lo tanto, el número de restricciones de demanda será igual al número de tramos en el corredor. Matemáticamente dicha restricción puede representarse de la siguiente manera:

$$\sum P_n \geq VHMD_m \quad \forall n \in m$$

$$P_n = \alpha * (C_{v1} * f_{1n} + C_{v2} * f_{2n})$$

$$\therefore \alpha * \sum (C_{v1} * f_{1n} + C_{v2} * f_{2n}) \geq VHMD_m \quad \forall n \in m$$

donde:

P_n = Volumen de diseño en la ruta n [pas/hr]

$VHMD_m$ = Volumen horario de máxima demanda en el tramo m [pas/hr]



α = Factor de ocupación

C_{v1} = Capacidad vehicular para los vehículos del tipo 1 [pas/veh]

C_{v2} = Capacidad vehicular para los vehículos del tipo 2 [pas/veh]

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 1 [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 2 [veh/hr]

5.3.2. Restricción de frecuencia máxima o de intervalo mínimo

Los carriles confinados, así como cualquier otra vialidad, corren el riesgo de congestionarse si circula por ellos un número muy alto de vehículos en un lapso muy corto de tiempo. Debido a que el término de **congestión** es subjetivo, se considera que un carril confinado está congestionado cuando la interacción entre autobuses crece demasiado haciendo que la velocidad de operación disminuya hasta valores muy cercanos a los que se presentan en vialidades con tráfico mixto eliminando así toda ventaja de utilizar un carril confinado y provocando que los tiempos de recorrido se incrementen.

Para el caso de los Sistemas BRT con servicios de rutas es muy probable que se manifieste congestión en la Sección de Máxima Demanda (**SMD**), es decir, el tramo del corredor donde se presenta el mayor volumen de pasajeros (**VHMD_{máx}**) pues es el punto de la ruta donde se requiere de un mayor número de unidades para satisfacer la demanda de transporte.

Al número máximo de vehículos que pueden circular libremente por una vía sin congestionarla se le conoce con el nombre de capacidad vial o frecuencia máxima de operación (**$f_{máx}$**), la cual puede calcularse a partir del establecimiento de un intervalo de paso mínimo entre vehículos utilizando la **ecuación 3.5**, o bien, mediante la aplicación de estudios específicos de Investigación de Operaciones como los de *Teoría de Colas*. Por lo tanto, es necesario agregar al modelo matemático la siguiente restricción que busca evitar la saturación de los carriles confinados:

$$\sum (f_{1n} + f_{2n}) \leq f_{máx} \quad \forall n \in m \quad \Leftrightarrow \quad VHMD_m = VHMD_{máx}$$

donde:

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 1 [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 2 [veh/hr]

$f_{máx}$ = Frecuencia máxima de operación en el corredor de transporte [veh/hr]

$VHMD_m$ = Volumen horario de máxima demanda en el tramo m [pas/hr]

$VHMD_{máx}$ = Volumen horario de máxima demanda más alto presente en el corredor de transporte [pas/hr]



5.3.3. Restricción de frecuencia mínima o de intervalo máximo

Un factor muy importante a considerar en el nivel de servicio de un sistema de transporte es el tiempo que espera un usuario por la llegada de un vehículo a una estación, conocido como intervalo de paso. Puesto que a ningún usuario le gusta esperar demasiado en una estación, es recomendable que se establezca un intervalo o tiempo de espera máximo con el que sea posible calcular una frecuencia mínima de operación ($f_{mín}$). Con esto también se evita la invasión del carril confinado que pudiera darse por la baja frecuencia de paso de los autobuses.

En un Sistema BRT con servicios de rutas, es probable que dicha frecuencia mínima se presente en el tramo del corredor con el menor volumen de pasajeros ($VHMD_{mín}$) pues es el punto de la ruta donde se requiere de un menor número de unidades para satisfacer la demanda de transporte. Por lo tanto, hay que agregar al modelo matemático una restricción que garantice una frecuencia mínima de operación la cual brinde al usuario un nivel de servicio aceptable, dicha restricción se representará de la siguiente manera:

$$\sum (f_{1n} + f_{2n}) \geq f_{mín} \quad \forall n \in m \quad \Leftrightarrow \quad VHMD_m = VHMD_{mín}$$

donde:

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 1 [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 2 [veh/hr]

$f_{mín}$ = Frecuencia mínima de operación en el corredor de transporte [veh/hr]

$VHMD_m$ = Volumen horario de máxima demanda en el tramo m [pas/hr]

$VHMD_{mín}$ = Volumen horario de máxima demanda más bajo presente en el corredor de transporte [pas/hr]

5.3.4. Restricción de infraestructura

Generalmente, en la fase inicial de diseño en un corredor de transporte sólo se contempla la utilización de un determinado tipo de vehículo, es por ello que la infraestructura, principalmente de estaciones y terminales, se construye basada en las características físicas de dichas unidades (largo, altura de piso y número de puertas). Cuando el crecimiento de la demanda y las limitantes de capacidad vial en carriles confinados obliga a la adquisición de unidades de mayor capacidad, que normalmente son de mayor tamaño, la infraestructura debe sufrir modificaciones para adecuarse a las necesidades de estos vehículos.



Por ejemplo, a diferencia de los autobuses articulados de piso alto utilizados ampliamente en Sistemas BRT, los autobuses biarticulados son más largos y requieren de una puerta adicional en las estaciones para el acceso a los mismos, tal y como se muestra en la **figura 5.2**:

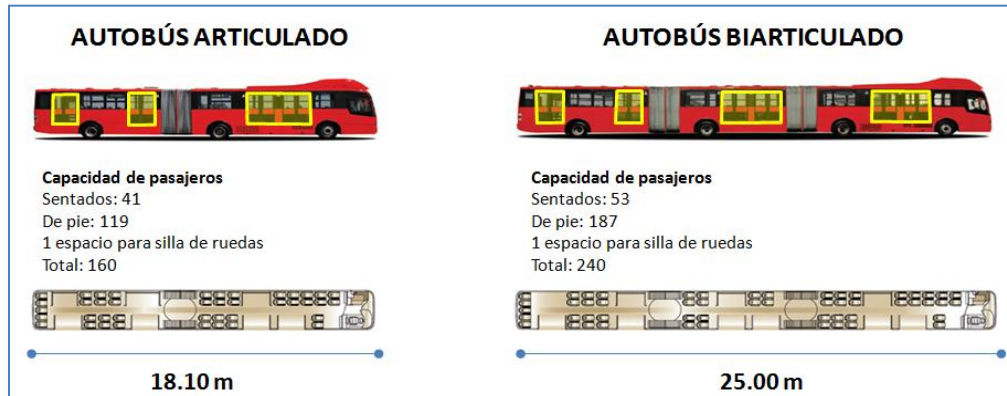


Figura 5.2. Diferencia de longitud y arreglo de puertas entre autobuses articulados y biarticulados

Fuente: Ficha técnica Volvo 7300. Obtenido de: www.volvobuses.com

Puesto que en ocasiones las adecuaciones a la infraestructura se llevan a cabo de manera gradual dependiendo del presupuesto destinado para tales fines, es probable que durante determinado tiempo algunos tramos del corredor queden inhabilitados para albergar cierto tipo de unidades, en consecuencia, las rutas del corredor se dividirán en dos tipos o conjuntos:

$$A = \left\{ \begin{array}{l} \text{Rutas que dan servicio a tramos **con** infraestructura} \\ \text{para vehículos de mayor capacidad} \end{array} \right\}$$

$$B = \left\{ \begin{array}{l} \text{Rutas que dan servicio a tramos **sin** infraestructura} \\ \text{para vehículos de mayor capacidad} \end{array} \right\}$$

Si en un sistema de transporte se presenta esta situación, en el modelo matemático se deberá añadir la siguiente restricción por cada ruta que pertenezca al conjunto **B**, en donde se anulará la sub-frecuencia de operación relacionada con los vehículos de mayor capacidad:

$$f_{2n} = 0 \quad \forall n \in B$$

donde:

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 2 de mayor capacidad [veh/hr]



5.3.5. Restricción de flota existente

Una de las principales características en un sistema de transporte, bajo un **escenario real**, es la existencia de cierta cantidad de flota vehicular. Esta información deberá ser incluida en el modelo matemático en forma de restricción con el propósito de hallar una solución que permita optimizar el uso de dicho recurso. Por lo tanto, tal restricción dependerá del número de unidades disponibles de cada uno de los diferentes tipos de vehículos que se utilicen para brindar servicio en el corredor (N_x), la cual se representará de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^n Tc_i * f_{1i} \leq N_1 \quad \Leftrightarrow \quad \exists N_1$$

$$\sum_{i=1}^n Tc_i * f_{2i} \leq N_2 \quad \Leftrightarrow \quad \exists N_2$$

donde:

Tc_n = Tiempo de ciclo en la ruta n [hrs]

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 1 [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 2 [veh/hr]

N_1 = Número de unidades disponibles en operación del tipo de vehículo 1 [veh]

N_2 = Número de unidades disponibles en operación del tipo de vehículo 2 [veh]

5.3.6. Restricción de volumen de diseño deseado para una ruta

En dado caso que en un sistema de transporte se tenga identificado un volumen específico de pasajeros para una ruta (P_Ω), por ejemplo en servicios Express o de rutas de transbordo entre corredores, se puede añadir al modelo matemático la siguiente restricción que busca garantizar el número de unidades necesarias en la ruta (Ω) para satisfacer su volumen de demanda:

$$\alpha * (C_{v1} * f_{1\Omega} + C_{v2} * f_{2\Omega}) \leq P_\Omega \quad \Leftrightarrow \quad \exists P_\Omega$$

donde:

α = Factor de ocupación

P_Ω = Volumen específico de pasajeros a transportar en la ruta Ω [pas/hr]

C_{v1} = Capacidad vehicular para los vehículos del tipo 1 [pas/veh]

C_{v2} = Capacidad vehicular para los vehículos del tipo 2 [pas/veh]

$f_{1\Omega}$ = Sub-frecuencia de operación en la ruta Ω para el tipo de vehículo 1 [veh/hr]

$f_{2\Omega}$ = Sub-frecuencia de operación en la ruta Ω para el tipo de vehículo 2 [veh/hr]



5.3.7. Restricción de flota deseada en un corredor

En un escenario de flota nueva, es posible que cuando se considere la utilización de flota vehicular mixta en un corredor de transporte por “políticas de operación” se requiera que la cantidad de flota de los vehículos de menor capacidad (N_A) represente cierto porcentaje (Δ) de la flota total, esto con el objeto de utilizar dicha flota para brindar servicio en días de muy baja demanda, en domingo por ejemplo, ofreciendo así un servicio con intervalos de operación más bajos que si se utilizaran las unidades de mayor capacidad (N_B). Aunque no es muy común dicha situación, es conveniente que se contemple dicha restricción por si llegara a presentarse quedando de la siguiente manera:

$$N_A = \left(\frac{\Delta}{1 - \Delta} \right) * N_B \quad \Leftrightarrow \quad \exists \Delta$$

$$\therefore \sum_{i=1}^n Tc_i * f_{1i} \geq \left(\frac{\Delta}{1 - \Delta} \right) * \sum_{i=1}^n Tc_i * f_{2i} \quad \Leftrightarrow \quad \exists \Delta$$

donde:

N_A = Número de unidades disponibles en operación del tipo de vehículo 1 [veh]

N_B = Número de unidades disponibles en operación del tipo de vehículo 2 [veh]

Δ = Porcentaje que representa N_A con respecto a la flota total.

Tc_n = Tiempo de ciclo en la ruta n [hrs]

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 1 [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 2 [veh/hr]

5.3.8. Restricciones de no negatividad

Dado que en un sistema de transporte no pueden existir sub-frecuencias de operación negativas, es necesario especificar dicha restricción en el modelo matemático de la siguiente manera:

$$f_{1i} \geq 0 \quad y \quad f_{2i} \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n$$

donde:

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 1 [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para el tipo de vehículo 2 [veh/hr]



Cabe mencionar que con las ecuaciones generales descritas anteriormente, se pretende abarcar las funciones objetivo y restricciones más comunes en la formulación de un modelo matemático para el dimensionamiento de rutas con flota vehicular mixta, por lo que no necesariamente se tendrán que utilizar en su totalidad sino sólo aquellas que, según las características del sistema de estudio, su problema y políticas de operación, sean las más convenientes.

Esto deja abierta la posibilidad de agregar nuevas ecuaciones al presente modelo acorde a las necesidades del sistema de estudio que, necesariamente, tendrán que involucrar a las variables de decisión y expresarse en forma lineal.

5.4. Ejemplos de aplicación: Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México

A continuación se presentan tres ejemplos del “Modelo Matemático para el Dimensionamiento de Rutas con Flota Vehicular Mixta” aplicados a la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México para atender la demanda actual de transporte en un día hábil típico.

- En el primer escenario se calculará la **flota óptima o ideal** que debería estar operando en el sistema para atender la demanda actual a un factor de ocupación del 85%.
- En el segundo escenario se obtendrá la **asignación óptima de los recursos existentes** (vehículos) a las diversas rutas que pueden brindar servicio en el corredor que permita ofrecer el máximo beneficio posible para los usuarios.
- Finalmente, en el tercer escenario se estimará el **requerimiento de flota** que el Sistema Metrobús necesita para bajar los niveles de saturación actuales de sus unidades en la HMD (factor de ocupación del 85%).

5.4.1. Información básica del corredor y su demanda

Para poder dimensionar el corredor utilizando un modelo matemático es necesario recopilar la información básica que se utilizará en la modelación, la cual debe incluir datos sobre la demanda de transporte, rutas, vehículos, características físicas del corredor, así como las políticas de operación aplicables al mismo. Las **tablas 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5** muestran la información (proporcionada por el Sistema Metrobús de la Ciudad de México) necesaria para dimensionar la Línea 1.



Tabla 5.2. Información básica sobre el comportamiento de la demanda presente en el corredor para el periodo de máxima demanda en un día hábil típico.

Fuente: Elaboración propia con datos de Metrobús.

Tramo del corredor	Indios Verdes Buenavista	Buenavista Gta. Insurgentes	Gta. Insurgentes Col. del Valle	Col. del Valle Dr. Gálvez	Dr. Gálvez El Caminero
Sección de Máxima Demanda	Circuito	Chopo	Chilpancingo	Félix Cuevas	Perisur
Hora de Máxima Demanda	7:45 - 8:45	7:18 - 8:15	8:15 - 9:15	7:45 - 8:45	8:15 - 9:15
Sentido	N-S	N-S	N-S	N-S	S-N
Demanda	8,200	10,800	7,900	5,300	5,900
% Ajuste	3%	3%	4%	30%	5%
Demanda ajustada	8,405	11,070	8,216	6,906	6,195

Nota: El ajuste se debe a la estimación de la demanda no atendida para dichos horarios a excepción del 30% de ajuste en Félix Cuevas debido a la proyección del crecimiento de demanda por la interacción con la Línea 12 del STC Metro.

Tabla 5.3. Políticas de operación aplicables en la Línea 1 del Sistema Metrobús.

Fuente: Elaboración propia con datos de Metrobús.

Políticas de Operación
Preferentemente asignar vehículos biarticulados en rutas largas.
Frecuencia máxima de operación de 72 [veh/hr] para el tramo BV-GI
Frecuencia mínima de operación de 15 [veh/hr] para el tramo DG-EC
Capacidad de línea para la ruta A1: máximo de 2,500 [pphs]
Capacidad de línea para la ruta A2: máximo de 3,500 [pphs]
Capacidad de línea para la ruta A3: máximo de 3,100 [pphs]
Intervalo máximo por ruta: 16 minutos
Intervalo mínimo por ruta: 2 minutos
Factor de ocupación ideal 85-90%

Nota: Las capacidades de línea para las rutas A1, A2 y A3 fueron obtenidas del análisis de Estudios de Frecuencia de Paso y Cargas.

Tabla 5.4. Información básica sobre las rutas de servicio que factibles de operar en el corredor.

Denominación	Origen	Destino	Longitud vuelta completa [km]	Tiempo de Ciclo en la HMD [min]	Velocidad Comercial [km/hr]
A1	Indios Verdes	Dr. Gálvez	40.4	132	18.36
A2	Indios Verdes	Gta. Insurgentes	20.4	53	23.09
A3	Buenavista II	El Caminero	40.68	142	17.19
A4	Gta. Insurgentes	El Caminero	35	115	18.26
A5	Gta. Insurgentes	Dr. Gálvez	20.6	76	16.26
A6	Buenavista II	Dr. Gálvez	27	103	15.73
A7	Indios Verdes	El Caminero	54.45	169	19.33

Fuente: Elaboración propia con datos de Metrobús.



Tabla 5.5. Información básica sobre la flota vehicular disponible en la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México.

Parámetro	Simbología	Tipo de vehículo	
		Articulado	Biarticulado
Capacidad vehicular [pas/veh]	Cv	160	240
Precio por unidad [MXN]	S	\$5,082,540	\$7,159,752
Flota disponible en operación [veh]	N	122	26
Flota de reserva [veh]	Nr	18	1
Flota Total [veh]	Np	140	27
% de flota de reserva ideal	-	12-15%	15-20%

Fuente: Elaboración propia con datos de Metrobús.

5.4.2. Variables de decisión

Las variables de decisión para cada una de las posibles rutas (n) en la Línea 1 del Sistema Metrobús, estarán conformadas por dos sub-frecuencias de operación según el tipo de vehículo que se utilice (x), las cuales se representaran como se muestra en la **figura 5.3**.

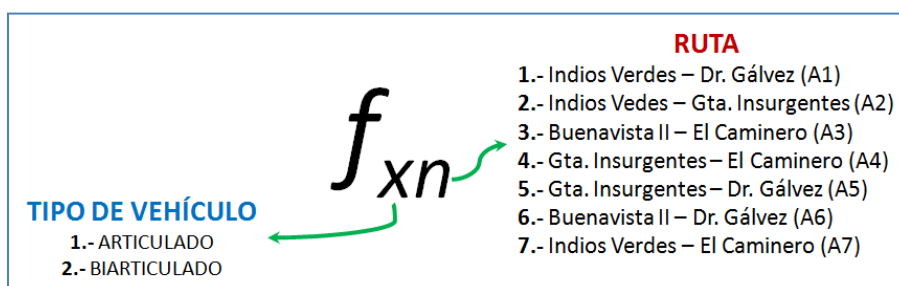


Figura 5.3. Componentes de la simbología utilizada para representar las variables de decisión.

Fuente: Elaboración propia.

La **figura 5.4** muestra la lista de las variables de decisión por ruta que se utilizarán en los modelos matemáticos de los escenarios planteados.

Ruta	Tiempo de Ciclo [hrs]	Sub-frecuencias de Operación	
		Vehículos Articulado	Vehículos Biarticulado
A1	2.20	f_{11}	f_{21}
A2	0.88	f_{12}	f_{22}
A3	2.37	f_{13}	f_{23}
A4	1.92	f_{14}	f_{24}
A5	1.27	f_{15}	f_{25}
A6	1.72	f_{16}	f_{26}
A7	2.82	f_{17}	f_{27}

Figura 5.4. Variables de decisión del modelo matemático de dimensionamiento de la Línea 1 de Metrobús con siete posibles rutas y flota vehicular mixta. Fuente: Elaboración propia.



5.4.3. Modelo matemático para el escenario ideal

En este escenario se busca conocer el tamaño óptimo de la flota que requiere el Sistema Metrobús en su Línea 1 para satisfacer la demanda actual de transporte a un factor de ocupación del 85% y con la mínima inversión posible. Por lo tanto, los componentes del modelo matemático serán los siguientes:

5.4.3.1. Función objetivo

$$\text{Min } Z (\text{Inversión en flota}) = S_1 * \sum_{i=1}^n Tc_i * f_{1i} + S_2 * \sum_{i=1}^n Tc_i * f_{2i}$$

Es decir:

$$\text{Min } Z = 5,082,540 * (2.20 * f_{11} + 0.88 * f_{12} + 2.37 * f_{13} + 1.92 * f_{14} + 1.27 * f_{15} + 1.72 * f_{16} + 2.82 * f_{17}) + 7,159,752 * (2.20 * f_{21} + 0.88 * f_{22} + 2.37 * f_{23} + 1.92 * f_{24} + 1.27 * f_{25} + 1.72 * f_{26} + 2.82 * f_{27})$$

donde:

Tc_n = Tiempo de ciclo en la ruta n [hrs]

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos biarticulados [veh/hr]

S_1 = Precio de un vehículo articulado [\$/veh]

S_2 = Precio de un vehículo biarticulado [\$/veh]

5.4.3.2. Restricciones

Restricciones de demanda por tramo:

$$\alpha * \sum (C_{v1} * f_{1n} + C_{v2} * f_{2n}) \geq VHMD_m \quad \forall n \in m$$

donde:

$VHMD_m$ = Volumen horario de máxima demanda en el tramo m [pas/hr]

α = Factor de ocupación deseado (85%)

C_{v1} = Capacidad vehicular de los vehículos articulados [pas/veh]

C_{v2} = Capacidad vehicular de los vehículos biarticulados [pas/veh]

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículo biarticulados [veh/hr]



La **figura 5.5** muestra las rutas, tramos y VHMD presentes en la Línea 1 del Sistema Metrobús:

Tramos	Indios Verdes	-	Buenavista	-	Gta. Insurgentes	-	Col. del Valle	-	Dr. Gálvez	-	El Caminero	
Demanda			8,400		11,000		8,200		6,900		6,200	
Rutas	A1	1										
	A2	2										
	A3				3							
	A4					4						
	A5					5						
	A6				6							
	A7	7										

Figura 5.5. Rutas y volumen horario de máxima demanda por tramo de la Línea 1 de Metrobús.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, para cada tramo:

$$\text{Tramo IV – BV: } 0.85 * (160 * (f_{11} + f_{12} + f_{17}) + 240 * (f_{21} + f_{22} + f_{27})) \geq 8,400$$

$$\text{Tramo BV – GI: } 0.85 * (160 * (f_{11} + f_{12} + f_{13} + f_{16} + f_{17}) + 240 * (f_{21} + f_{22} + f_{23} + f_{26} + f_{27})) \geq 11,000$$

$$\text{Tramo GI – CV: } 0.85 * (160 * (f_{11} + f_{13} + f_{14} + f_{15} + f_{16} + f_{17}) + 240 * (f_{21} + f_{23} + f_{24} + f_{25} + f_{26} + f_{27})) \geq 8,200$$

$$\text{Tramo CV – DG: } 0.85 * (160 * (f_{11} + f_{13} + f_{14} + f_{15} + f_{16} + f_{17}) + 240 * (f_{21} + f_{23} + f_{24} + f_{25} + f_{26} + f_{27})) \geq 6,900$$

$$\text{Tramo DG – EC: } 0.85 * (160 * (f_{13} + f_{14} + f_{17}) + 240 * (f_{23} + f_{24} + f_{27})) \geq 6,200$$

Restricción de frecuencia máxima aplicable al tramo Buenavista - Gta. De Insurgentes:

$$\sum (f_{1n} + f_{2n}) \leq f_{m\acute{a}x} \quad \forall n \in m \quad \Leftrightarrow \quad VHMD_m = VHMD_{m\acute{a}x}$$

Es decir:

$$(f_{11} + f_{12} + f_{13} + f_{16} + f_{17}) + (f_{21} + f_{22} + f_{23} + f_{26} + f_{27}) \leq 72$$

donde:

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos biarticulados [veh/hr]

$f_{m\acute{a}x}$ = Frecuencia máxima de operación en el corredor de transporte [veh/hr]

$VHMD_m$ = Volumen horario de máxima demanda en el tramo m [pas/hr]

$VHMD_{m\acute{a}x}$ = Volumen horario de máxima demanda más alto presente en el corredor de transporte [pas/hr]



Restricción de frecuencia mínima aplicable al tramo Dr. Gálvez - El Caminero:

$$\sum (f_{1n} + f_{2n}) \geq f_{mín} \quad \forall n \in m \quad \Leftrightarrow \quad VHMD_m = VHMD_{mín}$$

Es decir:

$$(f_{13} + f_{14} + f_{17}) + (f_{23} + f_{24} + f_{27}) \geq 15$$

donde:

- f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]
- f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos biarticulados [veh/hr]
- $f_{mín}$ = Frecuencia mínima de operación en el corredor de transporte [veh/hr]
- $VHMD_m$ = Volumen horario de máxima demanda en el tramo m [pas/hr]
- $VHMD_{mín}$ = Volumen horario de máxima demanda más bajo presente en el corredor de transporte [pas/hr]

Restricción de capacidad de línea deseada para las rutas A1, A2 y A3:

La restricción de volumen de diseño deseado para una ruta (P_Ω) es la siguiente:

$$\alpha * (C_{v1} * f_{1\Omega} + C_{v2} * f_{2\Omega}) \leq P_\Omega \quad \Leftrightarrow \quad \exists P_\Omega$$

En dado caso de requerir la Capacidad de Línea en una ruta (C_Ω), sólo se divide la restricción anterior entre el factor de ocupación (α) quedando la nueva restricción de la siguiente manera:

$$(C_{v1} * f_{1\Omega} + C_{v2} * f_{2\Omega}) \leq C_\Omega \quad \Leftrightarrow \quad \exists C_\Omega$$

Es decir (ver tabla 5.3):

Para la Ruta A1: $(160 * f_{11} + 240 * f_{21}) \leq 2,500$

Para la Ruta A2: $(160 * f_{12} + 240 * f_{22}) \leq 3,500$

Para la Ruta A3: $(160 * f_{13} + 240 * f_{23}) \leq 3,100$

donde:

- α = Factor de ocupación deseado (85%)
- P_Ω = Volumen de diseño específico de pasajeros a transportar en la ruta Ω [pas/hr]
- C_Ω = Capacidad de línea específica de pasajeros a transportar en la ruta Ω [pas/hr]
- C_{v1} = Capacidad vehicular para los vehículos articulados [pas/veh]
- C_{v2} = Capacidad vehicular para los vehículos biarticulados [pas/veh]
- $f_{1\Omega}$ = Sub-frecuencia de operación en la ruta Ω para vehículos articulados [veh/hr]
- $f_{2\Omega}$ = Sub-frecuencia de operación en la ruta Ω para vehículo biarticulados [veh/hr]



Restricción de no negatividad:

$$f_{1i} \geq 0 \quad y \quad f_{2i} \geq 0 \quad \forall i = 1,2,3, \dots, n$$

Es decir:

$$f_{1i} \geq 0 \quad y \quad f_{2i} \geq 0 \quad \forall i = 1,2,3,4,5,6 \text{ y } 7$$

donde:

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos biarticulados [veh/hr]

Restricción de variables enteras:

Para un escenario donde la función objetivo involucra el precio por tipo de vehículo, es necesario agregar la restricción de variables enteras por la siguiente razón: si se divide el costo de un autobús biarticulado (\$7, 159,752) entre el número de pasajeros que puede transportar (240) se obtendrá una cantidad (\$29,832.3) menor que si se utilizará un vehículo articulado (\$31,765.88) por lo que matemáticamente la solución más económica siempre será la de utilizar vehículos biarticulados, para evitar tal situación se debe agregar la siguiente restricción.

$$f_{1i} = \text{Número entero} \quad y \quad f_{2i} = \text{Número entero} \quad \forall i = 1,2,3, \dots, n$$

Es decir:

$$f_{1i} = \text{Número entero} \quad y \quad f_{2i} = \text{Número entero} \quad \forall i = 1,2,3,4,5,6 \text{ y } 7$$

donde:

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos biarticulados [veh/hr]

5.4.3.3. Resultados

Resolviendo el problema con *What'sBest!* se obtienen los resultados que se muestran en la **figura 5.6**, en los cuales es posible observar que las sub-frecuencias de operación para las rutas A4, A5 y A6 son prácticamente despreciables:

ESCENARIO IDEAL		Sub-frecuencias de Operación		
Ruta	Tiempo de Ciclo [hrs]	Vehículos Articulados	Vehículos Biarticulados	Intervalo de paso [min]
A1	2.20	0	9	6.7
A2	0.88	2	13	4.0
A3	2.37	1	12	4.6
A4	1.92	0	0	0.0
A5	1.27	1	0	60.0
A6	1.72	0	0	0.0
A7	2.82	0	18	3.3

Figura 5.6. Primer aproximación de la solución del problema de dimensionamiento de Línea 1 de Metrobús: Escenario ideal.

Fuente: Elaboración propia.



Una vez ajustado y validado el modelo matemático, se obtiene un requerimiento de 115 autobuses biarticulados en operación para atender la demanda actual a un factor de ocupación del 85%, la **figura 5.7** muestra la asignación final.

ESCENARIO IDEAL		Sub-frecuencias de Operación		Flota en Operación		
Ruta	Tiempo de Ciclo [hrs]	Vehículos Articulados	Vehículos Biarticulados	Intervalo de paso [min]	Vehículos Articulados	Vehículos Biarticulados
A1	2.20	1	9	6.0	2	20
A2	0.88	1	13	4.3	1	11
A3	2.37	1	12	4.6	2	28
A4	1.92	0	0	0.0	0	0
A5	1.27	0	0	0.0	0	0
A6	1.72	0	0	0.0	0	0
A7	2.82	0	18	3.3	0	51
Subtotal					5	110
% Reserva					20%	15%
Flota de Reserva					1	17
Flota Total					6	127
Precio Unitario					\$5,082,540	\$7,159,752
Inversión x Flota					\$30,495,240	\$909,288,504
Inversión Total					\$939,783,744	

Figura 5.7. Resultado final del modelo matemático de dimensionamiento de la Línea 1 de Metrobús: Escenario ideal

Fuente: Elaboración propia.

La **figura 5.8** presenta un resumen de los parámetros de dimensionamiento obtenidos de los resultados del problema para las rutas que resultaron factibles en el corredor, en ella se observa que los porcentajes de ocupación en el corredor son menores al 86%.

ESCENARIO IDEAL: FLOTA NUEVA		VEH. EN OPERACIÓN		TIEMPO DE CICLO [min]	INTERVALO DE PASO [min]		FRECUENCIA DE OPERACIÓN [veh/hr]		CAPACIDAD DE LÍNEA [pphs]		
RUTAS		ART.	BIART.						ART.	BIART.	TOTAL
A1	INDIOS VERDES - DOCTOR GÁLVEZ	2	20	132	66.0	6.60	0.9	9.1	145	2,182	2,327
A2	INDIOS VERDES - GLORIETA	1	11	53	53.0	4.82	1.1	12.5	181	2,989	3,170
A3	BUENAVISTA - EL CAMINERO	2	28	142	71.0	5.07	0.8	11.8	135	2,839	2,975
A7	INDIOS VERDES - EL CAMINERO	0	51	169		3.31		18.1		4,346	4,346
		5	110				2.9	51.5	462	12,355	12,817
		115					54.4				
ESTACIONES	IV	CIRCUITO	BV	CHOPO	GI	CHILP	CV	F. CUEVAS	DG	PERISUR	EC
OFERTA:		9,843		12,818		9,648		9,648		7,321	
DEMANDA:		8,400		11,000		8,200		6,900		6,200	
% DE OCUPACIÓN POR TRAMO:		85.34%		85.82%		84.99%		71.52%		84.69%	
FRECUENCIA POR TRAMO:		42		54		41		41		31	

Figura 5.8. Parámetros operativos resultantes de la modelación de la Línea 1 de Metrobús: Escenario Ideal.

Fuente: Elaboración propia.

Complementando la información presentada en la figura anterior, la **figura 5.9** muestra una gráfica comparativa entre la demanda de transporte presente en la Línea 1 del Sistema Metrobús y la oferta obtenida a través de la modelación del sistema para un escenario ideal.

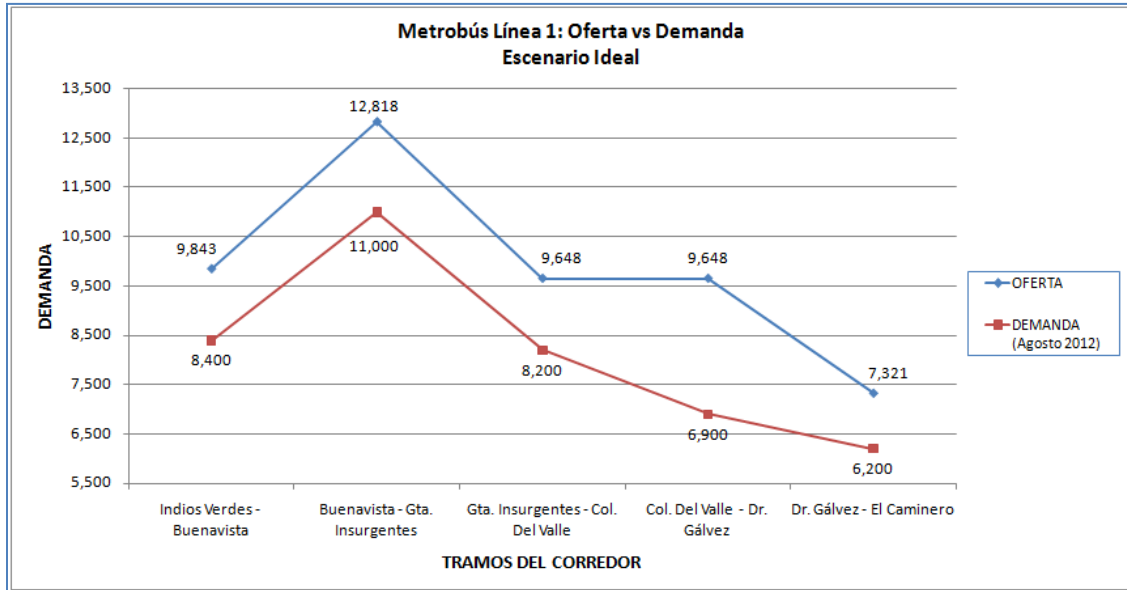


Figura 5.9. Gráfica comparativa entre la demanda de transporte presente en la Línea 1 de Metrobús y la oferta resultante de la modelación matemática para el escenario ideal.

Fuente: Elaboración propia.



5.4.4. Modelo matemático para el escenario real

En este escenario, el objetivo es lograr la asignación óptima de la flota vehicular existente a las posibles rutas de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México la cual permita ofrecer el máximo beneficio posible para los usuarios del sistema durante las horas de máxima demanda. Por lo tanto, el sistema se modelará de la siguiente manera:

5.4.4.1. Función objetivo

$$Max Z (\text{Espacios ofertados}) = C_{v1} * \sum_{i=1}^n f_{1i} + C_{v2} * \sum_{i=1}^n f_{2i}$$

Es decir:

$$Max Z = 160 (f_{11} + f_{12} + f_{13} + f_{14} + f_{15} + f_{16} + f_{17}) + 240 * (f_{21} + f_{22} + f_{23} + f_{24} + f_{25} + f_{26} + f_{27})$$

donde:

- f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]
- f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículo biarticulados [veh/hr]
- C_{v1} = Capacidad vehicular para los vehículos articulados [pas/veh]
- C_{v2} = Capacidad vehicular para los vehículos biarticulados [pas/veh]

5.4.4.2. Restricciones

Restricciones de demanda por tramo:

$$\alpha * \sum (C_{v1} * f_{1n} + C_{v2} * f_{2n}) \geq VHMD_m \quad \forall n \in m$$

donde:

- $VHMD_m$ = Volumen horario de máxima demanda en el tramo m [pas/hr]
- α = Factor de ocupación mínimo posible
- C_{v1} = Capacidad vehicular de los vehículos articulados [pas/veh]
- C_{v2} = Capacidad vehicular de los vehículos biarticulados [pas/veh]
- f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]
- f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículo biarticulados [veh/hr]



Es decir (ver figura 5.5):

$$\text{Tramo IV} - \text{BV}: 0.85 * (160 * (f_{11} + f_{12} + f_{17}) + 240 * (f_{21} + f_{22} + f_{27})) \geq 8,400$$

$$\text{Tramo BV} - \text{GI}: 0.85 * (160 * (f_{11} + f_{12} + f_{13} + f_{16} + f_{17}) + 240 * (f_{21} + f_{22} + f_{23} + f_{26} + f_{27})) \geq 11,000$$

$$\text{Tramo GI} - \text{CV}: 0.85 * (160 * (f_{11} + f_{13} + f_{14} + f_{15} + f_{16} + f_{17}) + 240 * (f_{21} + f_{23} + f_{24} + f_{25} + f_{26} + f_{27})) \geq 8,200$$

$$\text{Tramo CV} - \text{DG}: 0.85 * (160 * (f_{11} + f_{13} + f_{14} + f_{15} + f_{16} + f_{17}) + 240 * (f_{21} + f_{23} + f_{24} + f_{25} + f_{26} + f_{27})) \geq 6,900$$

$$\text{Tramo DG} - \text{EC}: 0.85 * (160 * (f_{13} + f_{14} + f_{17}) + 240 * (f_{23} + f_{24} + f_{27})) \geq 6,200$$

Restricción de flota vehicular existente:

$$\sum_{i=1}^n Tc_i * f_{1i} = N_1 \Leftrightarrow \exists N_1$$

$$\sum_{i=1}^n Tc_i * f_{2i} = N_2 \Leftrightarrow \exists N_2$$

Es decir (ver tabla 5.5):

$$2.20 * f_{11} + 0.88 * f_{12} + 2.37 * f_{13} + 1.92 * f_{14} + 1.27 * f_{15} + 1.72 * f_{16} + 2.82 * f_{17} = 122$$

$$2.20 * f_{21} + 0.88 * f_{22} + 2.37 * f_{23} + 1.92 * f_{24} + 1.27 * f_{25} + 1.72 * f_{26} + 2.82 * f_{27} = 26$$

donde:

Tc_n = Tiempo de ciclo en la ruta n [hrs]

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos biarticulados [veh/hr]

N_1 = Número de unidades articuladas disponibles en operación [veh]

N_2 = Número de unidades biarticuladas disponibles en operación [veh]



Restricción de capacidad de línea deseada para las rutas A1, A2 y A3:

Igual que en el escenario anterior, la capacidad de línea en una ruta (C_{Ω}), se obtiene de la siguiente manera:

$$(C_{v1} * f_{1\Omega} + C_{v2} * f_{2\Omega}) \leq C_{\Omega} \quad \Leftrightarrow \quad \exists C_{\Omega}$$

Es decir (**ver tabla 5.3**):

Para la Ruta A1: $(160 * f_{11} + 240 * f_{21}) \leq 2,500$

Para la Ruta A2: $(160 * f_{12} + 240 * f_{22}) \leq 3,500$

Para la Ruta A3: $(160 * f_{13} + 240 * f_{23}) \leq 3,100$

donde:

C_{Ω} = Capacidad de línea específica de pasajeros a transportar en la ruta Ω [pas/hr]

C_{v1} = Capacidad vehicular para los vehículos articulados [pas/veh]

C_{v2} = Capacidad vehicular para los vehículos biarticulados [pas/veh]

$f_{1\Omega}$ = Sub-frecuencia de operación en la ruta Ω para vehículos articulados [veh/hr]

$f_{2\Omega}$ = Sub-frecuencia de operación en la ruta Ω para vehículo biarticulados [veh/hr]

Restricción de frecuencia máxima aplicable al tramo Buenavista – Gta. De Insurgentes:

$$\sum (f_{1n} + f_{2n}) \leq f_{m\acute{a}x} \quad \forall n \in m \quad \Leftrightarrow \quad VHMD_m = VHMD_{m\acute{a}x}$$

Es decir:

$$(f_{11} + f_{12} + f_{13} + f_{16} + f_{17}) + (f_{21} + f_{22} + f_{23} + f_{26} + f_{27}) \leq 72$$

donde:

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos biarticulados [veh/hr]

$f_{m\acute{a}x}$ = Frecuencia máxima de operación en el corredor de transporte [veh/hr]

$VHMD_m$ = Volumen horario de máxima demanda en el tramo m [pas/hr]

$VHMD_{m\acute{a}x}$ = Volumen horario de máxima demanda más alto presente en el corredor de transporte [pas/hr]



Restricción de frecuencia mínima aplicable al tramo Dr. Gálvez - El Caminero:

$$\sum (f_{1n} + f_{2n}) \geq f_{\min} \quad \forall n \in m \quad \Leftrightarrow \quad VHMD_m = VHMD_{\min}$$

Es decir:

$$(f_{13} + f_{14} + f_{17}) + (f_{23} + f_{24} + f_{27}) \geq 15$$

donde:

- f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]
- f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos biarticulados [veh/hr]
- f_{\min} = Frecuencia mínima de operación en el corredor de transporte [veh/hr]
- $VHMD_m$ = Volumen horario de máxima demanda en el tramo m [pas/hr]
- $VHMD_{\min}$ = Volumen horario de máxima demanda más bajo presente en el corredor de transporte [pas/hr]

Restricción de no negatividad:

$$f_{1i} \geq 0 \quad y \quad f_{2i} \geq 0 \quad \forall i = 1,2,3, \dots, n$$

Es decir:

$$f_{1i} \geq 0 \quad y \quad f_{2i} \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \text{ y } 7$$

donde:

- f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]
- f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos biarticulados [veh/hr]

5.4.4.3. Resultados

Resolviendo el problema a un factor de ocupación del 91% se obtienen los resultados mostrados en la **figura 5.10** donde, al igual que en el escenario ideal, las sub-frecuencias de operación para las rutas A4, A5 y A6 son prácticamente despreciables:

Figura 5.10. Primer aproximación de la solución del problema de dimensionamiento de Línea 1 de Metrobús: Escenario real

Fuente: Elaboración propia.

ESCENARIO REAL		Sub-frecuencias de Operación		Intervalo de paso [min]
Ruta	Tiempo de Ciclo [hrs]	Vehículos Articulados	Vehículos Biarticulados	
A1	2.20	0.00	9.17	6.5
A2	0.88	21.88	0.00	2.7
A3	2.37	16.51	1.49	3.3
A4	1.92	0.00	1.09	55.2
A5	1.27	0.00	0.17	354.9
A6	1.72	0.00	0.00	0.0
A7	2.82	22.58	0.00	2.7



Al ajustar el modelo matemático se obtiene la asignación mostrada en la **figura 5.11** de los 122 vehículos articulados y 26 biarticulados disponibles en la Línea 1 del Sistema Metrobús a las rutas A1, A2, A3 y A7:

ESCENARIO REAL		Sub-frecuencias de Operación			Flota en Operación	
Ruta	Tiempo de Ciclo [hrs]	Vehículos Articulados	Vehículos Biarticulados	Intervalo de paso [min]	Vehículos Articulados	Vehículos Biarticulados
A1	2.20	0.00	9.24	6.5	0	20
A2	0.88	20.49	0.00	2.9	18	0
A3	2.37	19.10	0.00	3.1	45	0
A4	1.92	0.00	0.00	0.0	0	0
A5	1.27	0.00	0.00	0.0	0	0
A6	1.72	0.00	0.00	0.0	0	0
A7	2.82	20.84	2.01	2.6	59	6
Subtotal					122	26
% Reserva					15%	4%
Flota de Reserva					18	1
Flota Total					140	27
Precio Unitario					\$5,082,540	\$7,159,752
Inversión x Flota					\$711,555,600	\$193,313,304
Inversión Total					\$904,868,904	

Figura 5.11. Resultado final del modelo matemático de dimensionamiento de la Línea 1 de Metrobús: Escenario real

Fuente: Elaboración propia.

La **figura 5.12** presenta un resumen de los parámetros de dimensionamiento obtenidos con los resultados del problema, en ella se puede observar que con la flota actual se alcanza la frecuencia máxima de operación de 72 [veh/hr] y los porcentajes de ocupación en el corredor son menores al 91%.

ESCENARIO REAL: FLOTA EXISTENTE		VEH. EN OPERACIÓN		TIEMPO DE CICLO [min]	INTERVALO DE PASO [min]		FRECUENCIA DE OPERACIÓN [veh/hr]		CAPACIDAD DE LÍNEA [pphs]		
RUTAS		ART.	BIART.						ART.	BIART.	TOTAL
A1	INDIOS VERDES - DOCTOR GÁLVEZ	0	20	132		6.60		9.1		2,182	2,182
A2	INDIOS VERDES - GLORIETA	18	0	53	2.9		20.4		3,260		3,260
A3	BUENAVISTA - EL CAMINERO	45	0	142	3.2		19.0		3,042		3,042
A7	INDIOS VERDES - EL CAMINERO	59	6	169	2.9	28.17	20.9	2.1	3,351	511	3,863
		122	26				60.3	11.2	9,654	2,693	12,347
		148					71.6				
ESTACIONES	IV	CIRCUITO	BV	CHOPO	GI	CHILP	CV	F. CUEVAS	DG	PERISUR	EC
OFERTA:		9,305		12,347		9,087		9,087		6,905	
DEMANDA:		8,400		11,000		8,200		6,900		6,200	
% DE OCUPACIÓN POR TRAMO:		90.27%		89.09%		90.24%		75.93%		89.79%	
FRECUENCIA POR TRAMO:		53		72		51		51		42	

Figura 5.12. Parámetros operativos resultantes de la modelación de la Línea 1 de Metrobús: Escenario real.

Fuente: Elaboración propia.

Complementando la información presentada en la figura anterior, la **figura 5.13** muestra una gráfica comparativa entre la demanda de transporte presente en la Línea 1 del Sistema Metrobús y la oferta obtenida a través de la modelación del sistema para un escenario real.

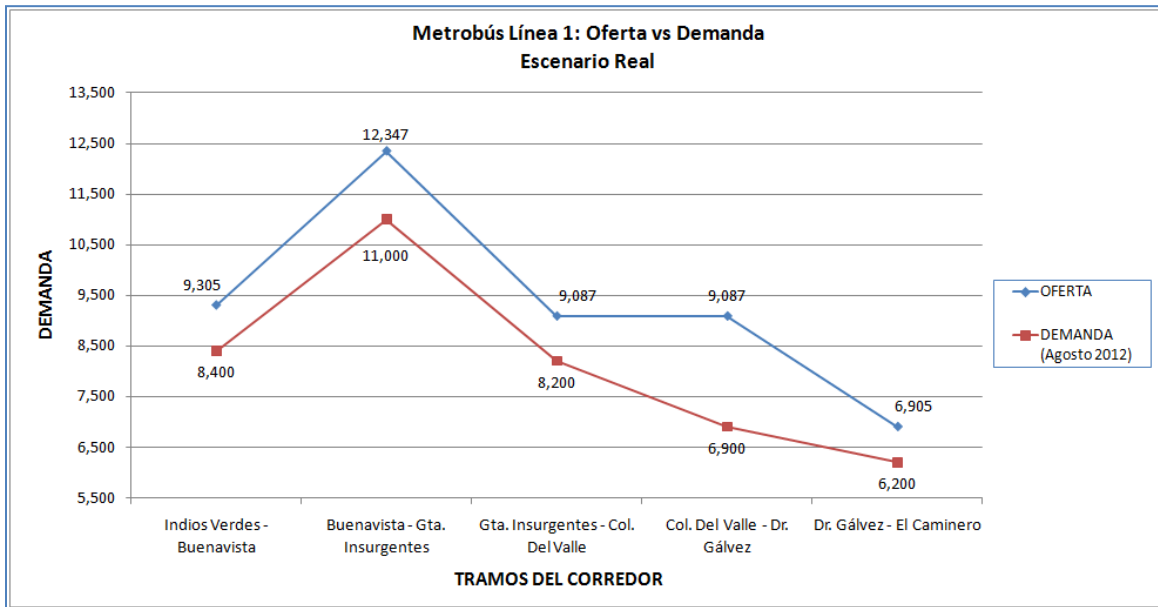


Figura 5.13. Gráfica comparativa entre la demanda de transporte presente en la Línea 1 de Metrobús y la oferta resultante de la modelación matemática para el escenario real.

Fuente: Elaboración propia.



5.4.5. Escenario adicional: Requerimiento de flota

Puesto que el Sistema Metrobús de la Ciudad de México ya tiene adquirida cierta cantidad de flota vehicular y que al optimizar dicha flota sólo es posible alcanzar factores de ocupación cercanos al 91%, es necesario estimar el número de vehículos que se requieren en el sistema para bajar los niveles de saturación de los autobuses en las horas de máxima demanda hasta factores de ocupación cercanos al 85%. Es por ello que en el presente escenario se mostrará un ejemplo sencillo de cómo estimar el requerimiento de flota en la Línea 1 del Sistema Metrobús a través del siguiente modelo matemático (híbrido de los dos anteriores):

5.4.5.1. Función objetivo

$$\text{Min } Z (\text{Vehículos en operación}) = \sum_{i=1}^n Tc_i * f_{1i} + \sum_{i=1}^n Tc_i * f_{2i}$$

Es decir:

$$\text{Min } Z = (2.20 * f_{11} + 0.88 * f_{12} + 2.37 * f_{13} + 1.92 * f_{14} + 1.27 * f_{15} + 1.72 * f_{16} + 2.82 * f_{17}) + (2.20 * f_{21} + 0.88 * f_{22} + 2.37 * f_{23} + 1.92 * f_{24} + 1.27 * f_{25} + 1.72 * f_{26} + 2.82 * f_{27})$$

donde:

Tc_n = Tiempo de ciclo en la ruta n [hrs]

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos biarticulados [veh/hr]

5.4.5.2. Restricciones

Restricciones de demanda por tramo:

$$\alpha * \sum (C_{v1} * f_{1n} + C_{v2} * f_{2n}) \geq VHMD_m \quad \forall n \in m$$

donde:

$VHMD_m$ = Volumen horario de máxima demanda en el tramo m [pas/hr]

α = Factor de ocupación deseado (85%)

C_{v1} = Capacidad vehicular de los vehículos articulados [pas/veh]

C_{v2} = Capacidad vehicular de los vehículos biarticulados [pas/veh]

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículo biarticulados [veh/hr]



Es decir (**ver figura 5.5**):

$$\text{Tramo IV – BV: } 0.85 * (160 * (f_{11} + f_{12} + f_{17}) + 240 * (f_{21} + f_{22} + f_{27})) \geq 8,400$$

$$\text{Tramo BV – GI: } 0.85 * (160 * (f_{11} + f_{12} + f_{13} + f_{16} + f_{17}) + 240 * (f_{21} + f_{22} + f_{23} + f_{26} + f_{27})) \geq 11,000$$

$$\text{Tramo GI – CV: } 0.85 * (160 * (f_{11} + f_{13} + f_{14} + f_{15} + f_{16} + f_{17}) + 240 * (f_{21} + f_{23} + f_{24} + f_{25} + f_{26} + f_{27})) \geq 8,200$$

$$\text{Tramo CV – DG: } 0.85 * (160 * (f_{11} + f_{13} + f_{14} + f_{15} + f_{16} + f_{17}) + 240 * (f_{21} + f_{23} + f_{24} + f_{25} + f_{26} + f_{27})) \geq 6,900$$

$$\text{Tramo DG – EC: } 0.85 * (160 * (f_{13} + f_{14} + f_{17}) + 240 * (f_{23} + f_{24} + f_{27})) \geq 6,200$$

Restricción de flota vehicular existente:

$$\sum_{i=1}^n Tc_i * f_{1i} \geq N_1 \quad \Leftrightarrow \quad \exists N_1$$

$$\sum_{i=1}^n Tc_i * f_{2i} \geq N_2 \quad \Leftrightarrow \quad \exists N_2$$

Es decir (**ver tabla 5.4**):

$$2.20 * f_{11} + 0.88 * f_{12} + 2.37 * f_{13} + 1.92 * f_{14} + 1.27 * f_{15} + 1.72 * f_{16} + 2.82 * f_{17} \geq 122$$

$$2.20 * f_{21} + 0.88 * f_{22} + 2.37 * f_{23} + 1.92 * f_{24} + 1.27 * f_{25} + 1.72 * f_{26} + 2.82 * f_{27} \geq 26$$

donde:

Tc_n = Tiempo de ciclo en la ruta n [hrs]

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos biarticulados [veh/hr]

N_1 = Número de unidades articuladas disponibles en operación [veh]

N_2 = Número de unidades biarticuladas disponibles en operación [veh]



Restricción de capacidad de línea deseada para las rutas A1, A2 y A3:

Igual que en los escenarios anteriores, la capacidad de línea en una ruta (C_{Ω}), se obtiene de la siguiente manera:

$$(C_{v1} * f_{1\Omega} + C_{v2} * f_{2\Omega}) \leq C_{\Omega} \quad \Leftrightarrow \quad \exists C_{\Omega}$$

Es decir (**ver tabla 5.3**):

$$\textit{Para la Ruta A1: } (160 * f_{11} + 240 * f_{21}) \leq 2,500$$

$$\textit{Para la Ruta A2: } (160 * f_{12} + 240 * f_{22}) \leq 3,500$$

$$\textit{Para la Ruta A3: } (160 * f_{13} + 240 * f_{23}) \leq 3,100$$

donde:

C_{Ω} = Capacidad de línea específica de pasajeros a transportar en la ruta Ω [pas/hr]

C_{v1} = Capacidad vehicular para los vehículos articulados [pas/veh]

C_{v2} = Capacidad vehicular para los vehículos biarticulados [pas/veh]

$f_{1\Omega}$ = Sub-frecuencia de operación en la ruta Ω para vehículos articulados [veh/hr]

$f_{2\Omega}$ = Sub-frecuencia de operación en la ruta Ω para vehículo biarticulados [veh/hr]

Restricción de frecuencia máxima aplicable al tramo Buenavista – Gta. De Insurgentes:

$$\sum (f_{1n} + f_{2n}) \leq f_{m\acute{a}x} \quad \forall n \in m \quad \Leftrightarrow \quad VHMD_m = VHMD_{m\acute{a}x}$$

Es decir:

$$(f_{11} + f_{12} + f_{13} + f_{16} + f_{17}) + (f_{21} + f_{22} + f_{23} + f_{26} + f_{27}) \leq 72$$

donde:

f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]

f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos biarticulados [veh/hr]

$f_{m\acute{a}x}$ = Frecuencia máxima de operación en el corredor de transporte [veh/hr]

$VHMD_m$ = Volumen horario de máxima demanda en el tramo m [pas/hr]

$VHMD_{m\acute{a}x}$ = Volumen horario de máxima demanda más alto presente en el corredor de transporte [pas/hr]



Restricción de frecuencia mínima aplicable al tramo Dr. Gálvez – El Caminero:

$$\sum (f_{1n} + f_{2n}) \geq f_{mín} \quad \forall n \in m \quad \Leftrightarrow \quad VHMD_m = VHMD_{mín}$$

Es decir:

$$(f_{13} + f_{14} + f_{17}) + (f_{23} + f_{24} + f_{27}) \geq 15$$

donde:

- f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]
- f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos biarticulados [veh/hr]
- $f_{mín}$ = Frecuencia mínima de operación en el corredor de transporte [veh/hr]
- $VHMD_m$ = Volumen horario de máxima demanda en el tramo m [pas/hr]
- $VHMD_{mín}$ = Volumen horario de máxima demanda más bajo presente en el corredor de transporte [pas/hr]

Restricción de no negatividad:

$$f_{1i} \geq 0 \quad y \quad f_{2i} \geq 0 \quad \forall i = 1,2,3, \dots, n$$

Es decir:

$$f_{1i} \geq 0 \quad y \quad f_{2i} \geq 0 \quad \forall i = 1,2,3,4,5,6 \text{ y } 7$$

donde:

- f_{1n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos articulados [veh/hr]
- f_{2n} = Sub-frecuencia de operación en la ruta n para vehículos biarticulados [veh/hr]

5.4.5.3. Resultados

Resolviendo el problema con *What'sBest!* se obtienen los siguientes resultados donde las sub-frecuencias de operación para las rutas A4, A5 y A6 siguen siendo prácticamente despreciables:

Figura 5.14. Primer aproximación de la solución del problema de dimensionamiento de Línea 1 de Metrobús: Requerimiento de flota

Fuente: Elaboración propia.

REQUERIMIENTO DE FLOTA		Sub-frecuencias de Operación		Intervalo de paso [min]
Ruta	Tiempo de Ciclo [hrs]	Vehículos Articulados	Vehículos Biarticulados	
A1	2.20	1.41	8.22	6.2
A2	0.88	0.00	14.58	4.1
A3	2.37	19.12	0.00	3.1
A4	1.92	0.00	0.22	272.0
A5	1.27	0.00	0.64	94.2
A6	1.72	0.00	0.00	0.0
A7	2.82	26.14	0.00	2.3



Al ajustar el modelo matemático se obtiene que para bajar los niveles de saturación en la Línea 1 del Sistema Metrobús y brindar un servicio con un factor de ocupación del 85% se necesitan seis unidades biarticuladas adicionales en operación asignadas como se muestra en la **figura 5.15**:

REQUERIMIENTO DE FLOTA		Sub-frecuencias de Operación			Flota en Operación	
Ruta	Tiempo de Ciclo [hrs]	Vehículos Articulados	Vehículos Biarticulados	Intervalo de paso [min]	Vehículos Articulados	Vehículos Biarticulados
A1	2.20	0.99	9.14	5.9	2	20
A2	0.88	0.00	13.73	4.4	0	12
A3	2.37	19.12	0.00	3.1	45	0
A4	1.92	0.00	0.00	0.0	0	0
A5	1.27	0.00	0.00	0.0	0	0
A6	1.72	0.00	0.00	0.0	0	0
A7	2.82	26.47	0.00	2.3	75	0
Subtotal					122	32
% Reserva					15%	20%
Flota de Reserva					18	6
Flota Total					140	38
Precio Unitario					\$5,082,540	\$7,159,752
Inversión x Flota					\$711,555,600	\$272,070,576
Inversión Total					\$983,626,176	

Figura 5.15. Resultado final del modelo matemático de dimensionamiento de la Línea 1 de Metrobús: Requerimiento de flota

Fuente: Elaboración propia.

Puesto que actualmente el Sistema Metrobús sólo cuenta con una unidad biarticulada de reserva, es necesario adquirir cinco vehículos más para conformar una flota de reserva del 20% de la flota en operación, por lo que en total se requiere de once unidades biarticuladas adicionales.

La **figura 5.16** presenta un resumen de los parámetros de dimensionamiento obtenidos con los resultados del problema, en ella se puede observar que con la flota propuesta se logran factores de ocupación en el corredor cercanos al 85% con una frecuencia máxima de operación de 69 vehículos por hora.

ESCENARIO REAL: FLOTA EXISTENTE		VEH. EN OPERACIÓN		TIEMPO DE CICLO [min]	INTERVALO DE PASO [min]	FRECUENCIA DE OPERACIÓN [veh/hr]		CAPACIDAD DE LÍNEA [pphs]			
RUTAS		ART.	BIART.					ART.	BIART.	TOTAL	
A1	INDIOS VERDES - DOCTOR GÁLVEZ	2	20	132	66.0	6.60	0.9	9.1	145	2,182	2,327
A2	INDIOS VERDES - GLORIETA	0	12	53	3.2	4.42		13.6		3,260	3,260
A3	BUENAVISTA - EL CAMINERO	45	0	142	3.2		19.0		3,042		3,042
A7	INDIOS VERDES - EL CAMINERO	75	0	169	2.3		26.6		4,260		4,260
		122	32				46.6	22.7	7,448	5,442	12,890
		154					69.2				

ESTACIONES	IV	CIRCUITO	BV	CHOPO	GI	CHILP	CV	F. CUEVAS	DG	PERISUR	EC
OFERTA:		9,847		12,889		9,629		9,629		7,302	
DEMANDA:		8,400		11,000		8,200		6,900		6,200	
% DE OCUPACIÓN POR TRAMO:		85.31%		85.34%		85.16%		71.66%		84.91%	
FRECUENCIA POR TRAMO:		50		69		56		56		46	

Figura 5.16. Parámetros operativos resultantes de la modelación de la Línea 1 de Metrobús: Requerimiento de flota.

Fuente: Elaboración propia.



Complementando la información presentada en la figura anterior, la **figura 5.17** muestra una gráfica comparativa entre la demanda de transporte presente en la Línea 1 del Sistema Metrobús y la oferta obtenida a través de la modelación del sistema para un escenario de requerimiento de flota.

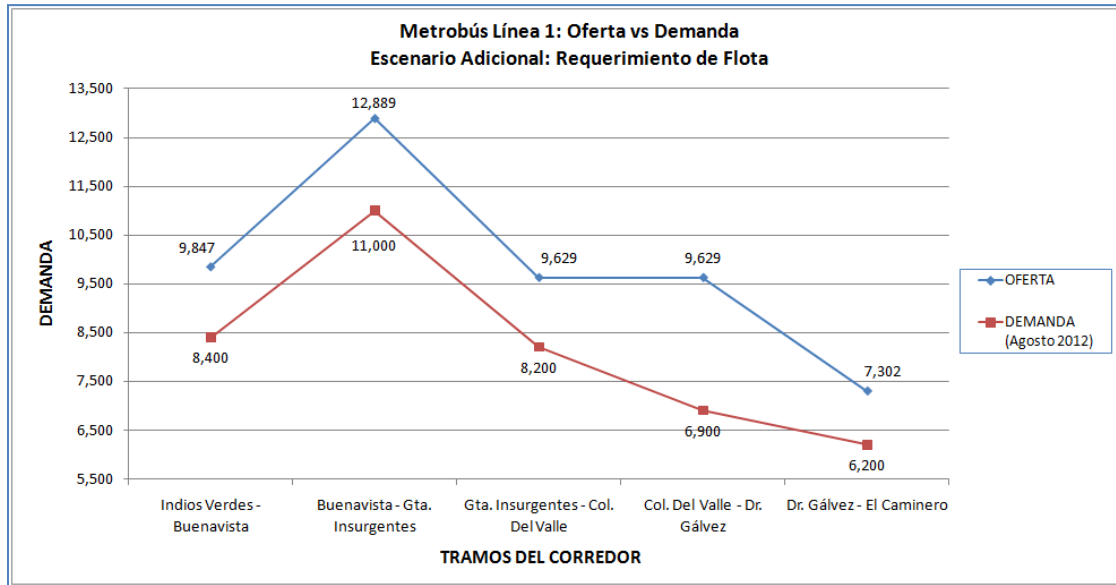


Figura 5.17. Gráfica comparativa entre la demanda de transporte presente en la Línea 1 de Metrobús y la oferta resultante de la modelación matemática para el escenario de requerimiento de flota.

Fuente: Elaboración propia.



5.5. Resumen de resultados

La **tabla 5.6** muestra un resumen de los resultados obtenidos a través de la modelación matemáticos de los escenarios planteados:

Tabla 5.6. Cuadro resumen de los resultados de la aplicación del modelo matemático de dimensionamiento de rutas.

Escenario		Ideal	Real	Requerimiento de flota
Factor de ocupación		85%	91%	85%
Capacidad Máxima de Línea		12,818	12,347	12,889
Frecuencia máxima		54	72	69
Frecuencia mínima		31	42	46
Rutas	A1 (IV-DG)	✓	✓	✓
	A2 (IV-GI)	✓	✓	✓
	A3 (BV-EC)	✓	✓	✓
	A4 (GI-EC)	✗	✗	✗
	A5 (GI-DG)	✗	✗	✗
	A6 (BV-DG)	✗	✗	✗
	A7 (IV-EC)	✓	✓	✓
Vehiculos en operación	Articulados	5	122	122
	Biarticulados	110	26	32
	Total	115	148	154
Flota de reserva (%)	Articulados	20%	15%	15%
	Biarticulados	15%	4%	20%
Flota total	Articulados	6	140	140
	Biarticulados	127	27	38
Inversión total		\$ 939,783,744	\$ 904,868,904	\$ 983,626,176

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla anterior es posible observar que del conjunto de rutas teóricamente factibles en la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, las que mejor se apegan a los requerimientos de la demanda de transporte en el corredor son:

- ✓ A1: Indios Verdes - Dr. Gálvez,
- ✓ A2: Indios Verdes - Gta. Insurgentes,
- ✓ A3: Buenavista - El Caminero y
- ✓ A7: Indios Verdes - El Caminero.

También, es posible notar que de los tres escenarios planteados el resultado del escenario real es el que ofrece una inversión total más baja, pero esto a costa de no contar con la suficiente flota de reserva para unidades biarticuladas y brindar un servicio con un factor de ocupación superior al 90%.



Por otro lado, comparando los escenarios ideal y de requerimiento de flota con los cuales se ofrece un servicio a un factor de ocupación del 85% y con flota de reserva completa, se observa que el escenario ideal es el que tiene la inversión total por concepto de flota más baja (\$ 939,783,744) lo cual implicaría un ahorro del 4.5% del total de la inversión por requerimiento de flota (\$ 983,626,176).

Finalmente, para poder bajar los niveles de saturación actuales en las unidades que brindan servicio en la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, es necesario incrementar la flota en operación adquiriendo únicamente vehículos biarticulados pasando de 26 a 32 unidades, esto equivale a un incremento del 23% de la flota biarticulada en operación.



Conclusiones

El uso de nuevas técnicas de planeación para los sistemas de transporte público requiere de nuevas técnicas de diseño operacional, tal y como es el caso del dimensionamiento de rutas con flota vehicular mixta y el análisis de la variabilidad espacio-temporal de la demanda de transporte.

La modelación de los sistemas de transporte otorga la posibilidad de generar herramientas matemáticas que permitan estimar los recursos necesarios para satisfacer la demanda de un corredor u optimizar los recursos existentes y hacer más eficientes los procedimientos operativos en dichos sistemas. Así mismo, ayudan en el análisis y proyección de diversos escenarios con el objeto de prever reestructuraciones en el servicio, analizar futuras inversiones en capacidad ante las posibles modificaciones o incrementos en la demanda e, incluso, visualizar un cambio modal.

El método convencional de dimensionamiento de rutas debe evolucionar hacia uno que aporte un sustento matemático y sólido a este proceso de toma de decisiones, de tal manera que sea visto como un problema de optimización en el cual se pueda dimensionar un corredor sin importar la cantidad de rutas que lo integren o el tipo de vehículos que conformen su flota.

La utilización de modelos matemáticos, como los desarrollados en la presente tesis, deben formularse por un equipo de expertos no sólo en el ámbito de la Investigación de Operaciones sino también en el ámbito de la planeación, operación y programación de los servicios de transporte, pues sólo de esa manera los resultados de la modelación serán validos y efectivos.

Es grato mencionar, que la modelación matemática para dimensionar rutas con flota vehicular mixta en Sistemas BRT ya es una realidad en la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México y se utiliza como una herramienta confiable para optimizar los recursos existentes, estimar los requerimientos de flota en el corredor y determinar el tipo y tamaño de parque vehicular para futuros corredores.



El presente trabajo deja abierta la posibilidad de realizar análisis adicionales sobre:

- Costo por kilometraje generado a partir de la modelación de rutas y su impacto en los modelos financieros de los sistemas que lo utilicen.
- Su aplicación en Sistemas Integrados de Transporte que cuenten con rutas troncales y alimentadoras así como rutas de servicio exprés.
- Desarrollo de un software que sea capaz de dimensionar corredores de transporte público y elaborar la programación del servicio para las rutas de un corredor de transporte.
- Generar modelos matemáticos para asignar corridas a empresas operadoras según sus porcentajes de participación del kilometraje total.
- Desarrollar metodologías para la estimación de la demanda y los parámetros de dimensionamiento de un corredor de transporte.



Referencias

Publicaciones:

- i. Alceda, A. (1997). *La Operación de los Transportes*. México: Secretaría de Transportes y Vialidad del Distrito Federal.
- ii. Bronson, R. (1993). *Investigación de Operaciones*. México: McGraw-Hill.
- iii. Castillo, E., Conejo, A., Pedregal, P., García, R., & Alguacil, N. (2002). *Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia*. España: Universidad de Castilla-La Mancha.
- iv. Centro de Transporte Sustentable. (2005). *Metrobús, bienvenidos a bordo*. México: Año 1. No. 1.
- v. Espino, R. (2003). *Análisis y predicción de la demanda de transporte de pasajeros. Una aplicación al estudio de dos corredores de transporte en Gran Canaria*. España: Tesis Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- vi. Gershenson, C. & Pineda L. (2009). *Why Does Public Transport Not Arrive on Time? The Pervasiveness of Equal Headway Instability*. PLoS ONE 4(10): e7292.doi:10.1371/journal.pone.0007292
- vii. Grava, S. (2003). *Urban Transportation Systems: Choices for communities*. USA: McGraw-Hill.
- viii. Hillier, F., & Lieberman, G. (2002). *Investigación de Operaciones*. México: McGraw-Hill.
- ix. Instituto Mexicano del Transporte. (2001). *NOTAS núm. 57: Aplicaciones potenciales de los ITS al transporte de carga por carretera en México*.
- x. Instituto Nacional de Geografía e Informática. (2007). *Encuesta 2007 Origen Destino*. México.
- xi. Juarez, F. (2008). *Taller BRT*. Guatemala: Volvo Buses Latino América.
- xii. LINDO Systems, Inc. (2011). *What'sBest! User's Manual*. USA.
- xiii. López, S., & Sánchez, I. (1999). *Didáctica de la Programación Lineal con Ordenador para Estudiantes de Administración y Dirección de Empresas*. España: Universidad de Sevilla, Revista de Enseñanza Universitaria No. 14-15.



- xiv. Molinero, A., & Sánchez, L. (2005). *Transporte Público: Planeación, diseño, operación y administración*. México: U.A.E.M.
- xv. Ortúzar, J., & Willumsen, L. (2008). *Modelos de Transporte*. España: Universidad de Cantabria.
- xvi. Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J., Barquín, J., & Linares, P. (2010). *Modelos Matemáticos de Optimización*. España: Universidad Pontificia Comillas.
- xvii. Suárez, J. (2009). *Evaluación Operativa-Financiera por tipo de flota vehicular en un corredor de transporte. Caso de estudio: Línea 2 de Metrobús, Ciudad de México*. México: Tesis U.N.A.M.
- xviii. Sussman, J. (2000). *Introduction to Transportation System*. USA: Artech House.
- xix. Taha, H. (2004). *Investigación de Operaciones (7ª ed.)*. México: Pearson Educación.
- xx. Transit Cooperative Research Program. (2007). *Report 118: Bus Rapid Transit Practitioner's Guide*. USA: Transportation Research Board.
- xxi. Urbanismo y Sistemas de Transporte S.A. de C.V. (2011). *Guía para el dimensionamiento de rutas de transporte público*. México.
- xxii. Vuchic, V. (1981). *Urban Public Transportation: Systems and Technology*. USA: Prentice Hall.
- xxiii. Vuchic, V. (2005). *Urban Transit: Operations, Planning and Economics*. USA: JOHN WILEY & SONS.
- xxiv. Wenglas, G. (1995). Una propuesta de transporte urbano para la ciudad de Guasave, Sinaloa. México: Tesis Universidad de Sonora.
- xxv. Wright, L. & Hook, W. (2007). *Bus Rapid Transit Planning Guide*. USA: Institute for Transportation and Development Policy.



Sitios WEB:

- i. Asociación Latino-Americana de Sistemas Integrados y BRT. (2011). *SIBRT*. Obtenido de <http://www.sibrtonline.org/por-que-sibr>
- ii. *Bus Rapid Transit, Across Latitudes and Cultures*. (2011). Obtenido de <http://www.brt.cl>
- iii. *Centro de Transporte Sustentable*. (2012). Obtenido de CTSEMBARQ México: <http://www.embarq.org/cts-mexico>
- iv. *Como sardinas: TransMilenio y el sobrecupo*. (2011). Obtenido de Ciudadanos en Red: <http://www.ciudadanosenred.com.mx/node/16059>
- v. *Descongestionaran Metrobús con unidades más amplias*. (2012). Obtenido de El Universal: <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad/90582.html>
- vi. *Ferrocarriles Suburbanos*. (2011). Obtenido de <http://www.fsuburbanos.com/index.php>
- vii. *Ficha técnica VOLVO 7300*. (2011). Obtenido de Volvo - México: <http://www.volvobuses.com/bus/mexico/es-mx/productos/busesurbanos/7300BRT/Pages/fichat%C3%A9cnica.aspx>
- viii. *Frontline Solvers: Developers of the Excel Solver*. (2011). Obtenido de <http://www.solver.com/>
- ix. *Gaceta Oficial del Distrito Federal de las fechas: 24/09/2004, 01/10/2004, 06/10/2004, 12/11/2004 y 09/03/2005*. (2011). Obtenido de http://www.df.gob.mx/wb/gdf/gaceta_oficial
- x. *Informa anual de actividades 2007 y primer trimestre 2008*. (2012). Obtenido de http://www.metrobus.df.gob.mx/transparencia/documentos/art14/XIX/inform_eanual071ertrim08consejo.pdf
- xi. *Institute for Transportation & Development Policy Mexico*. (2011). Obtenido de <http://mexico.itdp.org/>
- xii. *La importancia de las redes integradas: el caso de Curitiba, Brasil*. (2011). Obtenido de <http://www.distintaslatitudes.net/la-importancia-de-las-redes-integradas-el-caso-de-curitiba-brasil>

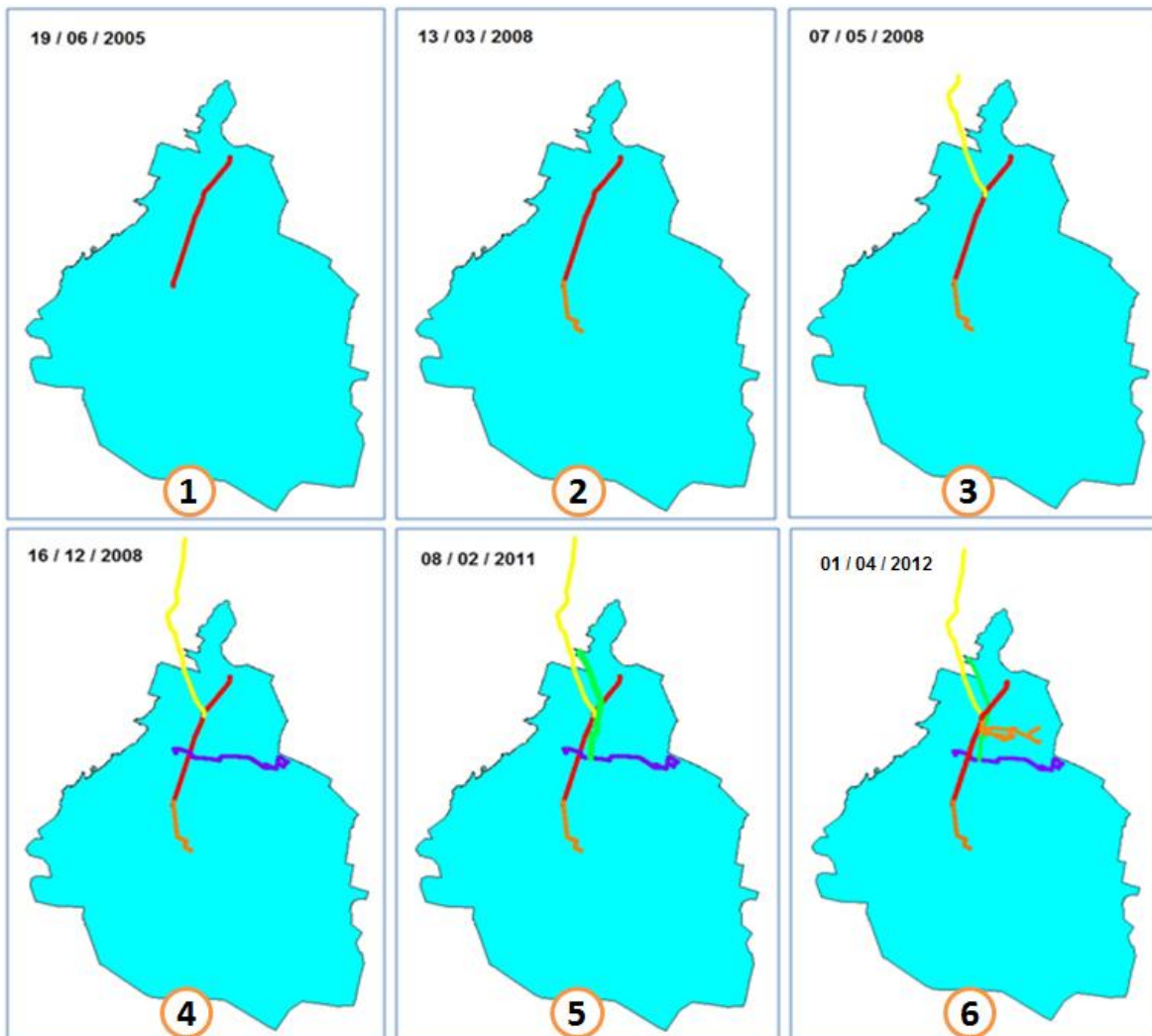


- xiii. *La investigación de operaciones y el uso de modelos.* (2011). Obtenido de <http://www.investigacion-operaciones.com/Formulacion%20Problemas.htm>
- xiv. *LINDO Systems: Optimization Software.* (2013). Obtenido de <http://www.lindo.com/>
- xv. *Línea 1 del Metrobús ¿crónica de un colapso anunciado?* (2012). Obtenido de Ciudadanos en Red: <http://www.ciudadanosenred.org.mx/articulos/l-nea-1-del-metrob-s-cr-nica-un-colapso-anunciado>
- xvi. *“Lucha constante” subir a L1 de Metrobús.* (2012) Obtenido de <http://www.eluniversaldf.mx/home/nota43424.html>
- xvii. *National Bus Rapid Transit Institute.* (2011). Obtenido de <http://www.nbrti.org/plan.html>
- xviii. *Saturada, la línea del Metrobús; en 7 años creció la demanda 122%.* (2012) Obtenido de <http://www.jornada.unam.mx/2012/08/27/capital/040n1cap>
- xix. *Secretaría de Transportes y Vialidad del Distrito Federal.* (2013). Obtenido de <http://www.setravi.df.gob.mx/wb/stv/inicio>
- xx. *Sistema de Corredores de Transporte Público de Pasajeros del D.F., Metrobús.* (2013). Obtenido de <http://www.metrobus.df.gob.mx/>
- xxi. *Sobrecupo pone en riesgo el Metrobús.* (2012). Obtenido de Milenio Online: <http://impreso.milenio.com/node/8787383>
- xxii. *Sustainable Urban Transport Project.* (2011). Obtenido de http://www.sutp.org/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1
- xxiii. *TransMilenio.* (2012). Obtenido de <http://www.transmilenio.gov.co/WebSite/Default.aspx>
- xxiv. *WhatsBest.* (2013). Obtenido de Investigación de Operaciones S.A.: <http://www.iosa.com.pe/productos/whatsbest>

Anexos

Anexo A: Cronología del crecimiento del Sistema Metrobús.

Fuente: Elaboración propia.

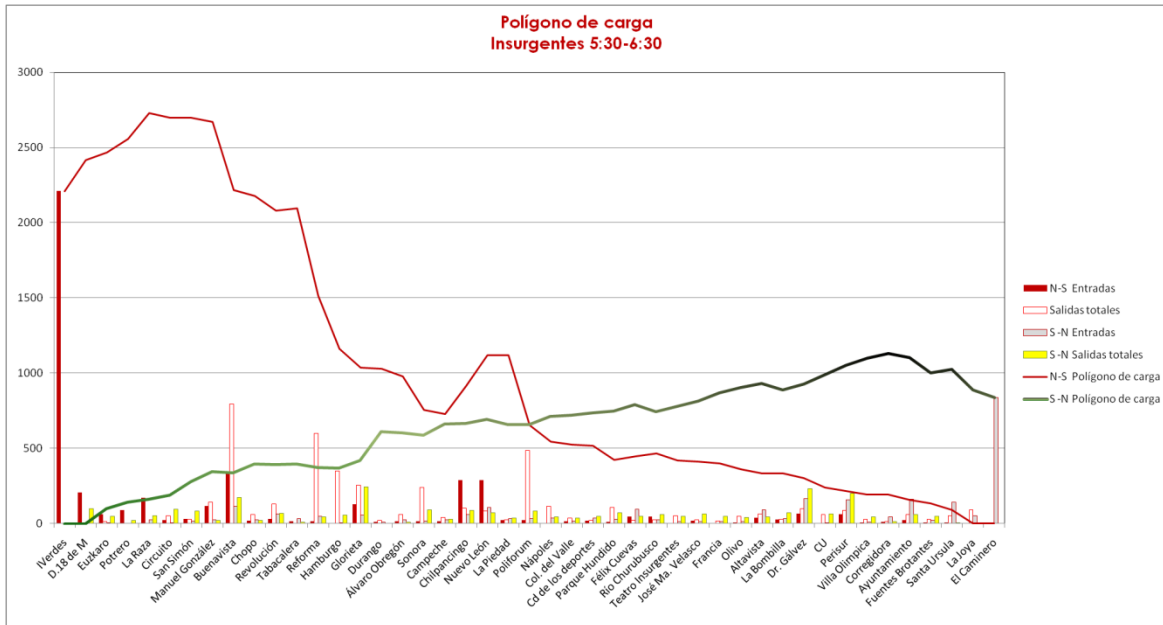


Descripción:

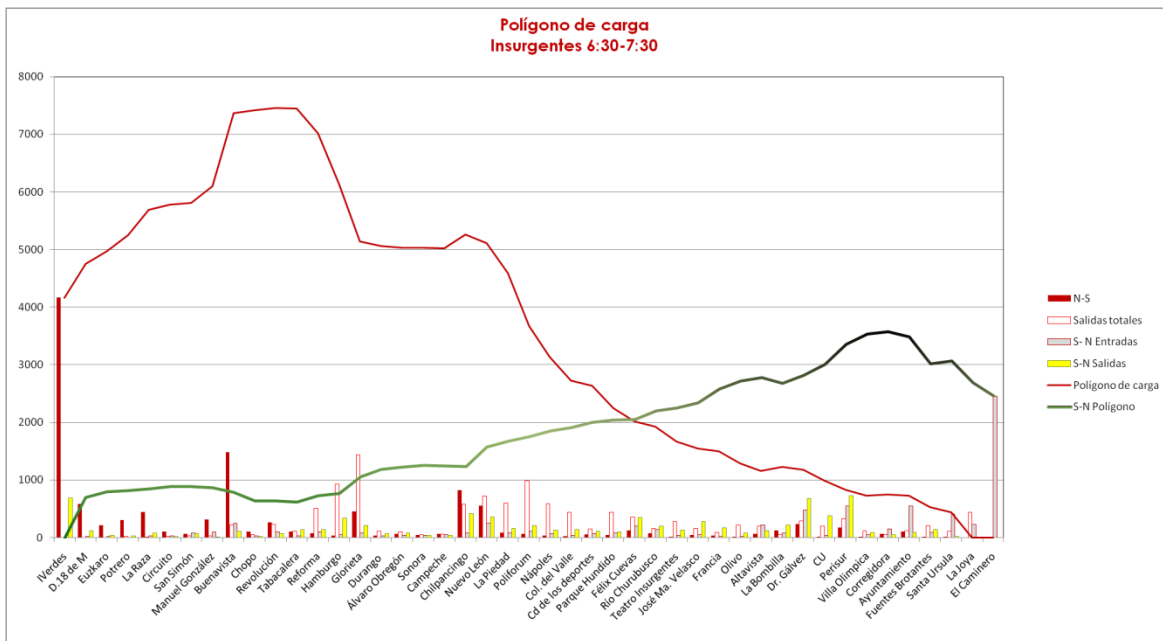
1. Se inaugura el CTPP Insurgentes (Indios Verdes – Dr. Gálvez).
2. Se amplía el servicio del primer corredor con la puesta en operación del CTPP Insurgentes Sur (Dr. Gálvez – El Caminero).
3. Se inaugura el primer tramo del Tren Suburbano (Buenavista – Lechería).
4. Se inaugura el CTPP Eje 4 Sur (Tacubaya – Tepalcates) y se amplía el servicio del Tren Suburbano (Lechería – Cuautitlán).
5. Se inaugura el CTPP Eje 1 Poniente (Tenayuca - Etiopia).
6. Se inaugura el CTPP Centro Histórico (Buenavista – San Lázaro – Aeropuerto).



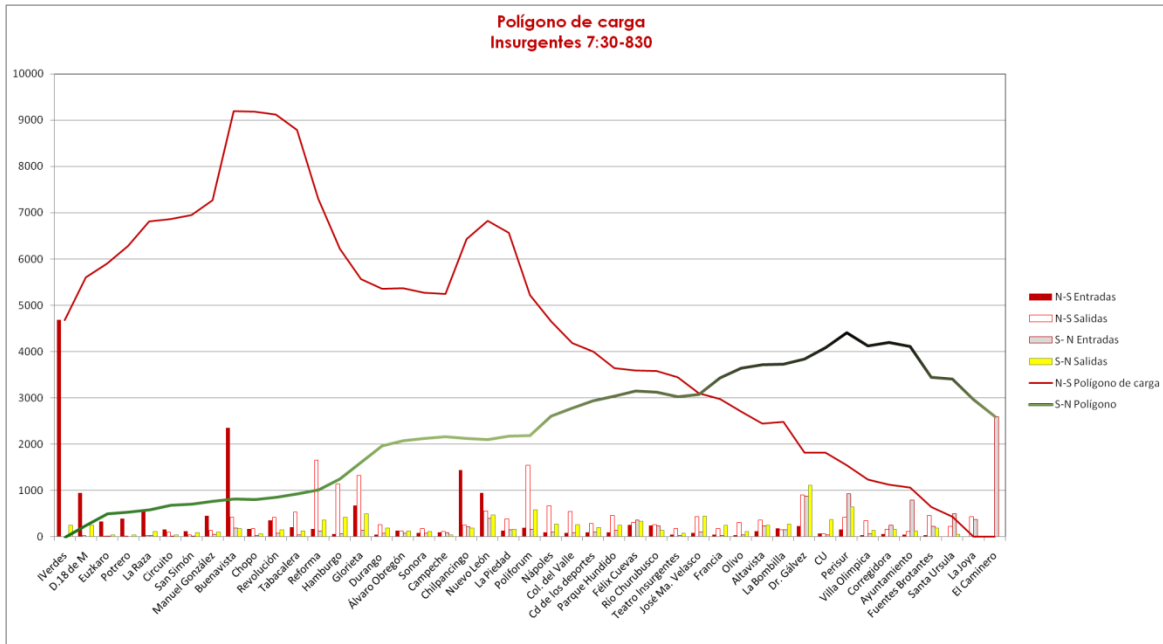
Anexo B: Polígonos de Carga de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, 2009. Fuente: Metrobús.



Polígono de carga de 5:30 a 6:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.
Fuente: Metrobús.

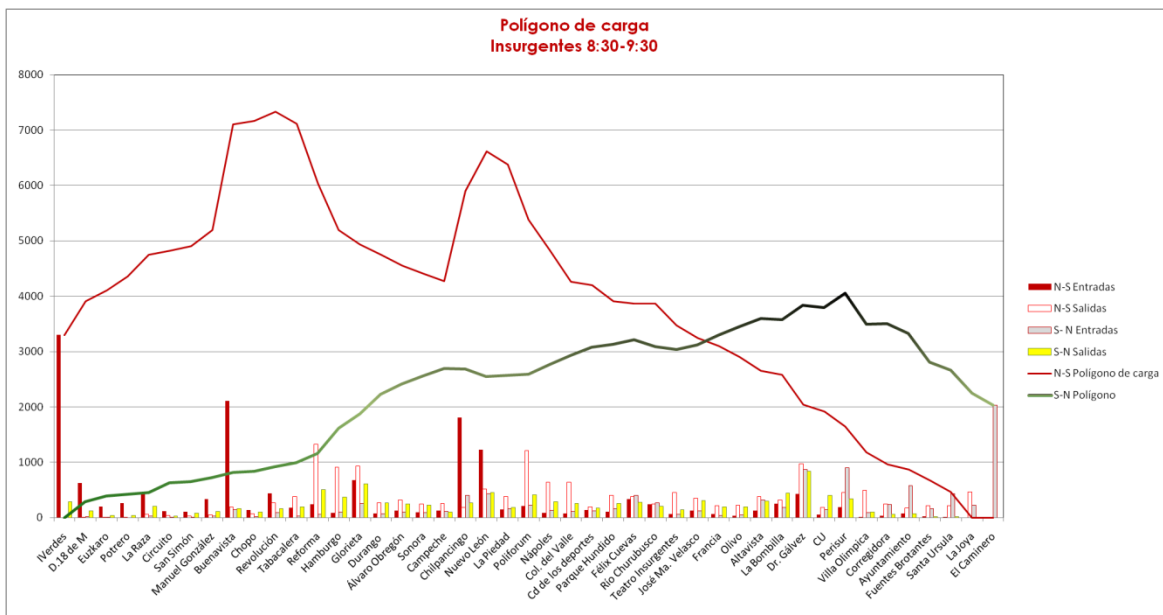


Polígono de carga de 6:30 a 7:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.
Fuente: Metrobús.



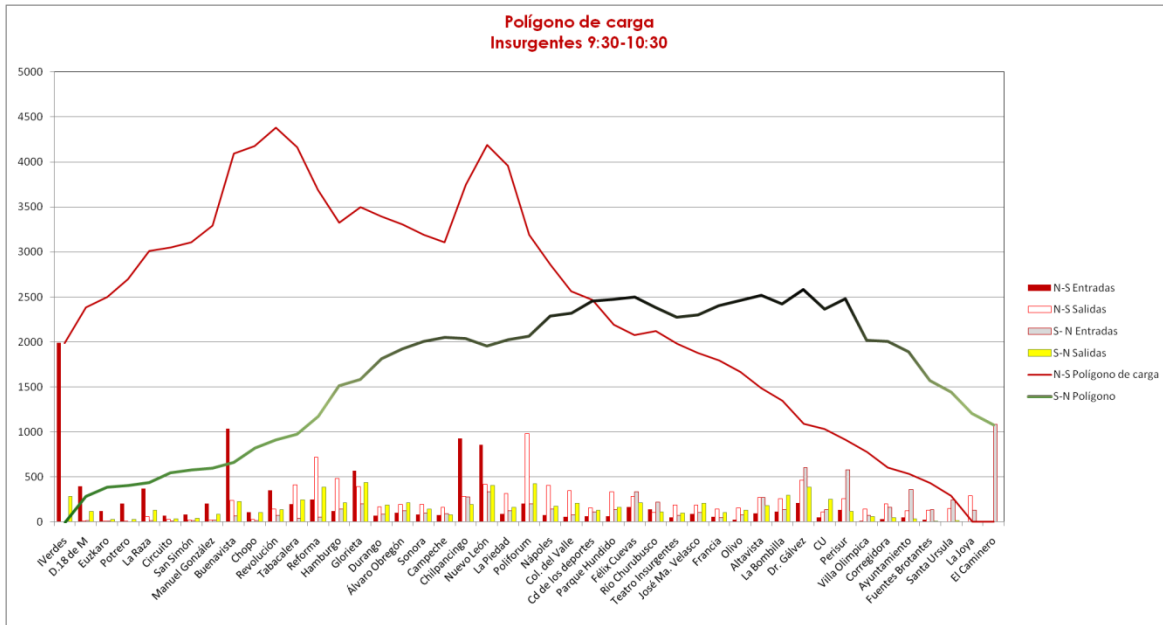
Polígono de carga de 7:30 a 8:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.

Fuente: Metrobús.



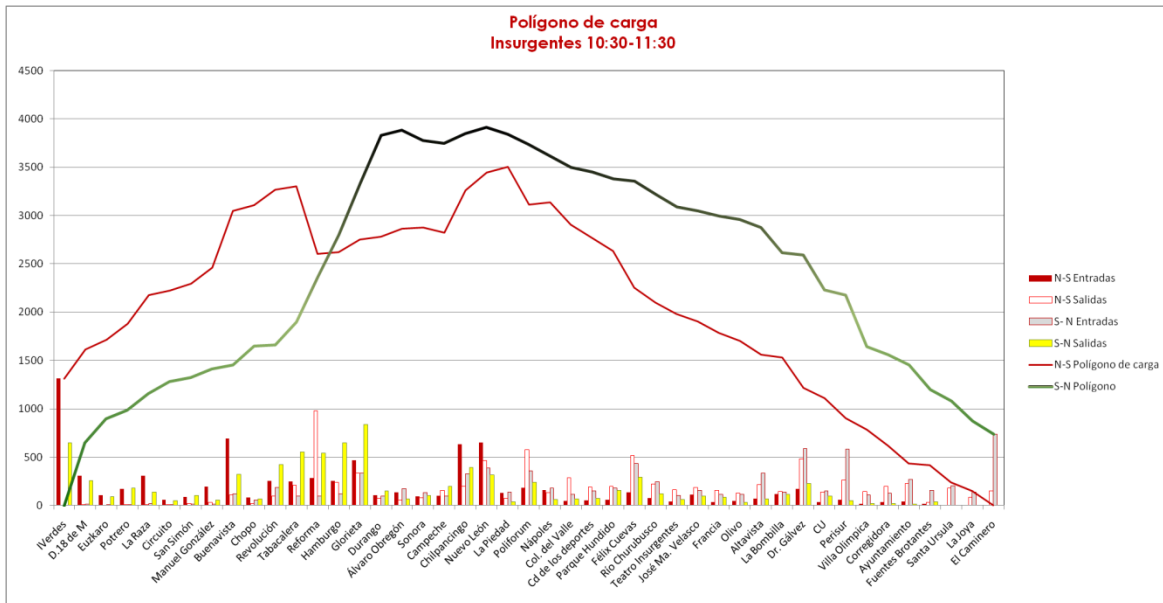
Polígono de carga de 8:30 a 9:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.

Fuente: Metrobús.



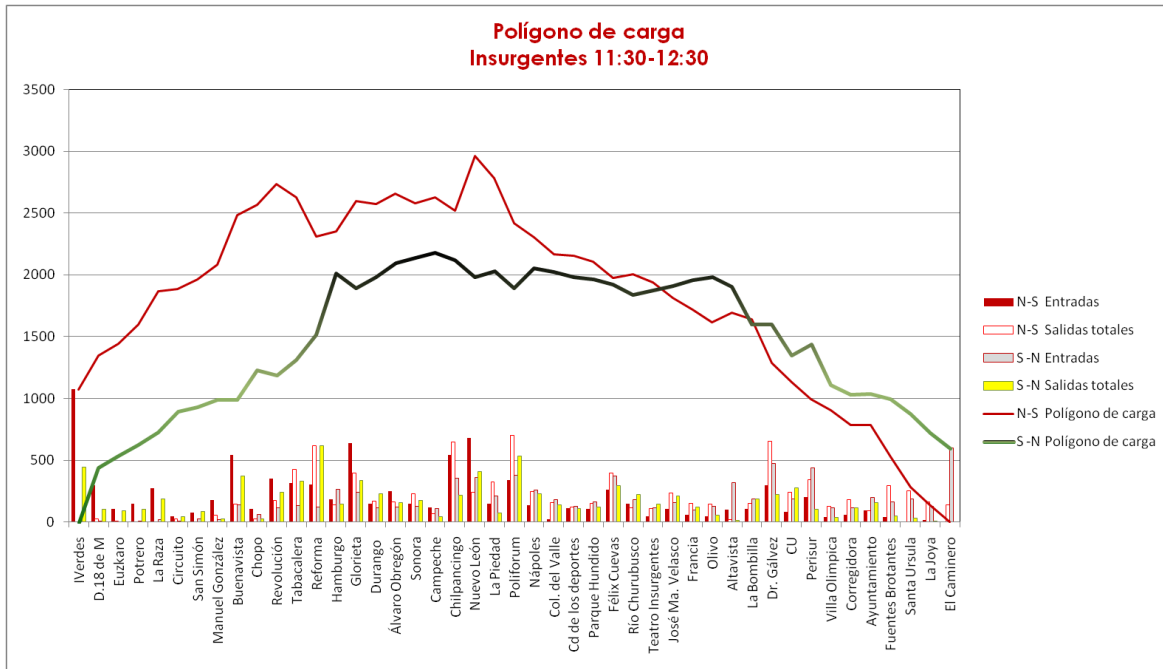
Polígono de carga de 9:30 a 10:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.

Fuente: Metrobús.



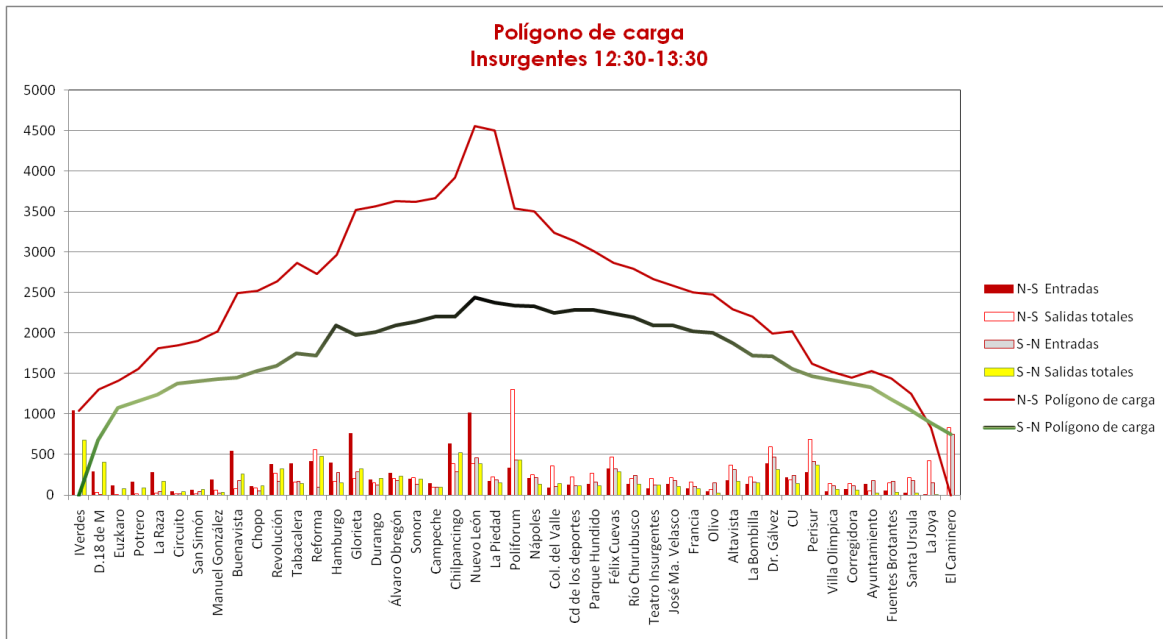
Polígono de carga de 10:30 a 11:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.

Fuente: Metrobús.



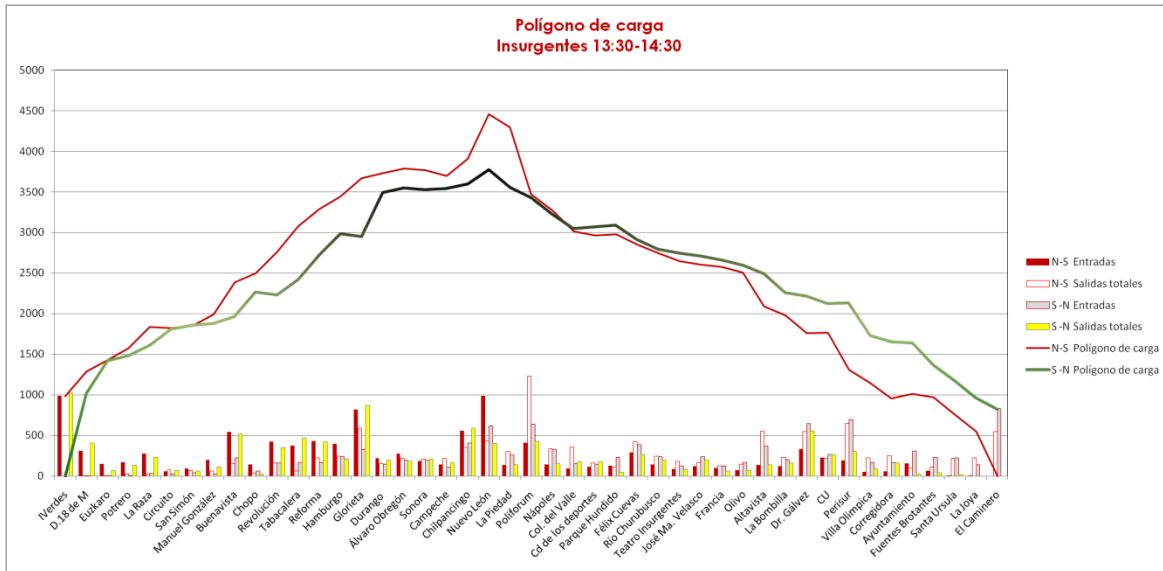
Polígono de carga de 11:30 a 12:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.

Fuente: Metrobús.



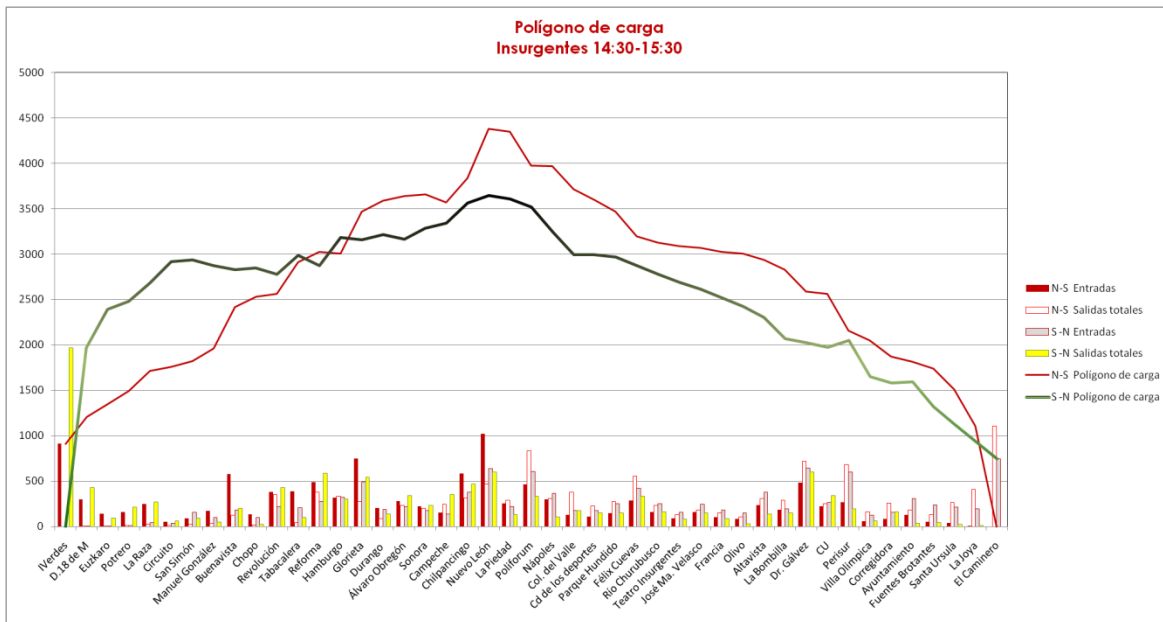
Polígono de carga de 12:30 a 13:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.

Fuente: Metrobús.



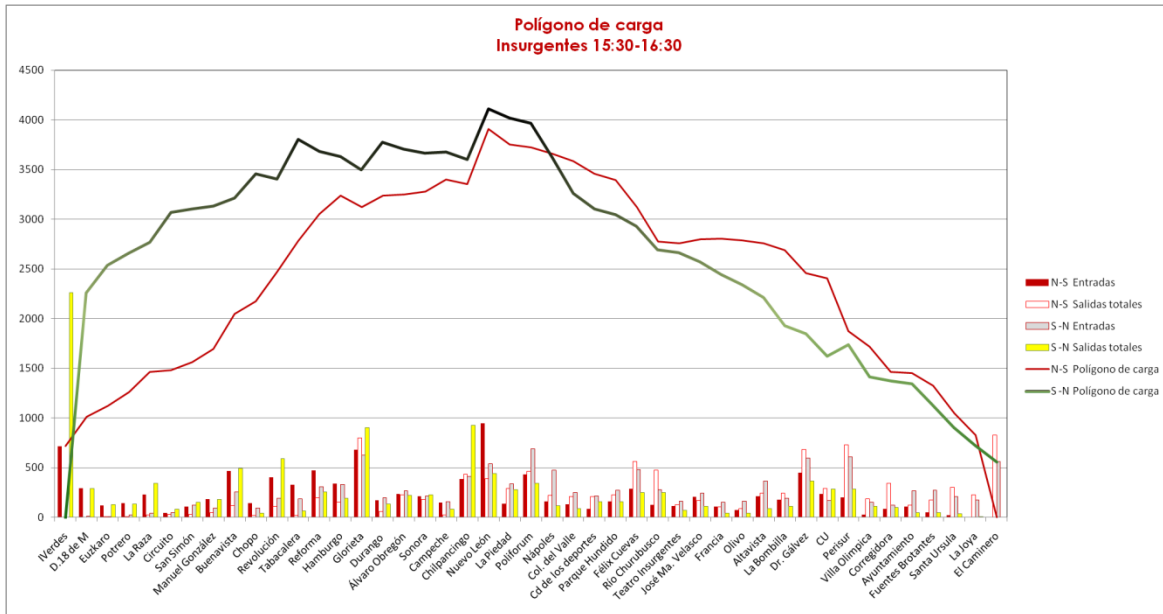
Polígono de carga de 13:30 a 14:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.

Fuente: Metrobús.



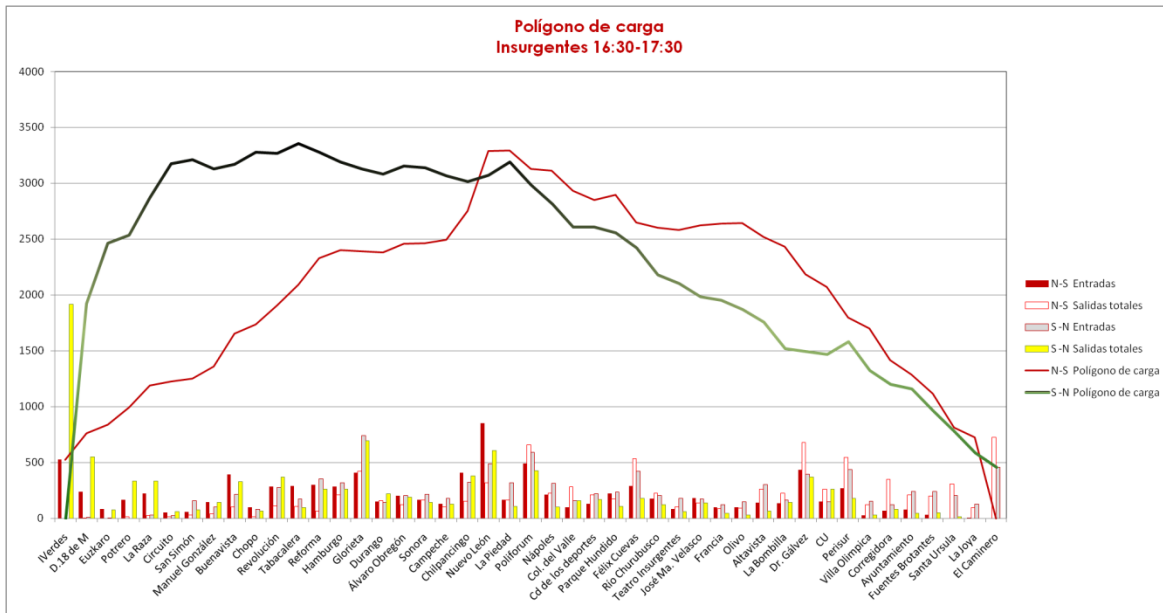
Polígono de carga de 14:30 a 15:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.

Fuente: Metrobús.



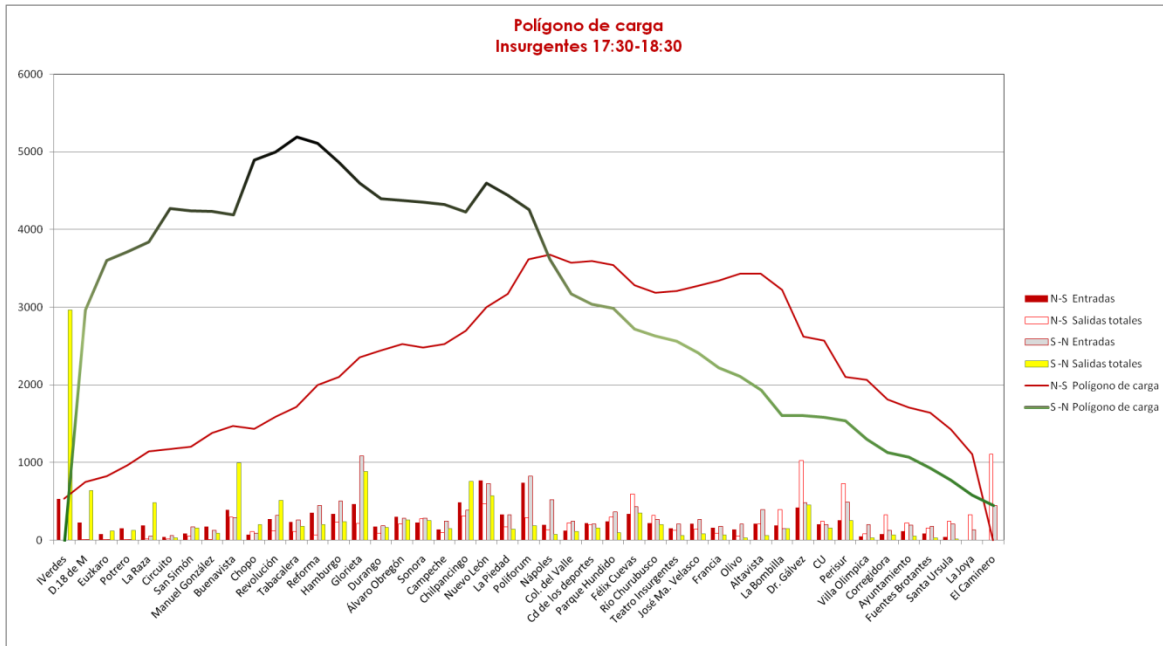
Polígono de carga de 15:30 a 16:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.

Fuente: Metrobús.



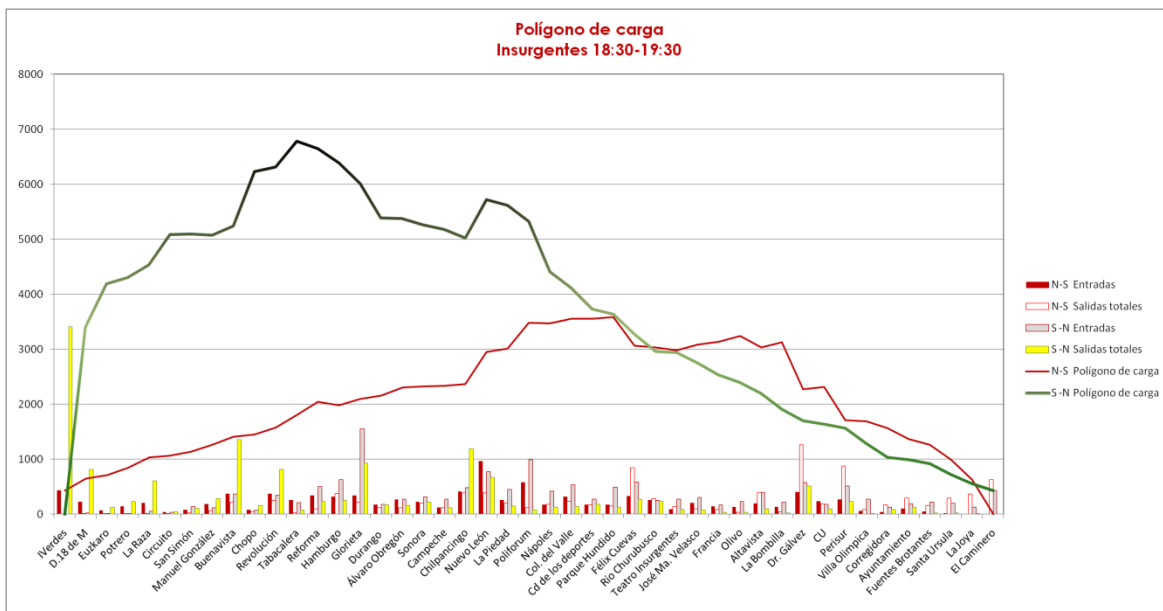
Polígono de carga de 16:30 a 17:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.

Fuente: Metrobús.



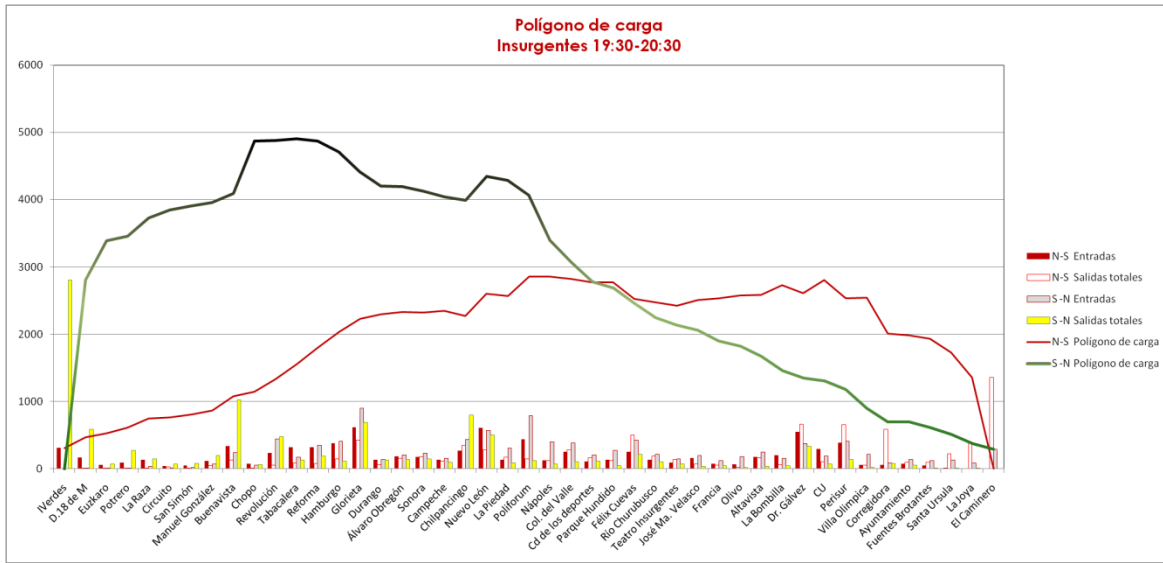
Polígono de carga de 17:30 a 18:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.

Fuente: Metrobús.



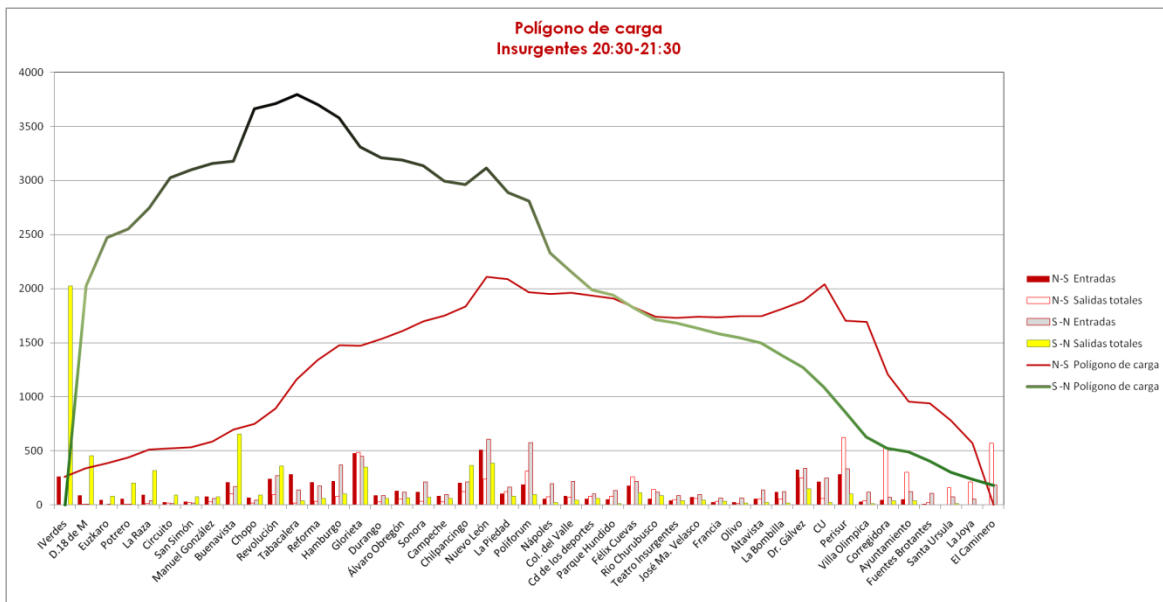
Polígono de carga de 18:30 a 19:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.

Fuente: Metrobús.



Polígono de carga de 19:30 a 20:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.

Fuente: Metrobús.



Polígono de carga de 20:30 a 21:30 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, año 2009.

Fuente: Metrobús.






Anexo C: Formato de recopilación de información para Estudios de Frecuencias de Paso y Cargas.

		GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL Secretaría de Transportes y Vialidad Dirección General de Transporte																																											
ESTUDIO DE FRECUENCIA DE PASO Y CARGAS																																													
Ruta: _____		Sentido: _____																																											
Origen-Destino: _____		Nombre del Aforador: _____																																											
Ubicación del punto: _____		Fecha: _____ Hoja ___ de ___																																											
Hora	Ruta	Número Económico ó Placa	Tipo de Unidad	Volumen de Pasajeros																																									
				Vacio	1/4 Lleno	1/2 Lleno	3/4 Lleno	Lleno	Saturado																																				
Simbología: <table style="display: inline-table; vertical-align: top; margin-left: 20px;"> <tr><td>C=Combi</td></tr> <tr><td>M=Microbús</td></tr> <tr><td>A=Autobús</td></tr> </table> <table style="display: inline-table; vertical-align: top; margin-left: 20px;"> <tr><td>T=Trolebús</td></tr> <tr><td>O=Otro</td></tr> </table>				C=Combi	M=Microbús	A=Autobús	T=Trolebús	O=Otro	<table border="1" style="font-size: small; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td><i>Combi</i></td> <td><i>Micro</i></td> <td><i>Autobús</i></td> <td><i>Trolebús</i></td> </tr> <tr> <td>Vacio</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td>1/4 Lleno</td> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">9</td> <td style="text-align: center;">20</td> <td style="text-align: center;">25</td> </tr> <tr> <td>1/2 Lleno</td> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">18</td> <td style="text-align: center;">40</td> <td style="text-align: center;">50</td> </tr> <tr> <td>3/4 Lleno</td> <td style="text-align: center;">9</td> <td style="text-align: center;">26</td> <td style="text-align: center;">60</td> <td style="text-align: center;">75</td> </tr> <tr> <td>Lleno</td> <td style="text-align: center;">12</td> <td style="text-align: center;">33</td> <td style="text-align: center;">75</td> <td style="text-align: center;">85</td> </tr> <tr> <td>Saturado</td> <td style="text-align: center;">13</td> <td style="text-align: center;">40</td> <td style="text-align: center;">85</td> <td style="text-align: center;">98</td> </tr> </table>			<i>Combi</i>	<i>Micro</i>	<i>Autobús</i>	<i>Trolebús</i>	Vacio	0	0	0	0	1/4 Lleno	4	9	20	25	1/2 Lleno	6	18	40	50	3/4 Lleno	9	26	60	75	Lleno	12	33	75	85	Saturado	13	40	85	98
C=Combi																																													
M=Microbús																																													
A=Autobús																																													
T=Trolebús																																													
O=Otro																																													
	<i>Combi</i>	<i>Micro</i>	<i>Autobús</i>	<i>Trolebús</i>																																									
Vacio	0	0	0	0																																									
1/4 Lleno	4	9	20	25																																									
1/2 Lleno	6	18	40	50																																									
3/4 Lleno	9	26	60	75																																									
Lleno	12	33	75	85																																									
Saturado	13	40	85	98																																									

Fuente: SETRAVI (2005).



Anexo D: Formato de recopilación de información para Estudios de Ascenso - Descenso.



 	GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL Secretaría de Transportes y Vialidad Dirección General de Transporte					
ESTUDIO DE ASCENSO-DESCENSO						
Ruta: _____ Origen - Destino: _____ Sentido: _____ Nombre del Aforador: _____						
Hora de Salida: _____ Tiempo en terminal (min): _____ Fecha: _____ Hora de Llegada: _____ Tipo de unidad: _____ Puerta: _____						
Hora de Llegada	Hora de Salida	Numero de Parada	Ubicación de la Parada	Ascensos	Descensos	Ocupación
: :	: :					
: :	: :					
: :	: :					
: :	: :					
: :	: :					
: :	: :					
: :	: :					
: :	: :					
: :	: :					
: :	: :					
: :	: :					
: :	: :					
: :	: :					
: :	: :					
: :	: :					
: :	: :					
: :	: :					

Fuente: SETRAVI (2005).



Anexo E: Ejemplo de Encuestas Origen-Destino.

Ejemplo 1:

		GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL Secretaría de Transportes y Vialidad Dirección General de Transporte			
ESTUDIO DE ORIGEN-DESTINO					
Ruta: _____		Origen - Destino: _____			
Sentido: _____		Nombre del Encuestador: _____			
Hombre	<input type="checkbox"/>	Mujer	<input type="checkbox"/>	Fecha: _____	
¿De donde viene? _____		¿A donde va? _____			
¿Utiliza la Av. Insurgentes en su recorrido?		<input type="checkbox"/>	SI	<input type="checkbox"/>	NO
¿En que lugar de insurgentes se baja? _____					

Fuente: SETRAVI (2005).

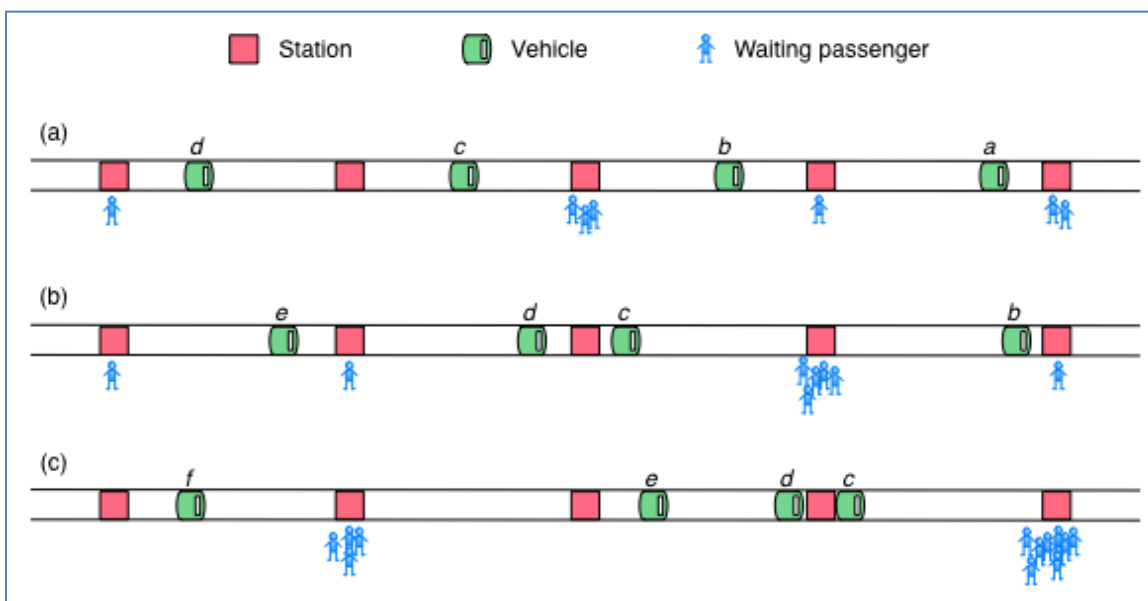
Ejemplo 2:

Estudio de Origen - Destino en Terminales y Paraderos		
1	No. de Encuesta _____ No. de Terminal _____ Hora de la Entrevista _____	
2	El Entrevistado se Encuentra (1) Parado _____ (2) Sentado _____	<input type="checkbox"/>
3	Número de Usuarios en la Parada _____	<input type="checkbox"/>
4	Ocupación _____	<input type="checkbox"/>
5	Motivo del Viaje: (1) Trabajo _____ (2) Estudio _____ (3) Recreación _____ (4) Atención Médica _____ (5) Compras _____ (6) Regreso al Hogar _____ (7) Familiar _____ (8) Otros _____	<input type="checkbox"/>
6	Frecuencia con que utiliza el transporte urbano a esta hora (1) Una vez al día _____ (2) Dos o Tres veces por semana _____ (3) Semanal _____ (4) Esporadicamente _____	<input type="checkbox"/>
7	Origen del Viaje _____	<input type="checkbox"/>
8	Destino del Viaje _____	<input type="checkbox"/>
9	¿Realiza transbordo? (1) Si _____ (2) No _____	<input type="checkbox"/>

Fuente: Wenglas (1995).

Anexo F: Inestabilidad de intervalos iguales.

La configuración más eficiente para servir a pasajeros es cuando los vehículos llegan a las estaciones con intervalos iguales. Sin embargo, esta configuración es inestable por su naturaleza. Sin ninguna restricción, la inestabilidad de intervalos iguales reduce considerablemente la eficiencia y la capacidad de un sistema de transporte público. La siguiente figura describe el fenómeno de la inestabilidad de intervalos iguales.



Fuente: Gershenson & Pineda (2009).

- Se acumulan pasajeros en las estaciones de manera heterogénea.
- El vehículo c se retrasa debido a la alta densidad de pasajeros en la tercera estación, aumentando su intervalo con b y reduciendo su intervalo con d. En la cuarta estación se acumulan más pasajeros, ya que tarda más tiempo en pasar el vehículo retrasado c.
- Esto hace que el vehículo c se retrase, aumentando aún más su intervalo con b, mientras que d y e alcanzan a c, formando un convoy. Al pasar mucho tiempo sin que un vehículo de servicio a las estaciones, se acumulan muchos pasajeros, mientras que muchos vehículos van casi vacíos detrás de los vehículos retrasados, ya que hay menos pasajeros en las estaciones después de que pasa el primer vehículo del convoy.



Anexo G: Matrices de Viaje de las rutas de Metrobús Línea1.

Matriz de Viajes de las rutas A1, A2, A3 y A7 que actualmente brindan servicio en la Línea 1 del Sistema Metrobús. (Fuente: Metrobús)

RUTA A1: INDIOS VERDES - DOCTOR GÁLVEZ		No. AUTOBUSES: 24 TC: 133 MIN																
CORRIDA	ORIGEN - DESTINO	NÚMERO DE VUELTAS																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8								
1 BI	Indios Verdes				07:07	09:15	09:18	11:29	11:32	13:41	13:44	15:51	15:54	18:09	18:12	20:28	20:31	22:48
	Dr. Gálvez				08:08	08:14	10:20	10:26	12:34	12:40	14:46	14:52	16:57	17:03	19:17	19:23	21:37	21:43
2	Indios Verdes		05:06	07:10	07:13	09:21	09:24	11:33					15:59	18:14	18:17	20:34	20:37	22:54
	Dr. Gálvez		06:06	06:12	08:14	08:20	10:26	10:32					17:03	17:09	19:23	19:29	21:43	21:49
3 BI	Indios Verdes				07:18	09:26	09:29	11:38	11:41	13:49	13:52	16:02	16:05	18:20	18:23	20:40	20:43	23:00
	Dr. Gálvez				08:19	08:25	10:31	10:37	12:42	12:48	14:54	15:00	17:09	17:15	19:29	19:35	21:49	21:55
4	Indios Verdes		05:16	07:20	07:23	09:32	09:35	11:44	11:47	13:56	13:59	16:08	16:11	18:26	18:29	20:46	20:49	23:06
	Dr. Gálvez		06:16	06:22	08:25	08:31	10:37	10:43	12:49	12:55	15:01	15:07	17:15	17:21	19:35	19:41	21:55	22:01
5 BI	Indios Verdes				07:29	09:37	09:40	11:52	11:55	14:04	14:07	16:13	16:16	18:32	18:35	20:51	20:54	23:12
	Dr. Gálvez				08:30	08:36	10:42	10:48	12:56	13:02	15:08	15:14	17:21	17:27	19:41	19:47	22:01	22:07
6	Indios Verdes		05:27	07:31	07:34	09:43	09:46	11:55					16:21	18:37	18:40	20:59	21:02	23:17
	Dr. Gálvez		06:27	06:33	08:36	08:42	10:48	10:54					17:26	17:32	19:46	19:52	22:07	22:13
7 BI	Indios Verdes				07:39	09:48	09:51	12:00	12:03	14:11	14:14	16:24	16:27	18:43	18:46	21:03		
	Dr. Gálvez				08:41	08:47	10:53	10:59	13:04	13:10	15:16	15:22	17:32	17:38	19:52	19:58		
8	Indios Verdes	05:34	05:37	07:42	07:45	09:54	09:57	12:06	12:09	14:18	14:21	16:29	16:32	18:49	18:52	21:09	21:12	
	Dr. Gálvez	04:36	06:37	06:43	08:47	08:53	10:59	11:05	13:11	13:17	15:23	15:29	17:38	17:44	19:58	20:04	22:18	
9 BI	Indios Verdes				07:50	09:58	10:01	12:12	12:15	14:23	14:26	16:35	16:38	18:55	18:58	21:15		
	Dr. Gálvez				08:52	08:58	11:04	11:10	13:17	13:23	15:28	15:34	17:44	17:50	20:04	20:10		
10	Indios Verdes	05:44	05:47	07:53	07:56	10:05	10:08	12:19	12:22	14:28	14:31	16:40	16:43	19:01	19:04	21:21	21:24	
	Dr. Gálvez	04:47	06:47	06:53	08:58	09:04	11:10	11:16	13:24	13:30	15:34	15:40	17:50	17:56	20:10	20:16	22:30	
11 BI	Indios Verdes		05:54	07:57	08:00	10:09	10:12	12:22				14:37	16:47	16:50	19:07	19:10	21:27	
	Dr. Gálvez		06:54	07:00	09:03	09:09	11:15	11:21				15:39	15:45	17:56	18:02	20:16	20:22	
12	Indios Verdes	05:56	05:59	08:04	08:07	10:15	10:18	12:27	12:30	14:40	14:43	16:51	16:54	19:12	19:15	21:32	21:35	
	Dr. Gálvez	04:58	06:59	07:05	09:09	09:15	11:21	11:27	13:32	13:38	15:45	15:51	18:01	18:07	20:21	20:27		
	El Caminero																	22:54
13 BI	Indios Verdes		06:04	08:09	08:12	10:21	10:24	12:33	12:36	14:45	14:48	16:58	17:01	19:18	19:21	21:38		
	Dr. Gálvez		07:04	07:10	09:14	09:20	11:26	11:32	13:38	13:44	15:50	15:56	18:07	18:13	20:27	20:33		
14	Indios Verdes	06:06	06:09	08:15	08:18	10:27	10:30	12:39	12:42	14:51	14:54	17:04	17:07	19:25	19:28	21:44	21:47	
	Dr. Gálvez	05:08	07:09	07:15	09:20	09:26	11:32	11:38	13:44	13:50	15:56	16:02	18:13	18:19	20:33	20:39		
	El Caminero																	23:06
15 BI	Indios Verdes		06:14	08:19	08:22	10:32	10:35	12:46	12:49	14:58	15:01	17:10	17:13	19:31	19:34	21:50		
	Dr. Gálvez		07:14	07:20	09:25	09:31	11:39	11:45	13:51	13:57	16:01	16:07	18:19	18:25	20:39	20:45		
16	Indios Verdes	06:17	06:20	08:26	08:29	10:38	10:41					17:16	17:19	19:36	19:39	21:56	21:59	
	Dr. Gálvez	05:19	07:20	07:26	09:31	09:37	11:43					16:13	18:25	18:31	20:45	20:51	23:05	
17 BI	Indios Verdes		06:25	08:31	08:34	10:43	10:46	12:54	12:57	15:07	15:10	17:23	17:26	19:42	19:45	22:02		
	Dr. Gálvez		07:25	07:31	09:36	09:42	11:47	11:53	13:59	14:05	16:12	16:18	18:31	18:37	20:51	20:57		
18	Indios Verdes	06:27	06:30	08:37	08:40	10:50	10:53	13:01	13:04	15:13	15:16	17:27	17:30	19:47	19:50	22:07	22:10	
	Dr. Gálvez	05:29	07:30	07:36	09:42	09:48	11:54	12:00	14:06	14:12	16:18	16:24	18:36	18:42	20:56	21:02		
	El Caminero																	23:29
19 BI	Indios Verdes		06:37	08:42	08:45	10:54	10:57	13:06	13:09	15:18	15:21	17:33	17:36	19:52	19:55	22:13		
	Dr. Gálvez		07:35	07:41	09:47	09:53	11:59	12:05	14:12	14:18	16:23	16:29	18:42	18:48	21:02	21:08		
20	Indios Verdes	06:38	06:41	08:47	08:50	11:00	11:03	13:14	13:17	15:23	15:26	17:40	17:43	19:59	20:02	22:19	22:22	
	Dr. Gálvez	05:40	07:41	07:47	09:53	09:59	12:05	12:11	14:19	14:25	16:29	16:35	18:48	18:54	21:08	21:14		
	El Caminero																	23:41
21 BI	Indios Verdes		06:46	08:53	08:56	11:05	11:08	13:17			15:32	17:45	17:48	20:05	20:08	22:25		
	Dr. Gálvez		07:46	07:52	09:58	10:04	12:10	12:16			16:34	16:40	18:54	19:00	21:14	21:20		
22	Indios Verdes	06:48	06:51	08:59	09:02	11:11	11:14	13:22	13:25	15:34	15:37	17:52	17:55	20:11	20:14	22:31	22:34	
	Dr. Gálvez	05:50	07:52	07:58	10:04	10:10	12:16	12:22	14:27	14:33	16:40	16:46	19:00	19:06	21:20	21:26		
	El Caminero																	23:53
23 BI	Indios Verdes		06:57	09:04	09:07	11:16	11:19	13:28	13:31	15:40	15:43	17:57	18:00	20:17	20:20	22:37		
	Dr. Gálvez		07:57	08:03	10:09	10:15	12:21	12:27	14:33	14:39	16:46	16:52	19:06	19:12	21:26	21:32		
24	Indios Verdes	06:59	07:02	09:10	09:13	11:22	11:25	13:34	13:37	15:46	15:49	18:02	18:05	20:22	20:25	22:41	22:44	
	Dr. Gálvez	06:01	08:03	08:09	10:15	10:21	12:27	12:33	14:39	14:45	16:51	16:57	19:11	19:17	21:31	21:37		
	El Caminero																	00:04



Anexo H: Documentos de ejecución y control operativo de Metrobús.

Control de Salidas de la Terminal Dr. Gálvez para la ruta A1 de la Línea 1 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México.

CONTROL DE SALIDAS DE RUTA A1 EN TERMINAL DOCTOR GÁLVEZ

Nombre del Supervisor: _____		Fecha: _____	
Inicio de labores según rol: _____		Hora de presentación a terminal: _____	
Salida según rol: _____		Hora de salida de terminal: _____	
		Período: ENERO DE 2013	

Autobús		Empresa Operadora	Horario de arribo	Horario de salida		Porcentaje de ocupación	Conductos / Observaciones
Corrida	No. Econ.			Programada	Real		
8		EMPRESA		04:36			
10		EMPRESA		04:47			
12		EMPRESA		04:58			
14		EMPRESA		05:08			
16		EMPRESA		05:19			
18		EMPRESA		05:29			
20		EMPRESA		05:40			
22		EMPRESA		05:50			
24		EMPRESA		06:01			
2		EMPRESA		06:12			
4		EMPRESA		06:22			
6		EMPRESA		06:33			
8		EMPRESA		06:43			
10		EMPRESA		06:53			
11		EMPRESA		07:00			
12		EMPRESA		07:05			
13		EMPRESA		07:10			
14		EMPRESA		07:15			
15		EMPRESA		07:20			
16		EMPRESA		07:26			
17		EMPRESA		07:31			
18		EMPRESA		07:36			
19		EMPRESA		07:41			
20		EMPRESA		07:47			
21		EMPRESA		07:52			
22		EMPRESA		07:58			
23		EMPRESA		08:03			
24		EMPRESA		08:09			
1		EMPRESA		08:14			
2		EMPRESA		08:20			

SUPERVISOR EN SERVICIO	SUPERVISOR DE RELEVO	Vo. Bo. CC.	HOJA: 1
NOMBRE Y FIRMA	NOMBRE Y FIRMA	NOMBRE Y FIRMA	DE: 6

Fuente: Metrobús.



Itinerario de servicio de la corrida 2 en la ruta A1 de la Línea 1 del Sistema Metrobús.




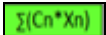


ITINERARIO DE SERVICIO						Corrida:	2	No. Eco.
Ruta: A1		EMPRESA				Periodo del:		ENERO DE 2013
Inicio de jornada:	05:06	Terminal:	Indios Verdes	Desincorporación:	11:33	Terminal:	Indios Verdes	
Término de jornada:	22:54	Terminal:	Indios Verdes	Incorporación:	15:59	Terminal:	Indios Verdes	
Firma del supervisor en		Indios Verdes		Dr. Gálvez		Firma del supervisor en		
INDIOS VERDES		Arribos	Salidas	Arribos	Salidas	DR. GÁLVEZ		
			05:06	06:06	06:12			
		07:10	07:13	08:14	08:20			
		09:21	09:24	10:26	10:32			
		11:33						
			15:59	17:03	17:09			
		18:14	18:17	19:23	19:29			
		20:34	20:37	21:43	21:49			
		22:54						

Fuente: Metrobús.







Anexo I: Descripción de la barra de herramientas de What'sBest!

El uso de la barra de herramientas es relativamente sencillo, pues se basa principalmente en la selección de las celdas de la hoja de cálculo que representen cada uno de los componentes del modelo para después hacer clic, según el componente, en alguno de los siguientes botones de la barra:

Función	Botón	Nombre	Características
Definen las variables de decisión 		Make Adjustable	<ul style="list-style-type: none"> - Se utiliza para definir todas las celdas de la hoja de cálculo que representan a las variables de decisión. - Al hacer clic sobre este botón, el color del texto cambiará a azul. - Por <i>default What'sBest!</i> asume dichos valores como no negativos.
		Remove Adjustable	<ul style="list-style-type: none"> - Este botón se usa en el caso de haber seleccionado erróneamente una o varias celdas que no representen a las variables de decisión, deshaciendo su selección del modelo en <i>What'sBest!</i> - Al seleccionar dicho botón, el color del texto regresará a su color original.
Definen la función objetivo 		Minimize	<ul style="list-style-type: none"> - Dicho botón se utiliza para indicar que una celda representa a la función objetivo y que se busca minimizar su valor. - El color de fondo de la celda cambiará a azul.
		Maximize	<ul style="list-style-type: none"> - Este botón se selecciona si una celda representa a la función objetivo y se busca maximizar su valor. - El color de fondo de la celda cambiará a azul.



Definen las restricciones <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>R1</td> <td>>=</td> <td>b1</td> </tr> <tr> <td>R2</td> <td>=</td> <td>b2</td> </tr> <tr> <td>R3</td> <td><=</td> <td>b3</td> </tr> </table>	R1	>=	b1	R2	=	b2	R3	<=	b3		Constraint Less Than	<ul style="list-style-type: none"> - Se utiliza para representar las celdas que contienen los signos de “menor que” en las restricciones de la hoja de cálculo. - Se ubica entre la celda que contiene la fórmula de la restricción y la celda que contiene el valor al cual está sujeta dicha restricción.
	R1	>=	b1									
	R2	=	b2									
R3	<=	b3										
	Constraint Greater Than	<ul style="list-style-type: none"> - Se utiliza para representar las celdas que contienen los signos de “mayor que” en las restricciones de la hoja de cálculo. - Se ubica entre la celda que contiene la fórmula de la restricción y la celda que contiene el valor al cual está sujeta dicha restricción. 										
	Constraint Equal To	<ul style="list-style-type: none"> - Se utiliza para representar las celdas que contienen los signos de “igual” en las restricciones de la hoja de cálculo. - Se ubica entre la celda que contiene la fórmula de la restricción y la celda que contiene el valor al cual está sujeta dicha restricción. 										
Resolver el modelo		Solve	<ul style="list-style-type: none"> - Una vez definidos todos los componentes del modelo, se da clic en este botón para obtener la solución óptima. - <i>What'sBest!</i> cambiará los valores de las celdas que representan a las variables de decisión por los valores óptimos, con ello se obtendrá automáticamente en la hoja de cálculo el valor de la función objetivo y de las restricciones. 									

Fuente: Elaboración propia.