



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Comparativa entre dos sistemas de
transporte urbano de capacidad
media: autobuses de tránsito rápido
y tren ligero. Caso de estudio: Línea
1 del Metrobús y Tren Ligero de la
Ciudad de México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Miguel Alejandro López Gutiérrez

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Francisco Javier Granados Villafuerte



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (Méjico).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Una página en este trabajo no hace justicia a lo que todas las personas han hecho por mí, mucho menos lo que significan para mí y para que haya llegado a este momento; sin embargo, haré mención de ellas en este breve espacio, esperando que la fuerza de las palabras compense la brevedad de las mismas.

Quiero agradecer primeramente a mi madre. Muchas gracias mamá por ser esa fuerza, esa inspiración, esas palabras de ánimo, por esos cuidados, por esa preocupación, por siempre darme esas ganas de seguir adelante, gracias por la confianza, gracias por ser mi ejemplo de lucha y gracias por todo el cariño. Muchas gracias por ser parte de esto.

Muchas gracias a mi padre por ser mi ejemplo, gracias por toda la ayuda, gracias por todos los consejos, gracias por llevarme por este camino, gracias por todo el esfuerzo, gracias por todas las pláticas en las mañanas, gracias por los partidos de americano y todas las experiencias juntos. Gracias por la preocupación y muchas gracias por todos esos regaños para seguir adelante, esta primera meta la completamos.

Un agradecimiento especial a mi hermana, que siempre me ha cuidado y siempre se ha preocupado por mí, muchas gracias Pau por todo ese cariño de hermano mayor. Muchas gracias por todos esos momentos juntos.

Muchas gracias a mis abuelos, tíos, tías, primos y primas, gracias por toda la confianza y el apoyo que me han dado, gracias por estar al pendiente de este objetivo y gracias por el impulso para lograrlo. Especialmente a mi madrina que ha sentido la preocupación de una madre, gracias *Chucha*.

Muchas gracias a todos mis amigos, por todos siento un enorme agradecimiento. Gracias a Ceci, porque fuiste una compañera en toda esta aventura, gracias por todos los ratos que dedicaste a escuchar como avanzaba este proyecto, gracias porque tu estuviste desde que fue una idea hasta ahora que se termina, gracias por todo el apoyo y gracias por todos los consejos, gracias por ser parte de esto. Gracias a Lalo porque a pesar de toda la diversión siempre me apoyo a que me dedicara a lo que dejaba, gracias amigos musicales (Kevin y Brian) que han sido como hermanos, gracias al *Hoover Team* (Juan, Diego, Richi y Mike) por todas las noches de pláticas que sacaban buenas ideas, gracias porque siempre impulsaban a seguir adelante.

Gracias totales a mi universidad, la UNAM, que me abrió todas las puertas, que inclusive me llevaron a Japón. Muchas gracias a todos los que han sido parte de esto, gracias por este viaje.

ÍNDICE

RESUMEN	17
1. INTRODUCCIÓN	18
2. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN.....	19
2.1 Objetivo general	19
2.2 Objetivos particulares.....	19
2.3 Justificación de la Investigación.....	20
2.4 Supuesto de la Investigación	21
2.5 Problemática actual.....	21
2.6 Pregunta de investigación general	22
2.7 Preguntas de investigación particulares	22
2.8 Diseño de la investigación	23
2.9 Sujeto y Objeto de estudio	23
3. MARCO TEÓRICO.....	24
3.1 Sistemas de Transporte Urbano Público.....	24
3.1.1 Componentes del Sistema de Transporte Urbano Público	25
3.1.2 Atributos de los Modos de Transporte del Sistema de Transporte Urbano Público	26
3.2 Clasificación del Transporte.....	31
2.3.1 Clasificación con base en el medio	31
3.2.2 Clasificación en modos de transporte	34
3.2.3 Subclasificación de los Modos de Transporte con base en la relación desempeño-capacidad....	38
4. SISTEMAS DE TRANSPORTE DE CAPACIDAD MEDIA: TRÁNSITO SEMIRÁPIDO	40
4.1 Autobuses de Tránsito Rápido.....	42
4.1.1 Antecedentes	42

4.1.2 Definición	44
4.1.3 Características tecnológicas y operativas	45
4.1.4 Sistema de transporte de autobuses de tránsito rápido en el mundo.....	56
4.1.5 Autobuses de transito rápido en México.....	59
4.1.5 Línea 1 del Metrobús.....	63
4.1.6 Antecedentes	63
4.1.7 Evolución	68
4.1.8 Situación Actual	76
4.2 Tren Ligero	81
4.2.1 Antecedentes	81
4.2.2 Definición	84
4.2.3 Características tecnológicas y operativas	86
4.2.4 El tren ligero en el mundo	96
4.2.5 Tren Ligero en México	99
4.2.6 Tren Ligero de la Ciudad de México.....	105
4.2.7 Plan Maestro del Tren Ligero. Revisión 1996.....	107
5. COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS DE AUTOBUS DE TRÁNSITO RÁPIDO Y TRENES LIGEROS	114
5.1 Características de los sistemas de transporte urbano de capacidad media	116
5.1.1 Derecho de vía.....	118
5.1.2 Capacidad de los vehículos	120
5.2 Desempeño del Sistema	123
5.2.1 Frecuencia del servicio	124
5.2.2 Velocidad de operación	126
5.2.3 Confiabilidad.....	126

5.2.4 Seguridad.....	128
5.2.5 Capacidad de la línea	130
5.2.6 Capacidad productiva	131
5.2.7 Energía.....	132
5.2.8 Densidad.....	134
5.2.9 Flexibilidad.....	136
5.2.10 Productividad	139
5.2.11 Utilización.....	142
5.3 Impactos.....	145
5.3.1 Sociales	146
5.3.2 Económicos	154
5.3.3 Emisiones.....	159
5.4 Nivel de Servicio	163
5.4.1 Calidad del Servicio.....	164
5.4.2 Precio.....	166
5.5 Costos.....	166
5.5.1 Costos de inversión	167
5.5.2 Costos de operación	170
5.5.3 Costos ambientales	171
5.5.4 Costos totales	173
5.5.4 Análisis de Sensibilidad.....	175
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA COMPARATIVA ENTRE LOS DOS SISTEMAS DE TRANSPORTE DE CAPACIDAD MEDIA.....	176
6.1 Características de los Sistemas de Transporte de Capacidad Media	176

6.2 Desempeño del Sistema	177
6.3 Impactos	179
6.4 Nivel de Servicio	180
6.5 Costos	181
6.6 Calificación general	182
7. CONCLUSIONES	183
7.1 Ventajas y desventajas del sistema de Autobuses de Tránsito Rápido	183
7.2 Ventajas y desventajas del sistema de Tren Ligero	185
8. BIBLIOGRAFIA	187

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diseño de la investigación propuesta para esta tesis. Fuente: Elaboración propia; datos obtenidos de los autores Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio. 2017.....	23
Figura 2 Diagrama de Evaluación de Costos Totales de un Sistema de Transporte Urbano Público. Fuente: Casello, McD. Lewis, Yeung, & Santiago-Rodríguez, p. 50, 2014).....	30
Figura 3 Clasificación general del Sistema de Transporte Urbano Público. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de: Vuchic, V. 2017	31
Figura 4 Configuración recomendada de vías para introducción de BRT (Fuente: Guía de Planificación de Sistemas BRT. 2007)	47
Figura 5 Sistema trinario implementado en la ciudad de Curitiba, Brasil. De color rojo los vehículos del sistema BRT, a un costado sus estaciones, a los lados de las estaciones los carriles de tránsito mixto rápido y adyacente a ellos los carriles de tránsito mixto rápido y adyacente a ellos los carriles de tránsito mixto lento (Fuente: Urbanização de Curitiba [URBS]. 2017 [en línea]).....	47
Figura 6 Configuración de vías en los costados en avenida Reforma para el proyecto de la línea siete del Metrobús de la Ciudad de México (Fuente: Metrobús de la Ciudad de México. 2017).....	48
Figura 7 Carriles múltiples a un costado del corredor que se utilizaran en calzada Misterios en la línea siete del Metrobús de la Ciudad de México (Fuente: Metrobus de la Ciudad de México. 2017).....	48
Figura 8 Corte de una estación donde se aprecian las plataformas (Fuente: Fuente: Guía de Planificación de Sistemas BRT. 2007)	50
Figura 9 Planta de una estación donde se aprecia el ensanchamiento y el área de transición (Fuente: Fuente: Guía de Planificación de Sistemas BRT. 2007)	51
Figura 10 Configuración clásica de estación al centro del corredor con medidas recomendadas (Fuente: Guía de Planificación de Sistemas BRT. 2007)	51
Figura 11 Configuración de estaciones escalonadas con medidas recomendadas (Fuente: Guía de Planificación de Sistemas BRT. 2007)	52
Figura 12 Configuración de estaciones alargadas con medidas recomendadas (Fuente: Guía de Planificación de Sistemas BRT. 2007)	52
Figura 13 Proyección de la estación terminal “Indios Verdes” en la ruta 7 del Metrobús de la Ciudad de México (Fuente: Línea 7 del Metrobús. El Universal [en línea])	53

Figura 14 Vehículos Volvo 7300 BRT (Fuente: Ficha técnica Volvo Buses México)	56
Figura 15 Incremento de ciudades con sistemas BRT.....	57
Figura 16 Pasajeros por hora por sentido en las ciudades con BRT (Datos obtenidos de: BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR. Global BRTData).....	57
Figura 17 Pasajeros por día en el mundo en líneas BRT (Datos obtenidos de: BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR. Global BRTData)	58
Figura 18 Cantidad de corredores de BRT por ciudad (Datos obtenidos de: BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR. Global BRTData)	58
Figura 19 Longitud, de sistemas BRT en el mundo, total de los corredores (en kilómetros) en las diferentes ciudades (Datos obtenidos de: BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR. Global BRTData).....	59
Figura 20 Pasajeros por día en los diferentes sistemas BRT que operan en México (Datos obtenidos de: BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR. Global BRTData)	60
Figura 21 Cantidad de kilómetros construidos para los diferentes sistemas BRT que operan en México (Datos obtenidos de: BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR. Global BRTData)	61
Figura 22 Mapa de las 29 líneas propuestas de BRT para su construcción en la Ciudad de México (Fuente: Transporte Público Masivo en la Zona del Valle Metropolitana del Valle de México. Proyecciones de demanda y soluciones al 2024. ITDP, 2014)	62
Figura 23 Distribución horaria del porcentaje de ocupación de los vehículos (barras) y distribución horaria de la carga máxima de pasajeros en los vehículos (línea continua) (Elaboración propia. Datos: Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 103, 2004).....	67
Figura 24 Balance entre la oferta y la demanda que se ofrecía en la Avenida de los Insurgentes Sur (Elaboración propia. Fuente: Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 170, 2007)	74
Figura 25 Distribución horaria de la demanda de la línea 1 del Metrobús, en términos de porcentaje (Elaboración propia. Fuente: Datos proporcionados por Metrobús)	78
Figura 26 Mapa actual de la línea 1 del Metrobús (Fuente: Metrobús, 2017)	80
Figura 27 Localización de las vías en las calles. La configuración “a” ubica a los dos carrieles en la parte media, La figura “b” muestra en corte las medidas de vías en la parte central con elevación. La configuración “c” muestra a las vías en la parte lateral de la calle, de manera simétrica. La configuración “d” también las muestra en la parte lateral, pero de manera asimétrica. Las medidas están en metros y son medidas mínimas propuestas por el autor (Fuente: Vuchic, V. 2007, p. 370).....	92

Figura 28 Nuevos sistemas de tren ligero en operación de 1985 a 2015. La gráfica muestra solo algunos ejemplos del total construido entre esos años (Fuente: Laurent & Mircea, 2015)	96
Figura 29 Las diez ciudades con la mayor cantidad de pasajeros al año, en millones (Fuente: Laurent & Mircea, 2015)	97
Figura 30 Gráfica que representa: en barras la distancia promedio entre las estaciones (en metros) y con puntos, la longitud promedio de los corredores (en kilómetros) MENA contiene a la región del Medio Oriente y África (Fuente: Laurent & Mircea, 2015)	98
Figura 31 Gráfica en la que se encuentran las redes más largas de LRT por ciudad, en kilómetros (Fuente: Laurent & Mircea, 2015)	98
Figura 32 Gráfica con las redes más concurridas de LRT, miles de pasajeros por cada kilómetro (Fuente: Laurent & Mircea, 2015)	99
Figura 33 Evolución de la demanda de los últimos veinte años, en miles de pasajeros al año (1997-2016) La línea punteada representa sus respectivas tendencias con un ajuste lineal (Fuentes: Gobierno de la Ciudad de México. Servicio de Transportes Eléctricos. Sistema de Transporte Colectivo de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Dirección General del Sistema del Tren Eléctrico Urbano, a través de INEGI. Fecha de consulta: 05 de octubre del 2017. Elaboración propia)	102
Figura 34 Características generales de los servicios de tren ligero en México (Fuentes: Gobierno de la Ciudad de México. Servicio de Transportes Eléctricos. Sistema de Transporte Colectivo de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Dirección General del Sistema del Tren Eléctrico Urbano, a través de INEGI. Fecha de consulta: 05 de octubre del 2017. Elaboración propia)	103
Figura 35 Cantidad de kilómetros recorridos en el último mes, el último año y el acumulado del 2017 (al mes de Julio), en miles de kilómetros (Fuentes: Gobierno de la Ciudad de México. Servicio de Transportes Eléctricos. Sistema de Transporte Colectivo de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Dirección General del Sistema del Tren Eléctrico Urbano, a través de INEGI. Fecha de consulta: 05 de octubre del 2017. Elaboración propia)	104
Figura 36 Ingresos de los sistemas de tren ligero, en el último mes, año y el acumulado del 2017 (a Julio), en miles de pesos (Fuentes: Gobierno de la Ciudad de México. Servicio de Transportes Eléctricos. Sistema de Transporte Colectivo de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Dirección General del Sistema del Tren Eléctrico Urbano, a través de INEGI. Fecha de consulta: 05 de octubre del 2017. Elaboración propia)	104
Figura 37 Red actual del Tren Ligero de la Ciudad de México (Fuente: Sistemas de Transportes Eléctricos)	105
Figura 38 Velocidad de operación de los diferentes modos de transporte urbano en la Ciudad de México, en 1994 (Fuente: Plan Maestro del Metro y Tren Ligero. Revisión 1996, p. 20).....	108

Figura 39 Intervalo de paso de los diferentes modos de transporte urbano en la Ciudad de México, en 1994 (Fuente: Plan Maestro del Metro y Tren Ligero. Revisión 1996, p. 20)	108
Figura 40 Esquema de las líneas proyectadas en el Plan Maestro de Metro y Trenes Ligeros. Revisión 1996. Las líneas de metro están representadas por líneas de color y de mayor grosor, las líneas de tren ligero están representadas por líneas más delgadas y de color gris (Fuente: https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=17hL1gZuxdWTJtkKxS4Tb9iy3_lQ&hl=en_US&ll=19.546995179265814%2C-99.01564097314451&z=12 Consultado: 16/10/2017)	111
Figura 41 Mapa de la línea 10 del Metro y las diez líneas del tren ligero, del Plan Maestro del Metro y Trenes Ligeros. Revisión 1996 (Elaboración propia)	113
Figura 42 Separación de vía tipo B en el Metrobús de la Ciudad de México (Fuente: Notimex. 29 de julio del 2016. Elaboración propia)	119
Figura 43 Vehículo privado invadiendo el carril del Metrobús en la Ciudad de México (Fuente: https://www.youtube.com/watch?v=L49hdmVtOls)	119
Figura 44 Separación de vías del resto del tránsito en el Tren Ligero de la Ciudad de México (Fuente: El Universal. Foto por Ramón Romero)	120
Figura 45 Pantallas en las estaciones de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	127
Figura 46 Calificación en el rubro de seguridad en la Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte 2015. Fuente: Elaboración propia; datos obtenidos de Suárez & Delgado (2017)	128
Figura 47 Diseño modular del Citadis Spirit de Alstom, el cual muestra la adición de módulos para incrementar la demanda (Fuente: ALSTOM, 2013)	137
Figura 48 Estación "Estadio Azteca" del Tren Ligero de la Ciudad de México, señalada en amarillo. Fuente: Google Earth. 2017	139
Figura 49 Esquema operativo institucional de la Línea 1 del Metrobús (Fuente: Lámbarry Vilchis, Rivas Tovar & Peña Cruz, 2011)	147
Figura 50 Microbuses que ofrecen servicio de transporte en la Ciudad de México (Fuente: Ascensión, A. 2016)	148
Figura 51 Configuración de maniobras para realizar los giros a la izquierda (Fuente: Guía de Planificación de Sistemas BRT. 2007)	150
Figura 52 Monumento "Indios Verdes" en el parque El Mestizaje (Fuente: Espinosa, V. 2011)	151
Figura 53 Impactos Sociales de la Línea 1 del Metrobús (Fuente: Elaboración propia. 2017)	152

Figura 54 Comparativa de British Thermal Units por cada pasajero por milla de los autores Shapiro, Hassett & Arnold para los diferentes modos de transporte (Fuente: Arndt, et. al. 2009)	157
Figura 55 Representación gráfica de la región en la que se basa el Modelo de Puchalsky (Fuente: Puchalsky, 2009).....	160
Figura 56 Comparativa de Emisiones de Dióxido de Carbono, en toneladas, anuales entre la Línea 1 del Metrobús y el Tren Ligero de la Ciudad de México	162
Figura 57 Comparativa de Óxidos de Nitrógeno, en toneladas, anuales entre la Línea 1 del Metrobús y el Tren Ligero de la Ciudad de México	162
Figura 58 Pregunta 16 y 17 de la Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte (Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones Jurídicas).....	164
Figura 59 Gráfica de costos totales de la Línea 1 del Metrobús y del Tren Ligero de la Ciudad de México a treinta y cinco años	174

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen de los diferentes atributos del transporte urbano	26
Tabla 2 Clasificación del IMT de los impactos del transporte urbano	29
Tabla 3 Parámetros de clasificación de los modos de transporte urbano.....	35
Tabla 4 Medidas Geométricas recomendadas en vías en los sistemas BRT	46
Tabla 5 Características físicas de dos vehículos BRT	55
Tabla 6 Características de los BRT en el Mundo.....	56
Tabla 7 Sistemas BRT en México	59
Tabla 8 Cantidad financiada para el proyecto introducción de medidas ambientales amigables	65
Tabla 9 Valores característicos de la operación conjunta RTP-RUTA 2	67
Tabla 10 Comparativa De Costos De Inversión Entre Las Diferentes Alternativas De Transporte De Pasajeros De La Avenida De Los Insurgentes.....	69
Tabla 11 Ficha técnica del segundo corredor de transporte de pasajeros “Insurgentes Sur” (2007).....	75
Tabla 12 Emisiones estimadas para 2017 de la Línea 1 Del Metrobús	78
Tabla 13 Flujo de dinero en la Línea 1 del Metrobús de enero a marzo del 2017	79
Tabla 14 Flota de trenes en la línea de tren ligero de la Ciudad de México	105
Tabla 15 Consumo de energía en los trenes, en el último mes y por corrida	106
Tabla 16 Facturación eléctrica en pesos	107
Tabla 17 Costos del último mes y año del Tren Ligero de la Ciudad de México	107
Tabla 18 Red de Metro y Tren Ligero del Plan Maestro Revisión 1996	109
Tabla 19 Línea 10 del Metro y las diez líneas del tren ligero, características proyectadas	112
Tabla 20 Línea 10 del Metro y las diez líneas del tren ligero, características operativas	114
Tabla 21 Características y componentes de la comparativa	115
Tabla 22 Componentes e indicadores de las características de los sistemas de transporte de capacidad media	117

Tabla 23 Valores del indicador derecho de vía.....	118
Tabla 24 Valores de Derecho de Vía para BRT y Tren Ligero	120
Tabla 25 Flota vehicular de la línea 1 del Metrobús.....	121
Tabla 26 Valores de capacidad de los vehículos para BRT y LRT	122
Tabla 27 Componentes e indicadores del desempeño de los sistemas de transporte de capacidad media	123
Tabla 28 Frecuencia e intervalo de paso de los vehículos de la Línea 1 del Metrobús y del Tren Ligero de la Ciudad de México.....	125
Tabla 29 Valores de frecuencia para los vehículos de BRT y LRT.....	126
Tabla 30 Valores de velocidad de operación de vehículos de BRT y LRT	126
Tabla 31 Valores de confiabilidad para los sistemas BRT y LRT	127
Tabla 32 Valores de Seguridad para sistemas BRT y LRT	130
Tabla 33 Capacidad de la línea de BRT y LRT.....	131
Tabla 34 Valores de Capacidad de la Línea para BRT y LRT	131
Tabla 35 Valores de Capacidad Productiva para BRT y LRT	132
Tabla 36 Consumo eléctrico del Tren Ligero de la Ciudad de México en el 2016.....	133
Tabla 37 Precio del Diésel por litro, en 2016.....	133
Tabla 38 Gasto de combustible de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México, en 2016	133
Tabla 39 Valores de Energía para BRT y LRT.....	134
Tabla 40 Vehículos en la línea en hora pico de la línea 1 del Metrobús y el Tren Ligero de la Ciudad de México.....	135
Tabla 41 Valores de Densidad para BRT y LRT.....	136
Tabla 42 Rutas de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	138
Tabla 43 Valores obtenidos de Flexibilidad para BRT y LRT	139
Tabla 44 Empresas Operadoras de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	141

Tabla 45 Productividad de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	141
Tabla 46 Productividad del Tren Ligero de la Ciudad de México	142
Tabla 47 Valores de Productividad para BRT y LRT	142
Tabla 48 Kilómetros recorridos por la Línea 1 del Metrobús por hora por sentido	144
Tabla 49 Kilómetros recorridos por hora por sentido para el Tren Ligero de la Ciudad de México	144
Tabla 50 Valores de Utilización para BRT y LRT.....	145
Tabla 51 Componentes e indicadores de los Impactos de los Sistemas de Transporte de Capacidad Media BRT y LRT.....	146
Tabla 52 Valores de impactos sociales para BRT y LRT.....	154
Tabla 53 Resultados del Estudio de Emisiones antes y después la implementación del Metrobús en la Avenida de los Insurgentes	155
Tabla 54 Actividades de mitigación y costos de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	156
Tabla 55 Valores de impactos económicos para BRT y LRT	159
Tabla 56 Emisiones estimadas para 2017 de la Línea 1 Del Metrobús	160
Tabla 57 Emisiones calculadas para el Tren Ligero, debido a la generación de energía eléctrica	161
Tabla 58 Valores de Emisiones para BRT y LRT	163
Tabla 59 Ponderación del Nivel de Servicio para la comparativa	163
Tabla 60 Calificaciones a modos de transporte por rango	165
Tabla 61 Calificación de Calidad del Servicio para BRT y LRT	165
Tabla 62 Valores de Precio para BRT y LRT	166
Tabla 63 Costo de Inversión por concepto de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México.....	169
Tabla 64 Costos de Inversión por concepto del Tren Ligero de la Ciudad de México.....	170
Tabla 65 Costos operativos de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México, por concepto, en el año 2016	171
Tabla 66 Costos operativos por concepto para el Tren Ligero de la Ciudad de México, en el 2016	171

Tabla 67 Valores en dólares para los costos sociales asociados a las emisiones de los Sistemas de Transporte.....	172
Tabla 68 Costos sociales por emisiones de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	172
Tabla 69 Costos sociales por emisiones del Tren Ligero de la Ciudad de México.....	173
Tabla 70 Calificación para Costos Totales de BRT y LRT	175
Tabla 71 Escenarios de los costos para los diferentes tipos de demanda	175
Tabla 72 Variación en los costos operativos de BRT y LRT	176
Tabla 73 Valores de Sensibilidad para BRT y LRT	176
Tabla 74 Valores obtenidos por atributo de las características de los sistemas de transporte de capacidad media de BRT y LRT	177
Tabla 75 Valores obtenidos por componente para los sistemas BRT y LRT.....	177
Tabla 76 Valores obtenidos por cada componente para el desempeño del sistema para BRT y LRT.....	178
Tabla 77 Valores obtenidos para la característica de desempeño de sistema para BRT y LRT.....	179
Tabla 78 Valores obtenidos por cada atributo de los impactos para los sistemas BRT y LRT	179
Tabla 79 Valores obtenidos en la característica de Impactos para BRT y LRT	180
Tabla 80 Valores obtenidos por componente de Nivel de Servicio para BRT y LRT.....	180
Tabla 81 Valores obtenidos para las características del Nivel de Servicio para BRT y LRT	181
Tabla 82 Valores obtenidos por componente de costos para BRT y LRT.....	181
Tabla 83 Valores obtenidos en la característica de Costos para BRT y LRT	182
Tabla 84 Calificación global de la comparativa entre BRT y LRT.....	182

RESUMEN

Este trabajo de investigación tiene como finalidad comparar dos sistemas de transporte urbano de capacidad media, los autobuses de tránsito rápido y los trenes ligeros, a través de dos casos de estudio actuales en la Ciudad de México, de manera que sirva como una herramienta adicional en la toma de decisiones para la implementación de un sistema de transporte en las ciudades.

La primera parte de este trabajo consiste en identificar los sistemas de transporte urbano, la clasificación de ellos de acuerdo a la relación capacidad-desempeño, conocer sus atributos y sus características principales, para así poder adentrarnos en los sistemas de transporte de capacidad media. La segunda parte de este trabajo consiste en identificar a los sistemas de transporte de capacidad media, las familias de sistemas de transporte que existen y hacer una descripción mas detallada de los dos sujetos de estudio: los autobuses de transito rápido y los trenes ligeros. Se conocerán las características tecnológicas y operativas de estos sistemas, se adentrará en su historia y se determinara como fue su evolución; finalmente, se conocerá cual es su presencia en el mundo y cual es su presencia en México, como han ido evolucionando a lo largo del tiempo y como es que se encuentran posicionados actualmente en la Ciudad de México. La tercera parte de la investigación consiste en realizar una comparativa cuantitativa de ambos modos de transporte, a través de analizar cinco grandes características: características como sistemas de transporte de capacidad media, desempeño del sistema, impactos, nivel del servicio y costos; en los cuales se determinará una calificación de acuerdo al sistema de transporte que ofrezca un mayor beneficio. En las características de los sistemas como sistemas de transporte de capacidad media se analizará las propiedades que comparten como sistemas de transporte de capacidad media, en el desempeño del sistema se analizará las características operativas de los sistemas, los impactos se comparará los diferentes impactos, tanto positivos como negativos que presenta la implementación de ambos modos de transporte, el nivel de servicio estudiará la experiencia del usuario con el sistema; finalmente, se estudiaran los costos de ambos modos de transporte, lo cual incluye la inversión operación y mantenimiento, para poder hacer un estudio económico a lo largo de los años y poder hacer un análisis de sensibilidad, la finalidad de esto es poder obtener un análisis completo de ambos modos de transporte, no necesariamente enfocarse en una sola característica. Finalmente se hará un análisis final de los resultados obtenidos, de manera que se pueda obtener una calificación final de ambos modos de transporte, la cual nos pueda indicar que sistema de transporte ha presentando un mejor desempeño en la Ciudad de México.

Con esta investigación se busca que se presente una nueva alternativa en la forma de analizar y poder determinar la aplicabilidad de un nuevo sistema de transporte en las ciudades.

1. INTRODUCCIÓN

La población en zonas urbanas está creciendo día con día, y este incremento demanda una mayor cantidad de transporte, para movilizar a todas las personas en sus actividades diarias. A su vez, la mejor forma de hacer frente a este problema es la planeación, la cual nos permitirá elegir el mejor modo de transporte, el que se adecue de mejor manera a nuestra demanda; es decir, no existe un modo de transporte único que solucione cualquier tipo de demanda.

Los sistemas de transporte en zonas urbanas se deben de pensar como soluciones integrales al problema de movilidad, (los cuales combaten un enemigo en común, que es el uso del vehículo particular), en las cuales interactúen entre sí varios tipos de modos; ya que hay diferentes tipos de demanda que satisfacer, a diferentes costos cada una.

Para elegir un modo de transporte se deben de tener en cuenta varios aspectos, pero al final siempre se elegirá el que cumpla con los siguientes objetivos: cumplir con la demanda, generar la mayor atracción de viajes y representar el menor costo posible. Es importante resaltar que el costo siempre se debe de considerar a largo plazo, ya que a corto plazo no se logra vislumbrar los verdaderos impactos, económicos y sociales.

Esta tesis tiene como alcance comparar dos sistemas de transporte urbano de capacidad media: los autobuses de transito rápido y los trenes ligeros, los cuales se han enfrentado en los últimos años. De una manera equivoca se ha decidido contraponer el uno contra el otro, lo que representa un error, cada uno tiene características particulares y responde a situaciones diferentes, a pesar de compartir características. En este trabajo se estudiará a fondo estos dos modos de transporte, ver su evolución, conocer sus características, encontrar sus debilidades y poder determinar sus costos (en el corto y largo plazo) para poder generar un estudio técnico que respalde los casos en que es conveniente usar cada uno de ellos. Al final de este trabajo se pretende tener una serie de elementos que permitan facilitar a los planeadores de transporte decidir cuándo utilizar cada uno de estos modos.

El enfoque será países en vías de desarrollo, los cuales se han centrado en tomar decisiones que solucionan problemas inmediatos, sin tener una gran planeación y que repercute en gastos grandes al largo plazo.

En este trabajo también se estudiará la línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México, un sistema de autobús de tránsito rápido, para poder determinar cuáles han sido, en la práctica, las ventajas y errores que se han cometido en la concepción de este sistema de transporte y poder proponer una alternativa con un sistema de tren ligero, para poder comparar los efectos de ambos modos. A pesar de que el caso de estudio estará acotado a la línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México, el trabajo permitirá conocer los alcances de un proyecto real con ambos modos de transporte, debido a la gran cantidad de demanda que se presenta en el corredor.

La mayor desventaja que se presentaría al no realizarse este estudio sería el seguir con la creencia de que un modo de transporte puede ser la solución a todos los problemas de movilidad. Durante esta investigación se detallará, como cada modo de transporte tiene sus propias limitaciones, y funciona de mejor manera a diferentes características.

La razón principal de realizar esta comparativa es que sirva como un instrumento que permita tener una imagen completa de dos sistemas de transporte de capacidad media, y que ayude a tomar decisiones más acertadas en cuanto a los alcances de implementar cada uno de ellos. Esto se traducirá en inversiones acertadas en transporte, ahorros del gasto público y mejorar en la calidad de vida de las personas al tener sistemas de transporte que respondan a sus necesidades.

2. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

2.1 Objetivo general

Comparar dos sistemas de transporte de capacidad media: el autobús de transito rápido y el tren ligero (BRT y LRT por sus siglas en inglés, respectivamente) A través de: sus características modales, costos, impactos, desempeño del sistema y nivel de servicio; la comparativa se complementará con un caso de estudio: la línea 1 del Metrobús, que cuenta con un sistema de BRT. Identificando su situación actual y la factibilidad de un sistema de tren ligero.

2.2 Objetivos particulares

1. Definir a los sistemas de transporte urbano público, sus componentes y sus atributos. Conocer su clasificación en modos de transporte y la subclasificación con base relación desempeño-capacidad; la clasificación puntualizará en los sistemas de transporte de capacidad media.
2. Identificar a los autobuses de tránsito rápido dentro del modo carretero y su lugar en la clasificación; definirlo, conocer sus antecedentes, sus características tecnológicas y operativas, su presencia en el mundo y en México, enfatizando en la línea 1 del Metrobús, conociendo sus antecedentes, evolución y situación actual.
3. Reconocer al sistema de transporte tren ligero, definirlo, conocer sus antecedentes, sus características tecnológicas y operativas, su presencia en el mundo y en México; estudiando la línea de tren ligero de la Ciudad de México, en su situación actual; conocer el Plan Maestro del Metro y Trenes Ligero. Revisión 1996 con los proyectos planeados de tren ligero y la línea 10 del metro.
4. Realizar una comparativa entre dos sistemas de transporte de capacidad media: los autobuses de tránsito rápido y los trenes ligeros; se compararán las características modales, costos, impactos, desempeño del sistema y nivel de servicio de manera general;

- se utilizarán datos e indicadores de varios sistemas en operación; la línea 1 del Metrobús servirá como caso de estudio de la comparativa, en la cual se estudiará su problemática actual, las ventajas del sistema, costos y la aplicabilidad de un sistema de tren ligero en el mismo corredor.
5. Realizar las conclusiones del trabajo, identificando las características de ambos modos de transporte, ventajas y desventajas de cada uno de los modos incluyendo un diagnóstico de la línea 1 del Metrobús, con base en la situación actual y, en los beneficios y desventajas de implementar un sistema de tren ligero.

2.3 Justificación de la Investigación

La Ciudad de México cuenta con 12 líneas de Metro, 6 líneas en operación y una en construcción de BRT, una línea de Tren Ligero, una línea de tren suburbano, un sistema de trolebuses y un sistema de transporte concesionado (combis, microbuses y camiones) A pesar de contar con una extensa red de transporte público, la Ciudad de México tiene un sistema de transporte que ha sido sobrepasado por la demanda, se estima que el tiempo promedio de viaje al día es 88 minutos. Se necesita invertir en infraestructura de transporte, ampliar la red y elaborar programas de movilidad que piensen en los horizontes del corto y largo plazo, la población sigue en aumento y el transporte se está rezagando.

Para el desarrollo de la línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México, los estudios se basaron en la situación de demanda con la que operaba con el antiguo servicio sobre el corredor Insurgentes, no se realizó un pronóstico de demanda con el nuevo sistema implementado y tampoco se hizo un estudio de la demanda a futuro, situación que llevo al límite de la capacidad del sistema en diez años; la comparativa con otros modos de transporte, para ese proyecto, se limitó al costo de construcción, sin tomar en cuenta el manejo de la demanda y los costos operativos. Sin herramientas de planeación las decisiones de transporte se seguirían tomando en cuenta sin comparar distintas opciones de manera completa; es decir, las decisiones se seguirían tomando basándose solo en los costos y en la situación actual de la demanda, se dejaría a un lado el espectro de opciones y repercusiones que tendrían otros modos de transporte.

Actualmente, en la Ciudad de México, el costo de transporte público representa el 12% del salario mínimo; además, se estima que en promedio se dedican 5.7 horas a la semana al traslado entre el hogar y el trabajo, mucho más de lo que se les dedica a actividades de esparcimiento. Este trabajo plantea una propuesta de solución para esta situación a través beneficios sociales indirectos, ya que, al tomar una mejor decisión de transporte, las personas podrán elevar su calidad de vida; además, los recursos se utilizarán de una manera más productiva.

El sistema de Tren Ligero opera con una demanda que está por encima de su capacidad, es un modo de transporte que tiene 20 años de operación (aunque su antecedente se remonta a las operaciones de tranvías) que no ha presentado una expansión de su línea desde hace más de

diez años; a pesar de estar limitado por su capacidad, la demanda del transporte sigue creciendo, al ser la única forma de conectar el sur de la Ciudad de México.

El nivel de servicio en el Tren Ligero es muy bajo, por la sobredemanda con que opera; se necesitan ampliar las opciones del transporte para la zona de Xochimilco, una red de tren ligero, como sistema de transporte de capacidad media, podría ser una pieza fundamental en una solución integral de movilidad, mejorando las conexiones en la ciudad.

En años recientes, múltiples compañías fabricadoras de vehículos BRT o LRT han desarrollado estudios en los cuales resaltan las características de estos modos de transporte; sin embargo, muchas veces la información esta sesgada, favorecido el modo de transporte del cual fabrican su vehículo. Se necesitan estudios que comparen ambos modos de transporte en cuestiones técnicas, reduciendo el sesgo, para permitir a los tomadores de decisiones implementar el mejor sistema, y que la población pueda tener un sistema más funcional.

La Ciudad de México ha invertido en proyectos que, por falta de planeación, han presentado problemas operativos, sociales y económicos apenas han sido implementados, como ha sido el caso de la línea 12 del Metro y la línea 7 del Metrobús. La Ciudad de México, con las limitaciones económicas que presenta, no se puede permitir el lujo de cometer errores de planeación; por lo tanto, mientras mayor sea la cantidad de opciones que cuente para los diferentes proyectos, y mayor sea la cantidad de estudios que comparen las diferentes características, mejor podrá ser la toma de decisiones en cada proyecto.

2.4 Supuesto de la Investigación

Los sistemas de transporte urbano LRT (tren ligero) representan una solución más integral de movilidad. Sus atributos y características tecnológicas representan una mejor solución en las ciudades a largo plazo, por lo tanto, la decisión de implementar un sistema de transporte urbano de capacidad media BRT en el corredor Av. de los Insurgentes fue equivocada, ya que representó una solución inmediata, que en el futuro presentaría problemas de demanda; situación que se hubiera evitado con un sistema de tren ligero.

2.5 Problemática actual

La Ciudad de México cuenta con 8'918,653 de habitantes, y en la Zona Metropolitana del Valle de México se superan los 20 millones de habitantes, esto se traduce en más de 22 millones de viajes diarios para poder realizar las actividades del día a día. El sistema de transporte con el que cuenta actualmente la Ciudad de México es insuficiente (por ejemplo, el Sistema de Transporte Colectivo Metro tiene una capacidad de 2.5 millones de viajeros al día y recibe 5.5 millones de usuarios, rebasado en un 220%) ya que no existe una infraestructura que pueda soportar los 1.7 millones de viajes que se realizan al día en transporte público masivo (Metro, Metrobús, Tren Ligero y Trolebús); lo que se traduce en un mal servicio, retrasos en las operaciones y sistemas

que trabajan al máximo de su capacidad, esta problemática ha llevado a la Ciudad de México a tener una velocidad promedio entre los 8 y 11 km/h.

Los problemas de transporte público han llevado a un uso excesivo del automóvil privado, en la Ciudad de México existían más de 4.7 millones de automóviles en el 2015; es decir, un automóvil por cada dos habitantes, los cuales realizan al día 6.3 millones de viajes, generando problemas ambientales y de congestionamiento.

México es un país en vías de desarrollo, por lo que los recursos económicos son muy limitados. La planeación debe de jugar un papel fundamental en la toma de decisiones de proyectos de transporte; ya que una decisión que haya sido poco reflexionada, se traduce en un desperdicio de recursos. En los últimos años la planeación se ha dejado de lado, y se ha optado por proyectos que se convierten en soluciones inmediatas, sin pensar en las problemáticas que se tendrán que enfrentar a futuro.

El sistema de transporte urbano público concesionado (microbuses, camiones, combis y taxi) es un gran problema, ya que es el modo de transporte que mueven la mayor cantidad de pasajeros en la Zona Metropolitana del Valle de México, con el 60.6% de los viajes diarios (alrededor de 13.15 millones de viajes al día) Este modo de transporte es el menos eficiente y el que tiene el nivel de servicio más bajo.

La línea 1 del Metrobús presenta problemas de demanda (en 2015 registró más de 133 millones de usuarios), operando en las horas pico al límite de sus capacidades. Aunque se afirme que el sistema “ha sido víctima de su propio éxito”, es inevitable pensar en una reestructuración del corredor, ya que es uno de las vialidades más importantes de la ciudad, recorriéndola de norte a sur.

En los años recientes, múltiples instituciones y empresas operadoras han enfrentado a los sistemas BRT y LRT. Esto se ha traducido en una guerra de intereses, en la cual se ha distorsionado las características de los sistemas para enaltecer su servicio, llevando a pensar que son las respuestas a todos los problemas de movilidad, y no como parte de un sistema integral.

2.6 Pregunta de investigación general

¿Cómo identificar la aplicabilidad de los sistemas de transporte urbano de capacidad media BRT y LRT, por medio del caso de la línea 1 del Metrobús en la Ciudad de México?

2.7 Preguntas de investigación particulares

1. ¿Qué son los sistemas de transporte urbano, cuál es su clasificación y cuáles son sus características tecnológicas y atributos?
2. ¿Cómo definir los autobuses de tránsito rápido, a través de sus antecedentes y cuál ha sido su evolución en México y el mundo?
3. ¿Qué son los trenes ligeros y cuál ha sido su evolución en México y el mundo?

4. ¿Cómo identificar las características de los sistemas de capacidad media BRT y LRT? De manera general y aplicada a casos reales
5. ¿Cómo decidir cuáles son las ventajas y desventajas de los sistemas de transporte de capacidad media BRT y LRT?

2.8 Diseño de la investigación

Este diseño se basó en lo expuesto por los autores Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio (2006) Con lo cual se identifico que la investigación sería no experimental, transeccional, correlacional-causal y prospectiva. La explicación del diseño se presenta en el siguiente diagrama:

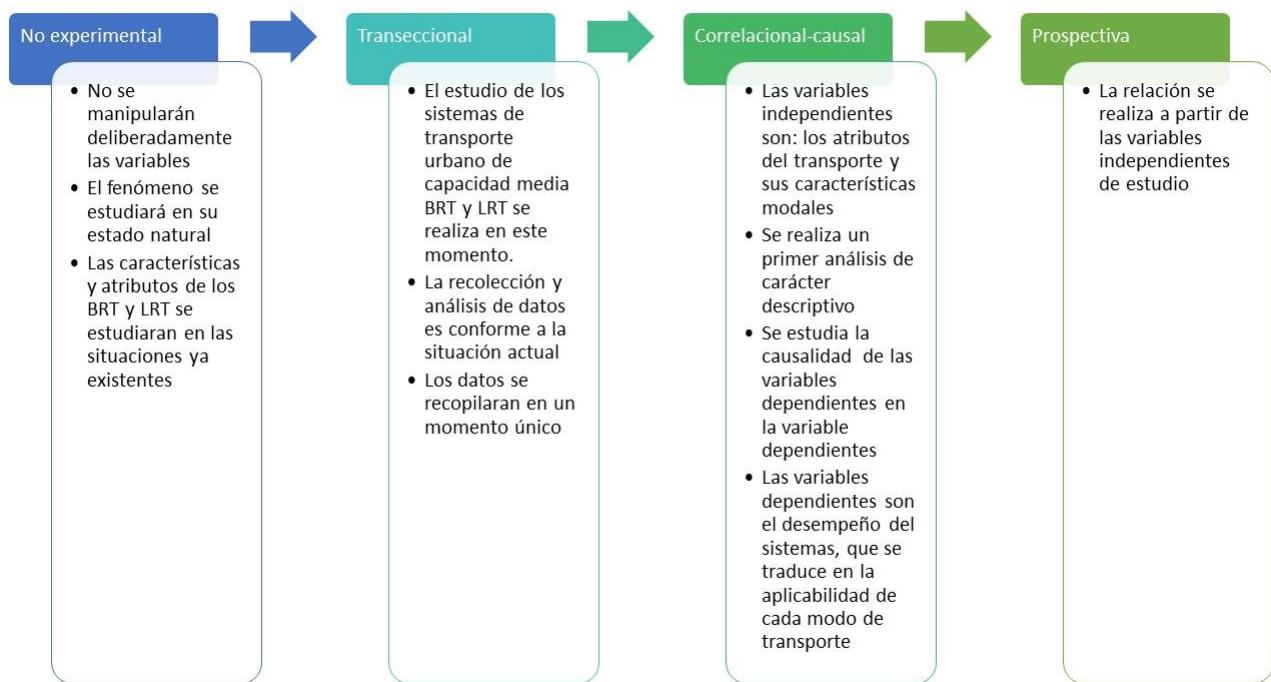


Figura 1 Diseño de la investigación propuesta para esta tesis. Fuente: Elaboración propia; datos obtenidos de los autores Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio. 2017

2.9 Sujeto y Objeto de estudio

Esta investigación tiene dos sujetos de estudio: los autobuses de tránsito rápido (BRT) y los trenes ligeros (LRT) Dos sistemas de transporte urbano de capacidad media. El objeto de estudio es la comparativa de sus características modales y atributos, a través del caso de estudio de la línea 1 del Metrobús, para poder determinar la aplicabilidad de cada modo de transporte.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Sistemas de Transporte Urbano Público

Para poder definir un sistema de transporte se tiene que entender, primeramente, el concepto de transporte, se entenderá como transporte a la actividad que consiste en trasladar de un lugar a otro cualquier persona o bien; para satisfacer una necesidad, esta puede ser económica o social.

El transporte requiere de algún instrumento que pueda llevar a los transportados de su origen a su destino, este instrumento se le conoce como *vehículo*.

El transporte requiere de una serie de factores, en los cuales desarrollarse, de ahí surge la necesidad de introducir tres nuevos conceptos, propuestos por el Instituto Mexicano del Transporte [IMT] para poder clasificar el transporte (Islas & Lelis, 2007), los cuales son:

- Ámbito: Es el espacio geográfico en el cual se desarrolla el transporte; es decir, el espacio geográfico que contiene al origen y destino de lo transportado, puede ser dentro de una ciudad, entre ciudad y zonas urbanas, entre zonas no urbanas, entre ciudades y entre países.
- Medio: Se refiere al espacio físico en el cual se realizará el transporte, dentro del cual se moverán los bienes o personas; los medios son: aéreo, marítimo, ferroviario, carretero y ductos.
- Modo: Son todos los vehículos que comparten las mismas características para realizar el movimiento de personas o bienes, resultando en una forma similar de transportar personas y mercancías.

Todos estos conceptos generan subdivisiones del transporte, con lo cual podemos ver que es una actividad compleja.

Por último, un sistema es el conjunto de elementos, relacionados entre sí, con características similares y que realizan una actividad en común.

Entonces, un sistema de transporte es: todos los elementos, interconectados, que tiene como fin trasladar bienes o personas, en un ámbito, a través de un medio y por medio de diferentes modos.

Todos los conceptos que definen al transporte generan a su vez divisiones de él; a continuación, se definirá el ámbito urbano y el transporte público, subdivisiones del transporte, que nos permitirán entender lo que es el sistema de transporte urbano público.

- Ámbito urbano: Es el transporte que se realiza dentro de una ciudad.
- Transporte público: Es el transporte que cuenta con rutas establecidas, muchas veces con horarios fijos y con una cuota establecida, puede ser utilizado por cualquier persona que cubra la cuota.

Habiendo definido estos conceptos podemos armar el concepto de sistema de transporte urbano público como: Todos los modos de transporte que interactúan dentro de una ciudad, los cuales cuentan con rutas establecidas y tienen precios fijos, su fin es el trasladar principalmente personas, las cuales pueden acceder a ellos siempre y cuando paguen la cuota establecida para cada modo de transporte.

También se conoce como sistema de transporte urbano masivo, debido a que cualquier persona puede acceder a él (pagando un precio fijo) y generalmente suelen viajar masas de personas; a diferencia del transporte privado, en el cual una persona es dueña del modo de transporte, decide la ruta, horario, el destino del transporte y las personas o bienes que viajan en él, usualmente suelen ser muy pocas. La principal ventaja del sistema de transporte urbano público respecto al transporte privado es que puede transportar más gente en menos espacio de vía.

El sistema de transporte urbano es esencial en cualquier ciudad, ya que será lo que conectará económicamente.

3.1.1 Componentes del Sistema de Transporte Urbano Público

Los principales elementos físicos que integran el sistema de transporte urbano público se pueden clasificar de la siguiente manera (Vuchic V, 2007):

- **Vehículo:** Es la unidad tecnológica mediante la cual se transportarán a las personas y sus mercancías dentro de una ciudad. También se les conoce como carros, o vagones para transporte ferroviario.
- **Unidad de Transito:** Son los conjuntos de vehículos, la agrupación de varios vehículos. Puede ser unidad de transito simple (un solo vehículo) o trenes (varios vehículos agrupados).
- **Vía:** Se refiere al espacio físico en donde se moverá el vehículo. En el transporte urbano son las calles, caminos y vías reservadas.
- **Paradas:** Son lugares a lo largo de las calles, con letreros o algunos señalamientos, muy básicos, en donde se realiza un intercambio de pasajeros, en donde se aborda y desciende al vehículo.
- **Estaciones:** Son instalaciones bien determinadas para el ascenso y descenso de pasajeros, ya cuenta con tecnología más avanzada, como edificios propios, para identificarla y para esperar a las unidades.
- **Terminales:** Son las estaciones finales de una ruta de transporte.
- **Estaciones de transferencias:** Son las estaciones en donde convergen dos o más rutas de transporte, y en donde los pasajeros pueden cambiarse de una línea a otra.
- **Estaciones de transferencia multimodal:** Es una estación donde se conectan varios modos de transporte, también puede haber varias rutas de un modo de transporte. Sirve como intercambio de pasajeros y mercancías entre modos, en México se les conoce como Centros de Transferencia Modal [CETRAM].

- Patios: Son los espacios en donde se guardan los vehículos de los diferentes modos de transporte, también pueden servir para realizar reparaciones y mantenimiento a los vehículos.
- Sistemas de Control: Son todos los instrumentos tecnológicos que sirven para detectar, ubicar y controlar los vehículos, se localizan en edificios que sirven como centrales de control.
- Sistemas de Transporte Inteligente [ITS, por sus siglas en inglés]: Son los dispositivos, tecnologías, instalaciones o procesos que utilicen de sistemas computacionales que controlen y mejoren el sistema de transporte.
- Sistemas de abastecimiento eléctrico: Consiste en todos los dispositivos, cables, estaciones eléctricas, distribuidores o diferentes tecnologías que proporcionen energía eléctrica a los vehículos.
- Rutas o líneas: Una ruta, o línea, es el conjunto de vías por las cuales se mueve un vehículo entre dos estaciones terminales, cuenta en su trayecto con paradas y/o diferentes tipos de estaciones; se suele usar el término de ruta para los sistemas de autobuses y el término línea para los sistemas de trenes.

3.1.2 Atributos de los Modos de Transporte del Sistema de Transporte Urbano Público

La subclasificación del Sistema de Transporte Urbano Público tiene como fin el poder estudiar este sistema tan complejo en grupos más reducidos, agrupando varios modos de transporte con características similares, las características que permiten generar esta subclasificación se presentan a continuación, divididas en cuatro categorías, también conocidas como atributos del transporte (Vuchic, 2007) La siguiente tabla resume los diferentes atributos, que en los siguientes subcapítulos se desarrollaran con más detalle.

Tabla 1 Resumen de los diferentes atributos del transporte urbano

Categoría	Atributos
	Frecuencia
	Intervalo de paso
	Velocidad de operación
	Confiabilidad
	Seguridad
Desempeño del sistema	Capacidad de la línea
	Capacidad ofrecida
	Capacidad utilizada
	Capacidad productiva
	Productividad
	Utilización
	Flexibilidad
	Densidad
	Energía

Nivel del servicio	Desempeño de los elementos	
	Calidad del servicio	
Impactos	Económicos Sociales	Beneficios/Costos Beneficios/Costos
Costos		Inversión Operación

Fuente: Elaboración propia; datos obtenidos de Vuchic. 2017

- Desempeño del Sistema

Se refiere a todo el funcionamiento de los elementos del sistema, los más importantes son:

- *Frecuencia*: Número de unidades de tránsito que pasan por un determinado punto de la ruta en cada hora (Vuchic V, 2007)

Se suele denotar a la frecuencia como f .

- *Intervalo de paso*: Es el reciproco de la frecuencia. Es la cantidad de tiempo que transcurre entre el paso de dos vehículos por un punto. Se denota con la letra i (Islas & Lelis, 2007) Cuando no existe una programación del transporte, y que no existe una planeación de la demanda, el tiempo de espera promedio de un usuario es igual a la mitad del intervalo de paso entre dos servicios consecutivos (Islas, Rivera, & Torres, 2002)
- *Velocidad de operación*: Es la velocidad experimentada por el pasajero, durante un trayecto y en la ruta, no solo cuando el vehículo está en movimiento sino también contando paradas, tiempos de ascenso y descenso de pasajeros y tiempo entre estaciones.

La velocidad de operación se suele expresar como V_0 .

- *Confiabilidad*: Es un porcentaje, indica la cantidad de unidades de tránsito que llegaron con un cierto margen de tiempo al que estaba calendarizado; por ejemplo, el porcentaje de unidades de tránsito que llegaron con una desviación de ± 5 minutos a la hora que estaba calendarizado.

- *Seguridad*: Es la unidad que mide el número de accidentes, muertes o lesiones, su unidad número de sinistros o accidentes por cada millón de pasajeros por cada kilómetro, o alguna unidad similar.

- *Capacidad de la línea*: La capacidad de la línea se puede dividir en dos:

Capacidad ofrecida: Número máximo de espacios, o asientos, ocupados en una unidad de tránsito, al pasar por un punto de la línea en una hora.

Capacidad utilizada: Número máximo de personas que pasan por un punto de la línea durante una hora, en una unidad de tránsito. La capacidad de la línea se suele denotar la letra C .

- *Capacidad productiva*: Es una unidad compuesta, se conforma del producto de la velocidad de operación y la capacidad de la línea.

Es un gran indicador de la línea, ya que toma en cuenta al pasajero (en la velocidad de la línea) y al operador (en la capacidad). Se suele utilizar como indicador comparativo entre sistemas y modos. Esta unidad es la única que toma en consideración a los pasajeros, y que sirve como un indicador de movilidad, ya que no sólo considera la cantidad de pasajeros que se mueven, también considera el tiempo que se requiere para trasladar esa cantidad de pasajeros (Vibhuti, 2008)

La capacidad productiva se simboliza matemáticamente como P_c , y su expresión matemática es:

$$P_c = V_o \cdot C$$

- *Productividad*: Es la cantidad de unidades obtenidas por cada unidad de recursos; por ejemplo, vehículos-km por cada costo de operación, vehículos-km por unidad de combustible, espacio-km por cada ancho de vía.
- *Utilización*: Es similar a la productividad; también es una relación entre unidad producida por cada unidad de recurso, pero en la utilización las unidades tienen que ser iguales; por ejemplo, personas por cada kilómetro entre espacio por cada kilómetro.
- *Flexibilidad*: Es la unidad con la cual se mide la adaptación del sistema a las variaciones de la demanda; se divide en dos tipos: espacial y temporal, la espacial se refiere a las variaciones en la demanda a lo largo de la ruta, la temporal se refiere a las variaciones en la demanda a lo largo de sus horas de operación (Islas & Lelis, 2007) La flexibilidad se denota con las letras F_e .
- *Densidad*: Es la cantidad de vehículos por cada unidad de distancia (Taylor, Bonsall, & Young, 2000) Se denota con la letra D .
- *Energía*: Es la cantidad consumida de combustible por unidad de viaje (Taylor, Bonsall, & Young, 2000) Se denota con la letra E .
- Nivel de servicio
El nivel de servicio [LOS, por sus siglas en inglés] es la forma en que se mide la experiencia del pasajero. Son las características que evalúan el servicio que reciben los usuarios, es un concepto sumamente importante en la planeación de transporte, ya que podrá determinar la atracción potencial de usuarios, las características a evaluar del nivel de servicio se pueden dividir en tres grupos:
 - Desempeño de los elementos que afectan al usuario: Son los componentes del desempeño que afectan directamente el viaje de los pasajeros, y estos son: velocidad de operación, confiabilidad y seguridad.
 - Calidad del Servicio: La calidad del servicio se mide de forma cualitativa, por lo que es relativa a cada usuario. Los factores más comunes para determinar la calidad son: simplicidad del servicio, estética, limpieza, confort y comportamiento de los pasajeros.

- Precio: La cantidad monetaria que se tiene que pagar por utilizar el servicio de transporte.

- Impactos

Los sistemas de transporte, al ser implementados, siempre llevaran consecuencias en las sociedades o en los grupos en los cuales sean creados. Dependiendo de múltiples factores, los impactos pueden ser positivos o negativos, no todos los impactos son medibles, y la intensidad de su afectación depende del sistema en particular y de la población en la cual ha sido implementado (Islas & Lelis, 2007)

La siguiente clasificación de los impactos es propuesta por el Instituto Mexicano del Transporte (Islas & Lelis, 2007) la cual divide a los impactos en dos grandes grupos: económicos y sociales. A continuación, se presenta una tabla resumen de esta clasificación:

Tabla 2 Clasificación del IMT de los impactos del transporte urbano

Clasificación		Ejemplo
Económicos	Beneficios o ventajas	Directos Ahorro de tiempo de traslados Indirectos Crecimiento en la zona económica
	Costos o desventajas	Directos Daño al medio ambiente por la construcción Indirectos Dirigen el flujo económico a una zona específica
	Beneficios o ventajas	
		Directos El ahorro de tiempo permite el desarrollo de actividades culturales Indirectos Permite la comunicación entre sociedades
Sociales	Costos o desventajas	Directos Baja la rentabilidad en zonas donde no llega el transporte Indirectos Provocan migración

Fuente: Elaboración propia con datos de Islas & Lelis. 2017

Por ejemplo, en la tabla anterior podemos apreciar que hay impactos económicos y sociales, los cuales pueden ser beneficios o costos, y los cuales, a su vez, pueden ser directos e indirectos; por lo tanto, existen ocho posibilidades de impactos, según la clasificación del Instituto Mexicano del Transporte.

- Costos

Es la cantidad monetaria que se requiere para la construcción y operación de un sistema de transporte, los costos se dividen en dos categorías:

- Inversión (capital): Es el costo que se requiere para la construcción del sistema de transporte, también incluye el costo por cambios permanentes que se tendría que realizar en un futuro en el sistema de transporte.
- Costos de operación: Son los costos por la operación de forma regular del sistema de transporte.

Mientras que los costos operativos se realizan año con año, durante la operación del sistema, los costos de inversión solo se realizan una vez. El análisis de costos se realiza por año, conforme a la siguiente matriz:

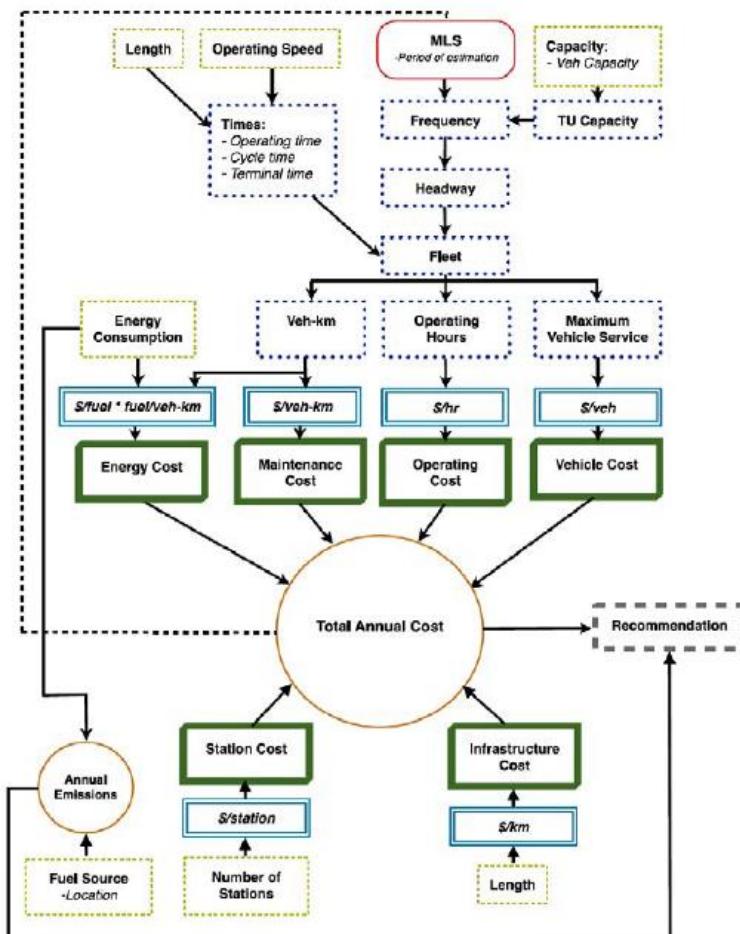


Figura 2 Diagrama de Evaluación de Costos Totales de un Sistema de Transporte Urbano Público. Fuente: Casello, McD. Lewis, Yeung, & Santiago-Rodríguez, p. 50, 2014)

3.2 Clasificación del Transporte

El transporte, debido a su amplitud, puede ser un concepto muy complicado de analizar, para poder facilitar el estudio se ha recurrido a una serie de clasificaciones. La primera clasificación se realiza agrupando varios vehículos dentro del ámbito que se desarrollan, obteniendo 5 grupos (marítimo, ferroviario, carretero, aéreo y ductos); una vez agrupado dentro del medio se parte a clasificarlo con base en sus características tecnológicas, es decir, en modos de transporte; la última agrupación es una subclasificación de los modos de transporte, agrupando a varios de ellos con base en su relación capacidad-desempeño, en tres grupos: transporte de calle, capacidad media y alto desempeño.

En cada medio físico existen varios modos de transporte, que se pueden agrupar según su capacidad y desempeño.

De manera general, los sistemas de transporte de estudio de esta tesis siguen la siguiente clasificación:



Figura 3 Clasificación general del Sistema de Transporte Urbano Público. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de: Vuchic, V. 2017

Los autobuses de tránsito rápido pertenecen al sistema de transporte urbano público, en el medio carretero; los trenes ligeros también pertenecen al sistema de transporte urbano público, en el medio ferroviario.

2.3.1 Clasificación con base en el medio

Después de poder clasificar a los sistemas de transporte por el ámbito en que se desarrollan, la siguiente distinción es poder identificar el medio físico en el cual desarrollan las actividades, la parte en la cual los vehículos pueden realizar el traslado de bienes y personas. Existen 5 medios principales: aéreo, marítimo, carretero, ferroviario y ductos.

- Aéreo: Como su nombre lo indica este medio se desarrolla en el aire, es seguro, rápido y de buen trato con las personas y mercancías, es uno de los medios de transportes más caros (Bloch, 2012)
- Marítimo: Dentro de las ciudades lo más común es el transporte a través de canales o ríos, dependiendo de las características de las ciudades también podría existir transporte

en el océano. El transporte marítimo suele ser económico, aunque lento, es también un medio seguro (con respecto a accidentes), las rutas suelen ser fáciles de darles mantenimiento, sus vehículos están limitados a la profundidad del río y su navegabilidad de las condiciones de tiempo (National Institute of Public Schooling, 2012)

- Carretero: El modo carretero, también conocido como terrestre, es el que se desarrolla en la superficie de la tierra, es de los medios más baratos de transporte y tiene la ventaja de ser muy flexible, aunque no es muy viable para distancias muy largas (National Institute of Public Schooling) El modo carretero es el más utilizado por pasajeros y carga. Su principal característica es que sus vehículos se trasladan por medio de carreteras, autopistas o calles. Dentro de este grupo se encuentran los autobuses. Es el modo que presenta la mayor accidentología en el mundo y el que más contaminantes produce (Bloch, 2012) Dentro del sistema de transporte urbano público existen los autobuses y trolebuses, nos enfocaremos en los autobuses, ya que a él pertenece el sistema de autobuses de tránsito rápido.

Los autobuses son un modo de transporte público masivo (cualquier persona puede utilizarlo pagando una cuota) con vehículos que se mueven por medio de neumáticos (de caucho o goma), son operados por algún conductor, la gran mayoría cuenta con motor de diésel; son, generalmente, de un solo carro (aunque existen algunos modelos articulados o biarticulados) y pueden contar con desde dos a cuatro ejes.

Este sistema de transporte tiene un bajo costo de inversión, ya que sus rutas pueden ser establecidas en cualquier calle y no requiere de una gran infraestructura para sus paradas. Los sistemas BRT son diferentes a los demás sistemas de autobús en su costo de inversión, requieren características especiales como separación de vías, estaciones más grandes y con mayor infraestructura y vehículos más grandes, lo que eleva sus costos.

La mayoría de los sistemas de autobuses (a excepción del BRT) cuenta con una capacidad muy limitada, cuenta con entre 15 y 60 espacios para pasajeros (Vuchic V, 2007). Son muy buenos cuando la demanda en la ruta no es tan grande, en un rango de ligera a moderada. Si se excede la demanda los costos operativos incrementan, ya que no se puede ampliar la capacidad de los vehículos.

Los autobuses se pueden dividir en tres grandes grupos, clasificándolos con el tipo de servicio que ofrecen, íntimamente relacionado con el tipo de derecho de vía que cuenta.

A continuación, se presentan los tres grandes grupos, definiéndolos y presentando sus características más básicas.

- Autobuses regulares. Características básicas

Son el tipo de autobús más utilizado en las ciudades. Estos autobuses cuentan con un tipo de infraestructura muy básica, sus rutas son en tránsito mezclado por las

calles, cuentan con derecho de vía tipo C, sus paradas no cuentan con infraestructura (muchas veces las paradas son cada esquina), no cuentan con información, el método de pago es al frente. Este tipo de autobuses es el que cuenta con un desempeño muy bajo y que afecta su nivel de servicio, por lo tanto, su atracción de pasajeros no es tan alta. Sus rutas si son planeadas y están bien definidas, aunque eso no afecta su flexibilidad, pudiendo modificar sus rutas en caso de ser necesarios. Su velocidad de operación y su confiabilidad suele estar afectada por las intersecciones semaforizadas y los accidentes viales. Su bajo desempeño ha generado una mala imagen ante los usuarios, por lo tanto, prefieren el uso del automóvil antes de este tipo de autobús.

- Sistemas de autobús de tránsito. Características básicas

Estos autobuses son una versión mejorada a los autobuses regulares. Cuentan con rutas bien definidas, las paradas ya están previamente establecidas, ya se les confiere un carril exclusivo (sin alguna barrera física), aunque sigue estando en tránsito mezclado. Las estaciones y paradas ya suelen contar con mayor información para los usuarios. Todas estas mejoras permiten que el desempeño sea mucho mayor, los usuarios tienen una mejor percepción del sistema y generan una mayor atracción de viajes. Los vehículos cuentan con una mayor capacidad.

- Autobuses de Transito Rápido. Características básicas

Los Autobuses de Tránsito Rápido [BRT, por sus siglas en inglés *Bus Rapid Transit*] son autobuses con características mejoradas a las de un autobús de tránsito. En la actualidad se han confundido los conceptos entre autobús de tránsito y los BRT, ya que cuentan con algunas características similares como carriles exclusivos, vehículos con mayor capacidad o paradas bien definidas y espaciadas; esto es un error, ya que solo son mejoras a los autobuses regulares, demeritando el concepto de los BRT, bajando de categoría al sistema y dejando de lado muchas de sus características y tecnologías.

Siendo el tema de estudio de esta tesis este sistema de transporte se estudiará a fondo este sistema de transporte en el siguiente capítulo.

- Ferroviario: Todo transporte que se desarrolle por medio de rieles es considerado ferroviario. Es de los modos más comunes en las ciudades y más confiables, es muy recomendable para largas distancias, es más rápido que el medio carretero, sus operaciones no se afectan tanto por el clima; aunque es muy caro en viajes de cortas distancias y no es muy flexible (National Institute of Public Schooling, 2012) No posee una gran accidentología, ni atascos, además de ser amigable con el medio ambiente, cumple con una función social y es eficaz ordenador territorial (Bloch, 2012) Dentro de esta

categoría se encuentran, en el sistema de transporte urbano público, los sistemas de tranvías, tren ligero, metro (RRT) y tren regional (RGR) (Vuchic, 2007)

- Tranvía: Consisten en un vehículo (aunque pueden operar hasta máximo tres vehículos en trenes) operando en tránsito mixto (categoría C de derecho de vía) Cuentan con un muy buen confort de viaje y excelentes características dinámicas, aunque su confiabilidad y velocidad de operación depende mucho de las calles en las cuales está transitando. Su capacidad ronda entre los 100 y 180 pasajeros (Vuchic, 2007)
- Tren Ligero (LRT, por sus siglas en inglés): Son vehículos que operan en trenes de uno a cuatro vehículos, alimentado eléctricamente y en un derecho de vía propio (derecho de vía tipo A y B) Su capacidad en promedio es de 250 pasajeros, con velocidades de operación de entre 18 y 40 km/h (Vuchic, 2007)
- Metro (RRT, por sus siglas en inglés): También es conocido como Tren Pesado o Tren de Tránsito Rápido, tiene un derecho de vía totalmente independiente y controlado (tipo A), de tracción eléctrica y una velocidad de operación alta, que permite una mayor separación entre estaciones. Este sistema de transporte proporciona un viaje cómodo, alta eficiencia, alta confiabilidad y alta seguridad (Vuchic, 2007)
- Trenes Regionales (RGR, por sus siglas en inglés): Los trenes regionales son los que cuenta con las mejores características tecnológicas y con los estándares de operación más altos. Su operación es, generalmente, de suburbios a centros de comercio y negocios, con intervalos de paso de entre 20 y 60 minutos, velocidades de operación que van de los 30 a 130 km/h, su capacidad (por carro) es de 128 pasajeros (Vuchic, 2007)
- Ductos: Los ductos suelen ser una forma de transporte de bienes, aún no está desarrollado en el ámbito urbano, más bien suelen ser utilizados para redes de agua, gas o petróleo. En la actualidad se están desarrollando nuevas tecnologías que utilizan este medio para el transporte de pasajeros, como el *Hyperloop One*.

3.2.2 Clasificación en modos de transporte

La siguiente clasificación es agrupar a los vehículos, dentro de su medio, en modos de transporte, para poder agrupar los diferentes tipos de vehículos en modos de transporte se cuentan con tres clasificaciones básicas; no existe alguna definición acerca de cuantas características se deben de compartir para poder pertenecer a un modo de transporte; para esta tesis se considerará como principal las características tecnológicas.

A continuación, se presentan una tabla resumen de las clasificaciones en las que se pueden agrupar los diferentes tipos de vehículos en modos de transporte, posteriormente se detalla acerca de ellos en los siguientes subcapítulos.

Tabla 3 Parámetros de clasificación de los modos de transporte urbano.

Parámetro de clasificación	Concepto
Derecho de vía	Categoría A
	Categoría B
	Categoría C
Características tecnológicas	Soportado
	Montado
	Suspendido
Control	Guía
	Propulsión
	Parte motora
Servicio	Fuerza de tracción
	Manual-visual
	Manual-señal
Operación	Automático
	Combinaciones
	Corto
Ruta	Urbano
	Regional
	Local
Paradas	Acelerado
	Exprés
	Regular
Aceleración	Hora pico
	Especial

Fuente: Elaboración propia; datos obtenidos de Vuchic. 2017

Clasificación por derecho de vía

El derecho de vía es la superficie proporcionada en la cual opera el modo de transporte.

Se subdivide en tres categorías, de acuerdo a la interacción con otros modos de transporte y a su separación del tránsito (Vuchic V. 2007), las cuales son:

- Categoría A: Se refiere a la vía en la cual los vehículos van totalmente independientes al resto del tránsito. A sus vías no pueden acceder otros vehículos o peatones, todas las interacciones son por medio de estaciones o punto de control específicos, son los que tienen una categoría más elevada, ya que, al no tener interacción con otros modos de transporte, se puede controlar de mejor manera sus tiempos, y por lo tanto ser más eficientes. Pueden contar con intersecciones, señalizaciones o protecciones en la vía, ya que lo que define a esta categoría es su independencia del tránsito.

El metro de la Ciudad de México es un ejemplo de esta categoría, su infraestructura es por medio de túneles, vías elevadas o carriles especiales, misma que le da su independencia.

- Categoría B: Esta categoría incluye una separación, la cual puede ser por medio de barreras, de sus vías, con el tránsito, las separaciones son de manera longitudinal, ya que puede compartir cruces e intersecciones con peatones o vehículos, son una categoría inferior a las del tipo "A"; sin embargo, proporcionan una mejor eficiencia que el tránsito por una vía general.

Los ejemplos más famosos de este tipo de derecho de vía son tres: trenes ligeros, autobuses de tránsito rápido y vehículos de alta ocupación (High Occupancy Vehicle, HOV, por sus siglas en inglés); este último siendo una subcategoría inferior, ya que no separa los vehículos privados de los públicos.

- Categoría C: Es la categoría más baja de vía. Aquí pueden compartir las vías varios modos de transporte, también pueden ser compartidas por transporte privado y público. También se le conoce como tránsito mezclado (*traffic mixed* en inglés), algunas veces, el sistema de transporte público puede contar con carriles específicos, indicados por medio de líneas y señalizaciones; lo que la diferencia de la categoría tipo B es que, no cuentan con una separación física que impida que su vía sea invadida. En este tipo de vía los sistemas de transportes presentaran el desempeño más bajo que en cualquier otro tipo de vía.

Un ejemplo es cualquier calle de la Ciudad de México, donde podemos encontrar vehículos privados, bicicletas, peatones y transporte urbano público, todos compartiendo el mismo espacio de vía.

Clasificación por características tecnológicas

Las características tecnológicas son todas las propiedades, o singularidades, mecánicas con las que cuente el sistema de transporte urbano, tanto en su vehículo como en la vía, pueden existir múltiples características, dependiendo de qué tan minucioso sea el estudio, todas ellas muy importantes a la hora de elegir un sistema de transporte; a continuación, se presentan las cuatro más importantes (Vuchic V, 2007), y las que clasifican de mejor forma a los diferentes sistemas de transporte urbano:

- Soporte: Es la superficie que detendrá al vehículo verticalmente, la cual estará en contacto con él y su vía, proporcionándole tracción para generar su movimiento.
Existe una subclasificación del soporte, dependiendo del tipo de interacción vehículo-soporte, dividida en tres categorías:
 - Soportado: Son los que se desplazan sobre una vía o sobre una guía.
 - Montado: Aquellos en el cual el vehículo está sujeto alrededor de una guía.

- Suspendido: Son los que cuentan con algún soporte entre el vehículo y su superficie de desplazamiento.
 - Guía: Se refiere al control lateral con el que contará el vehículo; proporcionando una orientación y dirección.
 - Propulsión: Es la característica mecánica que generará el movimiento, y por medio de la fricción iniciar su desplazamiento. Además, controla la aceleración y frenado del vehículo. Esta característica se compone de dos factores esenciales:
 - Tipo de unidad de propulsión: Esta es la parte motora de la propulsión, generando fuerzas mecánicas.
Los más comunes son los motores de combustión interna [ICE, por sus siglas en inglés] para autobuses con combustible de Diesel y para autos con combustible de gasolina. Para los trenes son más comunes los motores eléctricos. Existen otras tecnologías más específicas e inclusive algunas que aún están siendo experimentadas.
 - Métodos de transferencia de las fuerzas tractivas: Es la componente con la cual se transformarán todas las fuerzas proporcionadas por la unidad de propulsión en desplazamiento, a través de la fricción.
Las más comunes son: fricción-adhesión, magnéticas, propelentes, rotores y cables.
 - Control: Es la forma en la cual se dirigirán, coordinarán y regularán uno o varios vehículos, durante un viaje, en un sistema de transporte.
Los factores que se buscan controlar principalmente son:
 - Espaciamiento (vertical y horizontal) vehículos y peatones.
 - Interacción en intersecciones.
 - Ascensos y descensos.
- El control se puede realizar de manera manual-visual, manual-señal, automático o por medio de combinaciones.

Clasificación por su servicio

Esta clasificación contiene la forma en la cual estará operando el sistema de transporte; sus distancias de recorrido, su interacción con las estaciones y el tiempo el cual estará operando; se ubicarán tres grupos, los cuales definirán el tipo de servicio que se está prestando, y que a su vez cuentan con tres características cada grupo (Vuchic V, 2007):

Tipo de ruta

- Tránsito de recorrido corto: Son los viajes en zonas poco extensas y con una gran densidad de pasajeros. Estos viajes se realizan con velocidades lentas y sin un gran

rendimiento. Son utilizados principalmente dentro de campus escolares, distritos de negocios, aeropuertos, zonas de exhibiciones, festivales o parques de diversiones

- Tránsito urbano: Son los viajes que se realizan dentro de una ciudad. Es el tipo de rutas más comunes.
- Tránsito regional: Son los viajes que se realizan a través de zonas metropolitanas. Estos viajes se realizan con una velocidad mayor, y el espaciamiento entre estaciones es grande.

Programación de paradas

- Servicio local: Es cuando el vehículo realiza todas las paradas proyectadas, y por lo tanto el más lento. Es el tipo de operación más común.
- Servicio acelerado: Se refiere a cuando los vehículos no se detienen en paradas específicas, incrementando la velocidad de su servicio. Para realizar este servicio se cuenta con un horario ya determinado; es decir, este servicio ya se encuentra previamente establecido y calendarizado.
- Servicio exprés: En este tipo de servicio el vehículo solo se detendrá en estaciones específicas, ofreciendo el menor tiempo de recorrido. Siempre se utiliza de manera paralela al servicio local o acelerado. Es el que menos paradas realizará de los tres tipos de servicios. Se propone en esta tesis que, en este tipo de servicios el número de paradas siempre debe de ser menor al número de estaciones que se evitó la parada.

Tiempo de operación

- Regular: Es el servicio que opera durante la mayor parte del día, proporcionando la mayor cantidad de viajes. Este es el servicio más común en las ciudades, y es el más básico.
- Servicio de hora pico: Es el que opera durante las horas de mayor tránsito. Su aplicación más común es durante las horas de entrada y salida de escuelas y oficinas. Usualmente se utiliza en viajes de zonas de suburbios a centros de negocios (*commuter transit* en inglés).
- Especial: Es el servicio que opera solo en circunstancias especiales y durante un tiempo específico, como eventos deportivos o conciertos. También es utilizado en condiciones de auxilio.

3.2.3 Subclasificación de los Modos de Transporte con base en la relación desempeño-capacidad

Una subclasiación utilizada para poder agrupar varios modos de transporte, que se desarrollan en diferentes medios, es a través de las características tecnológicas que determinan su desempeño y capacidad, ya que lo que se busca en los sistemas de transporte urbano público es el traslado de la mayor cantidad de personas de la manera más eficiente. Las tecnologías y el diseño de los modos de transporte están estrechamente ligados a la demanda que van a

satisfacer, ya que el desarrollo tecnológico se ha desarrollado en función de una mejora en el servicio.

La clasificación de modos de transporte en familias se enfoca, principalmente, en agruparlos de acuerdo a su relación desempeño/capacidad; esta relación se ve fuertemente afectada por el tipo de derecho de vía con el que cuente, porque lo que esta categoría está implícita en la clasificación (Vuchic, 2007) Por otro lado, esta agrupación de las diferentes soluciones de transporte está enfocada en la máxima capacidad del transporte (pasajeros por hora), lo cual está íntimamente relacionada con los vehículos, modo de operación y su infraestructura (Novales, Orro, Conles, & Anta, 2014) En otras palabras, la capacidad del transporte y su relación con sus vehículos, operación e infraestructura (desempeño) Su división es en tres grandes grupos:

- Sistemas de Transporte de Calle: Es el más común en todo el mundo, se desarrolla en un derecho de vía tipo C (en el tránsito mixto), su confiabilidad es muy baja, las velocidades de operación también son bajas, la capacidad de los vehículos es limitada (como mínimo 20 espacios, y hasta 150 espacios) Esta categoría incluye a los autobuses regulares, los autobuses de servicio exprés, los trolebuses y los tranvías (Vuchic, 2007)
- Sistemas de Transporte de Capacidad Media: Tránsito Semirápido: Están caracterizados por tener un derecho de vía segregado, pero con una interacción a nivel en los cruces, la separación se consigue por medio de bordos, banquetas, cercos o cualquier otro sistema, lo que permite que sus operaciones se vean muy poco afectadas por el tránsito mixto, produciendo velocidades de operación altas, mejor confiabilidad que los sistemas de calle, seguros y eficientes. Los sistemas más representativos son los autobuses de tránsito rápido, trenes ligero y monorrieles (Novales, Orro, Conles, & Anta, 2014)
- Sistemas de Transporte de Alto Desempeño: Tránsito Rápido: El elemento principal de esta categoría es el derecho de vía tipo A, con tracción eléctrica, sistemas guiados y señalizados, lo que les permite ser sistemas de alta capacidad, confiabilidad, seguridad y el desempeño más alto. Aquí se incluye a los metros, metros de ruedas neumáticas, trenes regionales y trenes ligeros de tránsito rápido (Vuchic, 2007)

Siendo el tema de investigación de esta tesis dos sistemas de transporte de capacidad media se abordarán con mayor detalle en este grupo.

4. SISTEMAS DE TRANSPORTE DE CAPACIDAD MEDIA: TRÁNSITO SEMIRÁPIDO

Esta familia de modos de transporte ofrece una mejor relación desempeño/calidad que los Sistemas de Transporte de Calle, su mejora se debe, principalmente, a que los sistemas de transporte de esta familia poseen un derecho de vía tipo B (a diferencia de los Sistemas de Transporte de Calle, los cuales transitan en un derecho de vía tipo A).

Los sistemas de transporte que componen esta familia son: Trenes Ligeros [LRT, por sus siglas en inglés], Autobuses de Tránsito Rápido [BRT, por sus siglas en inglés] y los Monorrieles. Esta mejora le permite tener un servicio con mayor confiabilidad, velocidad y atracción de pasajeros.

Los sistemas de Transporte de Capacidad Media surgen como respuesta a la necesidad de crear una gama de sistemas de transporte que tuvieran mejor desempeño a los autobuses, que generaran una mayor atracción de viajes y que, al mismo tiempo, requiriera de una inversión menor a los metros.

En subcapítulo 3.3 se hablará con mayor detalle de los Autobuses de Tránsito Rápido y en el subcapítulo 3.5 se abordará el tema del Tren Ligero, siendo estos dos sistemas de transporte el tema central de esta tesis.

A continuación se abordará el Sistema de Transporte de Monorrieles. Aquí se definirá, se conocerán sus breves antecedentes, su clasificación, sus características básicas y, finalmente, porque fue que no se decidió incluir en esta comparativa este modo de transporte.

- **Monorrieles**

Los monorrieles pertenecen al grupo de modos de transporte llamados Transportes de Guía Automatizada [AGT, por sus siglas en inglés]. Estos modos de transporte se caracterizan por tener menos mano de obra trabajando, ya que muchos de sus procesos de operación están automatizados, por lo que sus costos de operativos son relativamente bajos. Generalmente los AGT pertenecen a la familia de Sistemas de Tránsito Rápido, ya que son más confiables y tienen un mejor desempeño; sin embargo, existen algunos casos, como el Monorriel, en el que no cumplen con una gran capacidad o con el derecho de vía pertinente para pertenecer a este grupo.

La definición más completa de un Monorriel es “Modo de transporte en el cual sus vehículos son guiados y soportados por un único riel o viga” (Kikuchi, Onaka, 1998). Esta definición deja atrás una vieja concepción que se tenía de este modo de transporte, la cuál era que, se conocía al sistema como: “Un tren, que podía estar suspendido, montado sobre un solo riel y

con una rueda metálica". Con esto se pierden muchos avances tecnológicos con los que cuenta actualmente, y el cual es muy diferente al actual modo.

El único monorriel que existe con estas características es el *Schwebebahn* en la ciudad de Wuppertal, Alemania. Un monorriel inaugurado el 01 de marzo de 1901, y el es un tren suspendido, que se traslada sobre un solo riel por medio de una rueda metálica. Este monorriel tiene una extensión de 13,3 kilómetros, cuenta con 20 estaciones, su velocidad de operación es de 27,5 km/h y puede transportar (en un día laboral) 65'000 pasajeros [Die Wuppertaler Schwebebahn, 2016].

El *Schwebebahn* es considerado el primer monorriel en la historia, único en su tipo. Actualmente se puede clasificar a los monorrieles en dos grandes grupos:

- Monorrieles Suspendidos: Son aquellos en los cuales los trenes se encuentran colgados de una viga hueca (usualmente de concreto) por la cual rueda un neumático de caucho. Esta configuración es la más parecida al *Schwebebahn*; sin embargo, la superficie de rodamiento es la viga hueca, en lugar de un riel, y la rueda es de caucho y no metálica.

Un ejemplo de este tipo de monorriel es la *Town-Liner/Chiba Urban Monorail System*, que opera en la ciudad de Chiba, Japón.

- Monorrieles Montados: Son aquellos en los cuales los trenes se encuentran acoplados sobre una viga (también suele ser de concreto), la cual sirve como guía. Este tipo de monorrieles cuenta con dos tipos de ruedas neumáticas, unas que se encuentran sobre la viga (que son de carga y de rodamiento) y unas que se encuentran en las caras laterales a la viga (que sirven como guía).

Esta es la configuración más común. Un ejemplo de este tipo de monorriel es el *Yui Rail*, que opera en la ciudad de Okinawa, Japón.

Un tipo de monorriel montado son los *Maglev* (también conocidos como trenes de levitación magnética), los cuales cuentan con la misma infraestructura que los monorrieles montados clásicos. Lo particular de estos sistemas es su propulsión, la cual cuenta con motores lineales, que generan su movimiento a partir de una interacción magnética entre el motor y la vía. Los trenes también tienen una interacción magnética, por lo que, para su movimiento, se encuentran levitando. Presentan una gran velocidad, pero suelen ser muy costosos; por lo tanto, no resultan viables para su uso dentro de las ciudades.

Los monorrieles cuentan con derecho de vía tipo A, lo que les da un mejor desempeño sobre los Trenes Ligeros y los Autobuses de Tránsito Rápido. Usualmente suelen tener cuatro carros, por lo que su capacidad no alcanza para clasificarlos de tránsito rápido, pudiendo trasladar entre 200 y 400 personas por viaje (Fuente: *Considering Monorail Rapid Transit for North American Cities*). Los monorrieles cuentan con motores eléctricos, a excepción de los Maglev. Sus impactos en el derecho de vía suelen ser muy bajos, comparados con otros

modos de transporte; aunque, en algunos casos puede resultar antiestético para el paisaje urbano.

Los monorrieles han tenido menos tiempo de desarrollo tecnológico, comparado con los otros modos de transporte de capacidad media, prácticamente considerándose una tecnología nueva. Son muy pocas las líneas de monorriel existente, muchas de ellas localizadas en Japón, esto limitado su uso. Adicionalmente se ha demostrado, con proyectos recientes (como se muestra en el artículo “*Why Light Rail Transit (LRT) was selected over Monorail*”), que el costo a corto plazo (la construcción de la línea) resulta mucho más alto que el de una línea de Tren Ligero. También muestra problemas de operación como en la ampliación de líneas e interacción con otros modos. Por razones como estas es por la que se ha dejado de lado en la discusión entre modos de capacidad media.

4.1 Autobuses de Tránsito Rápido

Los Autobuses de Tránsito Rápido son los autobuses con mayor desarrollo tecnológico existentes en el mercado, creando un nuevo sistema de autobuses de alto desempeño, las mejoras con las que cuenta conllevan una serie de problemas de entendimiento del sistema; cometiendo dos graves, pero muy comunes, errores sobre el sistema; por un lado, se ha utilizado el concepto de Autobús de Tránsito Rápido de manera indiscriminada, asignándole esa categoría a cualquier tipo de autobús que cuente con alguna mejora tecnológica, lo que ha conducido a una menospreciación generalizada por parte de los pasajeros. Por otro lado, se ha sobrevalorado muchas de sus características, como costo de inversión, capacidad y velocidad de operación, creyendo que pueden sustituir a otros modos de transporte, obteniendo los mismos resultados con costos más bajos. Estos dos errores han conducido a una confusión acerca del sistema, que puede conducir a errores de planificación de sistemas de transporte.

En este capítulo se discutirá a fondo el concepto, para poder generar una idea clara de lo que realmente es un Autobús de Tránsito Rápido.

Los Autobuses de Tránsito Rápido son más conocidos por sus siglas en inglés BRT, provenientes de *Bus Rapid Transit*, por lo que, en esta tesis, se utilizaran sus siglas para hacer referencia a ellos.

4.1.1 Antecedentes

El BRT surgió como respuesta a una necesidad que surgió aproximadamente en 1930, que fue la sustitución de los tranvías en modos de transporte que tuvieran un mejor desempeño y una mayor capacidad, todo esto con un menor costo de inversión al de los sistemas de tránsito rápido. Este fenómeno dio surgimiento a los Sistemas de Transporte de Capacidad Media, primero con la creación de los sistemas de tren ligero (el cual se estudia en el capítulo 3.7) y la segunda fue la introducción de los autobuses.

La introducción de autobuses como sistemas de transporte troncales de las ciudades tuvo mayor auge durante el periodo que comprende los años de 1950 a 1970 (Vuchic V. 2007). Sin embargo, los autobuses convencionales no cumplían con la demanda de viajes, tenían una mala imagen por los usuarios y sus recorridos eran muy lento, por lo que se buscaron mejorar sus características.

En 1959 el plan “*Mass Transportation Survey for the National Capital Region*” (DeLeuw Chatcher & Co.) sirvió como predecesor a los BRT. En este plan se introducían autobuses en carriles propios, sin separación del resto del tránsito, en tres o cuatro carriles, los cuales proporcionarían un mejor servicio a los pasajeros. También se planeaba introducir una línea exprés que tendría características muy similares a las de un BRT.

Durante muchos años las ideas de un sistema de autobús mejorado solo fue presentado en los planes de desarrollo de las ciudades o trabajos de investigación, hasta la década de 1970, cuando se crea el primer sistema BRT, surgido a partir del “Plan Preliminar de Urbanismo” por el *Instituto de Pesquisa e Planeamiento Urbano de Curitiba [IPPUC]* el cual contaba con innovador tipo de corredor, llamado sistema trinario, el cual se caracteriza por tener tres corredores principales: el corredor central es un carril de doble sentido destinado para el tránsito exclusivo del sistema de autobús; a sus costados se encuentran dos corredores de un solo sentido y opuestos entre sí, el cual está destinado para el tránsito mixto; el último corredor son dos carriles adyacentes a los de tránsito mixto, los cuales tienen el mismo sentido a los corredores de tránsito mixto contiguos y que funcionan como vías rápidas; además, se ya contar con un carril propio, la línea Norte-Sur ya contaba con otras características del sistema BRT, como una identidad propia y el cobro antes del abordaje. Su evolución continuo a lo largo de los años, en 1979 se crearon las líneas interbarrios (complementando el servicio de las líneas principales y permitiendo transbordos entre líneas), en 1991 se crean las *líneas directas* que funcionan como líneas exprés y las cuales contaba con acceso a los autobuses a nivel, por medio de estaciones elevadas, llamadas *estaciones tubo*, en 1992 se incorporaron los autobuses biarticulados y en 1996 la empresa que esta concesionada a operar este sistema comenzó a controlar toda la zona metropolitana, este hecho y la integración de una tarifa única permitió consolidar sus líneas en la Red Integral de Transporte (Pinheiro C. 2005).

La Red Integrada de Transporte de Curitiba es considerada como el sistema de autobús BRT mejor planeado, su éxito se debió a que la concepción del transporte se hizo de una manera integral con la urbanización y los usos de suelos que se fueron concediendo en la ciudad (Vuchic *et al.* 2011).

4.1.2 Definición

Algunas definiciones del sistema de transporte BRT son:

“Modo de transporte flexible, con llantas de caucho que combina estaciones, vehículos, servicios, derechos de vía y elementos de sistemas de transporte inteligente (ITS) dentro de un sistema completamente integrado con una fuerte imagen e identidad” (Levinson et al., 2003, p. 12)

“Autobús de tránsito diseñado como un sistema integrado de autobuses distintivos y con una infraestructura separada con considerable independencia del resto del tránsito, permitiendo mayor velocidad, confiabilidad y seguridad que un Autobús de Tránsito” (Vuchic V, 2007, p. 256)

“El Autobús de Tránsito Rápido es un transporte de alta calidad basado en autobuses que entrega un servicio rápido y eficiente que puede incluir carriles exclusivos, señales de prioridad de tránsito, plataformas elevadas y estaciones mejoradas” (Federal Transit Administration, 2017)

A continuación, se enlistan algunas de las características básicas con las que debe de contar:

- Segregación del resto del tránsito. Debe de contar con infraestructura especializada que le permita tener una independencia, contando así con un derecho de vía tipo B (predominantemente), puede tener una categoría más elevada (derecho de vía tipo A). Debe ser sumamente limitada, o inexistente, las partes en la que cuente con un derecho de vía tipo C.
- Tienen que tener una imagen característica, lo que fortalece su identidad.
- Uso de los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS).
- Acceso a nivel, de los usuarios al vehículo. Puede ser con estaciones elevadas o con vehículos de baja plataforma.
- Servicios frecuentes y con mayor confiabilidad.
- Cobro de la tarifa de viaje antes del abordaje.
- Vehículos de ruedas de caucho. La mayoría cuenta con motores de combustión interna, aunque existen en el mercado vehículos híbridos.
- Estaciones bien ubicadas, con una protección suficiente e información clara para los usuarios.

Estas características clarifican las mejoras con las que cuenta este sistema, pudiendo diferenciar de una mejorar manera los tres tipos de sistemas de autobús existente.

Para poder ser considerado un sistema BRT tiene que cumplir con todas las características antes mencionadas, ya que se ha recurrido a hacer una subclasiificación del sistema (Institute for Transportation Development Policy [ITDP], 2010), organizándolos de menor a mayor calidad, considerando autobuses que no cuentan algunas características. Esto genera confusión y una menospreciación de la imagen del sistema de transporte.

Con la información anterior podemos distinguir a los BRT como sistemas de transporte con características tecnológicas y operacionales superiores a los autobuses convencionales, que les permiten tener un mejor desempeño y nivel de servicio a un autobús convencional.

4.1.3 Características tecnológicas y operativas

La infraestructura comprende a los elementos físicos que dan forma al sistema y que permiten su funcionamiento, se compone principalmente de los siguientes elementos:

Vía: Es el espacio físico por el cual transitara el autobús y el cual debe de contar con ciertas especificaciones para asegurar su correcto funcionamiento y seguridad. Los autobuses de los BRT siempre transitaran en la calle con un carril especialmente proporcionado y separado del tránsito mixto (derecho de vía tipo B).

El trato preferencial que se le da a la vía es para obtener los siguientes beneficios: incremento de velocidad, confiabilidad, mejora en la imagen del sistema, reducción de costos operativos, mejora de la seguridad ante accidentes y un decrecimiento en la congestión en calles con múltiples carriles.

A continuación, se muestran las medidas geométricas recomendadas para asegurar el funcionamiento de una vía de autobús de tránsito rápido:

Tabla 4 Medidas Geométricas recomendadas en vías en los sistemas BRT

Elemento geométrico	Medidas recomendadas (Vuchic, 2007)	Medidas recomendadas [Lloyd, W. & Walter, H. (Eds.). (2007)]
Ancho de carril en una vía con un carril en un solo sentido	3.0-3.5 [m]	
Ancho de carriles en el corredor en vías con carriles en dos sentidos	Ancho total (ambos sentidos): 8-18 [m]	Ancho por sentido (por autobús): 3.5 [m]
Radio de curvas en intersecciones con vuelta a la derecha	10 [m]	
Ancho de vía en estaciones	Ancho total por sentido (con adelantamientos en estaciones): 10.0 [m]	Ancho por carril: 3.0 [m] Ancho de estación: 3.0 [m] Ancho total por sentido (sin adelantamientos en estaciones): 6.0 [m] Ancho total por sentido (con adelantamientos en estaciones): 7.0 [m]
Ancho de vía en estaciones escalonadas (tránsito en un sentido y estación con adelantamientos en el otro sentido)	Ancho total (ambos sentidos): 12-15 [m]	Ancho total (ambos sentidos): 8.5 [m]
Pendientes máximas a vencer por el vehículo	Sin nieve y/o hielo: 19% Con nieve y/o hielo: 6%-8%	

Fuente: Elaboración propia; datos obtenidos de Vuchic, Lloyd & Walter. 2017

Las vías que utilizan los sistemas BRT son, principalmente, arterias primarias (corredores que cubren una gran distancia, conectan zonas de gran densidad poblacional y que forman redes logísticas en las ciudades) también pueden ser implementados en arterias secundarias (corredores que cubren distancias más cortas y que sirven para distribuir el flujo vehicular hacia arterias principales), siempre y cuando la demanda lo justifique, los sistemas BRT se implementan principalmente en arterias principales debido a que tienden a tener una gran concentración de centros comerciales y de negocios; por lo tanto, hay una gran concentración de gente demando trasladados [Lloyd, W. & Walter, H. (Eds.). (2007)].

Existen tres tipos de configuración de corredores cuando se tienen vías anchas, las vías anchas son aquellas en las que se pueden implementar dos carriles de BRT para transitar en sentidos opuestos, dos carriles de transito mixto en cada sentido y espacio para transporte urbano no

motorizado, los tres tipos de configuraciones son: estaciones y carriles en el separador central, estaciones en el costado de la vía y carriles múltiples a lo largo del costado del corredor.

- *Estaciones y carriles en el separador central:* Es la configuración más común y más recomendada de vía, se compone de dos carriles centrales para el sistema BRT (con carril extra si se requiere de rebases en el corredor), dos carriles laterales para el tránsito mixto y espacio para transporte urbano no motorizado.



Figura 4 Configuración recomendada de vías para introducción de BRT (Fuente: Guía de Planificación de Sistemas BRT. 2007)

Dentro de esta configuración de vías existe una con funcionamiento comprobado, el sistema trinario de Curitiba, que se compone de carriles de tránsito mixto rápido paralelos, carriles de tránsito mixto lento adyacentes y los carriles del sistema BRT al centro.



Figura 5 Sistema trinario implementado en la ciudad de Curitiba, Brasil. De color rojo los vehículos del sistema BRT, a un costado sus estaciones, a los lados de las estaciones los carriles de tránsito mixto rápido y adyacente a ellos los carriles de tránsito mixto rápido y adyacente a ellos los carriles de tránsito mixto lento (Fuente: Urbanização de Curitiba [URBS]. 2017 [en línea])

- *Estaciones en el costado de la vía:* Las estaciones a los costados son una alternativa común, sobre todo cuando se decide escalonar las estaciones; sin embargo, el colocar el carril en el costado de la vía no es común ni

recomendable. Esta configuración coloca los sistemas BRT en los costados del corredor, dejando en el centro al tránsito mixto.

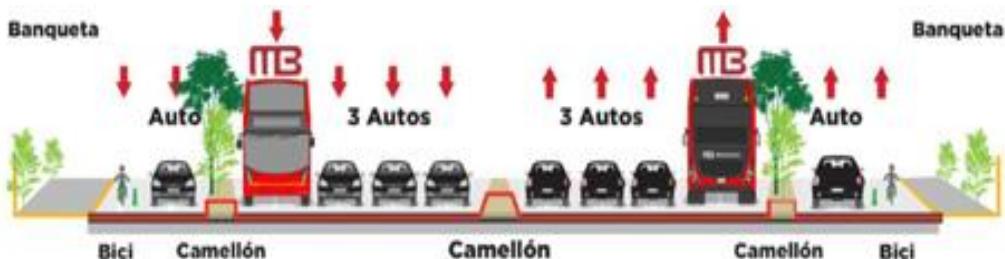


Figura 6 Configuración de vías en los costados en avenida Reforma para el proyecto de la línea siete del Metrobús de la Ciudad de México (Fuente: Metrobús de la Ciudad de México. 2017)

- *Carries múltiples a lo largo del costado del corredor:* Los dos carriles del sistema BRT se ubicaran juntos y a un solo costado del corredor. Se recomienda utilizar cuando los espacios son amplios y sin giros (por ejemplo: zonas de lagos, áreas verdes, oceanos, etc)



Figura 7 Carriles múltiples a un costado del corredor que se utilizaran en calzada Misterios en la línea siete del Metrobús de la Ciudad de México (Fuente: Metrobus de la Ciudad de México. 2017)

Lloyd, W. & Walter, H. (Eds.). (2007) han propuesto en la Guía de planificación de sistemas BRT algunas alternativas cuando se desea introducir el sistema en alguna vía estrecha, considerando una vía estrecha donde solo cabe un carril de tránsito mixto y uno de sistema BRT, o en casos más críticos, donde solo hay un carril que será de uso exclusivo para el sistema BRT.

Las soluciones propuestas son las siguientes:

- Carril exclusivo en el separador central y un solo carril de tránsito mixto: La separación total necesaria es mucho menor, ya que sólo se requiere un ancho total de vía de 14 metros en tramos entre estaciones, en las estaciones se requiere al menos 16.2 metros. Esta configuración está

compuesta por dos carriles, uno destinado al tránsito mixto y uno destinado al sistema BRT. Esta medida propone eliminar la barrera física que separa el carril del BRT, permitiendo invadir que el tránsito mixto invada su carril si hay algún bloqueo o necesiten hacer algún rebase. La forma de distinguir el carril del BRT del resto del tránsito es por medio de pintura. Para que esta configuración funcione correctamente se necesitan de vías que no estén previamente saturadas, que la frecuencia de los vehículos sea constante (ya que así no se tendrá una impresión de ser una vía vacía) y una cultura vial por parte de la población para no invadir el carril del BRT a menos que sea necesario.

- *<<Transit malls>> y corredores exclusivos para transporte público:* Un *transit mall* es un corredor por el cual solo se permite el tránsito de transporte urbano no motorizado y el sistema BRT, este sistema es muy recomendado en el centro de las ciudades o centros comerciales, donde suele haber muchos peatones y una gran demanda de viajes, estas vías suelen ya estar saturadas, y para mejorar la movilidad se cierra el paso a transporte privado. Ya que comparten la misma vía los peatones, ciclistas y sistema BRT, la velocidad con la que operan los vehículos debe de ser mucho más baja, para tener una mayor seguridad, el espaciamiento recomendado es de 7 metros totales en la vía, operando en un solo sentido.
- Rutas divididas: En este sistema se divide la ruta en las partes del corredor donde se tenga una vía pequeña. La ruta ya no será contigua, los vehículos se mandarán por corredores paralelos y en sentidos opuestos.
- Separación a desnivel: Las separaciones a desnivel sirven para liberar intersecciones o corredores muy transitados. Estas separaciones suelen ser aplicables a tramos muy reducidos, si se excede en su uso se puede encarecer demasiado el proyecto. Existen dos tipos de sistemas de infraestructura que se pueden utilizar para separar el BRT: túneles y puentes, la mayoría de las veces se aplican en glorietas, intersecciones congestionadas o zonas de áreas muy densas, como el centro de la ciudad.
- Guías fijas: En algunos casos se puede reducir aún más el ancho de carril, y de estaciones, al incorporar tecnología de guía. Esta tecnología proveerá dirección al autobús, disminuyendo la cantidad de maniobras y permitiendo acortar los carriles, de 3.5 metros a 2.7 metros. Los sistemas de guía pueden ser ruedas en los costados, pequeñas zanjas, sistemas ópticos o sistemas magnéticos.
- Operación en tránsito mixto: La última opción, en caso de no contar con un ancho de vía suficiente, es operar en segmentos del corredor en tránsito mixto. Esto conlleva muchas consecuencias negativas, se baja la categoría

del sistema, se vuelve menos competitivo respecto al transporte privado, pierde su característica modal principal y se degrada la imagen del sistema.

Esta opción es la menos recomendada, y en caso de tener que ser implementada se tiene que hacer en tramos reducidos.

Todos estos tipos de configuraciones (tanto vías anchas como las soluciones propuestas en vías angostas) pueden tener sus vías en dos tipos de operaciones:

Con el flujo: "Los vehículos operan en el mismo sentido del tránsito mixto" (Lloyd, W. & Walter, H. (Eds.). [2007], p. 255)

Contra el flujo: "Los vehículos operan en el sentido opuesto al del tránsito mixto" (Lloyd, W. & Walter, H. (Eds.). [2007], p. 256)

Estaciones: Son paradas establecidas para los vehículos del sistema BRT, en edificios o instalaciones que se encuentran separadas del tránsito mixto, dentro de los cuales se realiza un intercambio de pasajeros (ascenso y descenso del vehículo), para ingresar o salir del sistema.

Las estaciones se componen de tres elementos básicos (Lloyd, W. & Walter, H. [Eds.]. [2007]):

- Plataformas: Es el lugar bien definido en donde los vehículos se detienen para permitir el intercambio de pasajeros. Incluye también el espacio físico en donde los pasajeros esperan las unidades de tránsito. Las plataformas deben de estar al mismo nivel de los vehículos, para facilitar el acceso de los pasajeros, y elevar la eficiencia.

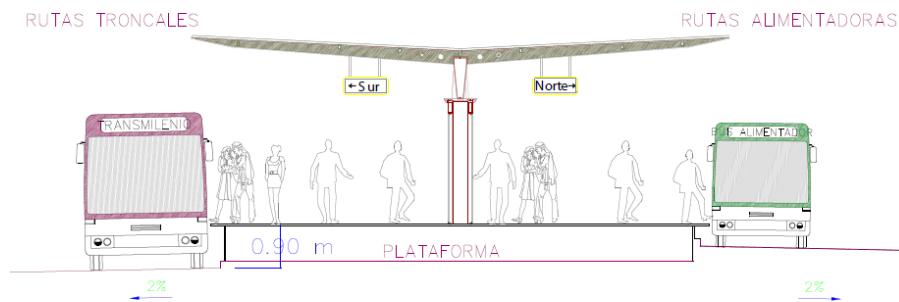


Figura 8 Corte de una estación donde se aprecian las plataformas (Fuente: Guía de Planificación de Sistemas BRT. 2007)

- Área de transición: Área para ampliar el ancho de la vía en la estación, para incrementar de uno a dos carriles, con el fin de tener rebases o múltiples puntos de atraque. Esta área de transición permite un cambio suave, lo que permite a los vehículos realizar maniobras seguras. Debe de ser colocada antes y después de la estación. La longitud del área dependerá de factores como la velocidad de operación y el tipo de vehículos, Lloyd, W. & Walter, H. (Eds.). (2007) recomiendan, en promedio, una longitud de 70 metros. Solo se utiliza cuando se permitan rebases en las estaciones.

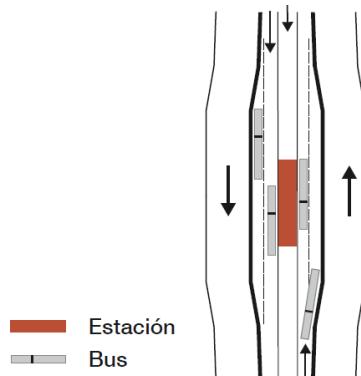


Figura 9 Planta de una estación donde se aprecia el ensanchamiento y el área de transición (Fuente: Guía de Planificación de Sistemas BRT. 2007)

- Infraestructura de integración: Son los espacios que permiten la integración al sistema e interacción con otros modos de transporte.

Las estaciones se pueden clasificar en tres tipos de configuraciones:

- Configuración clásica: La estación se encuentra en el centro del corredor, permite ascensos y descensos en ambos sentidos de la línea. Las puertas de ascenso/descenso se encuentran una frente a la otra. El ancho total recomendado es de 9 metros.

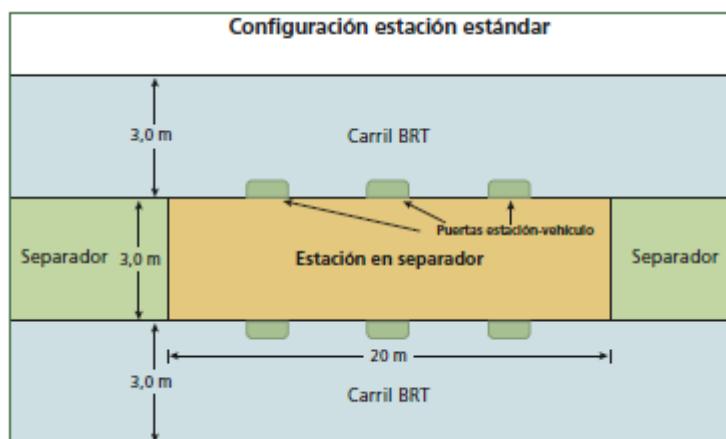


Figura 10 Configuración clásica de estación al centro del corredor con medidas recomendadas (Fuente: Guía de Planificación de Sistemas BRT. 2007)

- Configuración de estaciones escalonadas: Es una opción de reducción del ancho en las estaciones. En esta configuración se divide la demanda, colocando las estaciones en los costados de la vía, permitiendo el ascenso/descenso en un solo sentido. El ahorro de espacio se debe a que solo se debe cubrir la mitad de los viajes. La mayor desventaja es construir los accesos entre estaciones y el costo de estaciones se duplica. El diseño del ancho de estación debe de soportar la demanda de la cantidad de pasajeros que ascienden/descienden en hora pico.

- Configuración de estaciones alargadas: La estación se encuentra al centro del corredor, como en la configuración clásica, la diferencia radica en que las puertas para ascenso/descenso en cada sentido se encuentran separadas; de manera que, si llegan dos autobuses en ambos sentidos al mismo tiempo, la demanda de espacio por los peatones no se concentrara en un solo lugar. De esta manera se reduce la demanda de espacio a lo ancho de la vía, pero se tendrá que alargar la estación longitudinalmente. El diseño del ancho de estación debe de soportar la demanda de la cantidad de pasajeros que ascienden/descienden en hora pico.

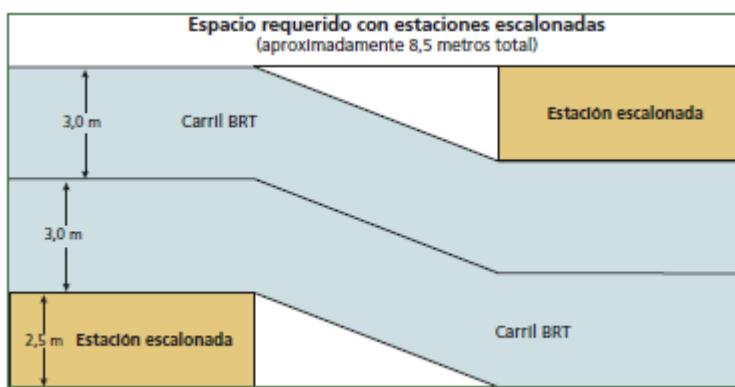


Figura 11 Configuración de estaciones escalonadas con medidas recomendadas (Fuente: Guía de Planificación de Sistemas BRT. 2007)

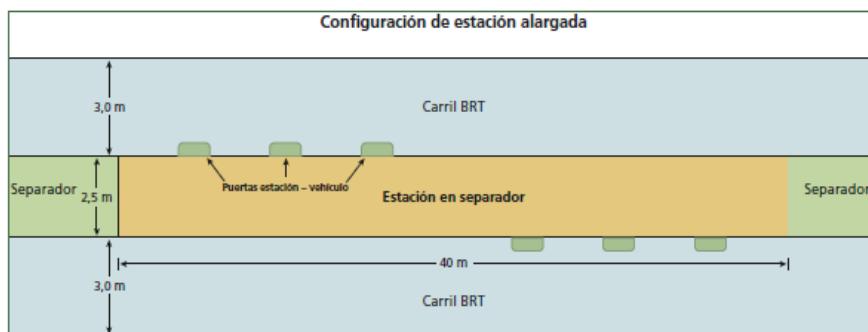


Figura 12 Configuración de estaciones alargadas con medidas recomendadas (Fuente: Guía de Planificación de Sistemas BRT. 2007)

Estaciones de transferencia y Estaciones terminales: Son un tipo de estaciones, con características particulares que la diferencia de una estación común.

Estaciones terminales: Son las últimas estaciones en una línea, generalmente son grandes puntos de transferencia. Muchas veces se utilizan como los puntos en los cuales se conectan rutas alimentadoras con el sistema BRT, este tipo de estaciones debe de estar bien planificadas, ya que se debe revisar la conexión con rutas alimentadoras y otros tipos de modos de transporte.

En estas estaciones es, generalmente, donde realiza el ajuste de operación de los vehículos, para controlar sus frecuencias. Muchas veces debe de contar con una infraestructura que les permita a los vehículos dar vueltas de 180° para poder reincorporarse al sistema.



Figura 13 Proyección de la estación terminal “Indios Verdes” en la ruta 7 del Metrobús de la Ciudad de México
(Fuente: Línea 7 del Metrobús. El Universal [en línea])

Estaciones de intercambio: Son las estaciones en las que se puede realizar una transferencia de pasajeros entre dos líneas del sistema BRT. La forma de hacer este intercambio puede variar, lo más recomendable siempre es llevar la transferencia al pasajero, y no viceversa; sin embargo, muchas veces esto puede resultar muy costoso o ser ineficiente en términos operativos.

Los tipos de intercambios se pueden realizar de tres formas:

- Transferencia de plataforma: El pasajero no se mueve de la plataforma, solo se desplaza una distancia corta hacia el punto de parada correspondiente a la otra línea. Este tipo de intercambio es el más conveniente para los pasajeros, ya que se realiza en un ambiente “cerrado”, seguro y fácil.
- Túneles o puentes peatonales: Este tipo de intercambio asegura que sea en un ambiente “cerrado”, es decir, los pasajeros no tendrán que mezclarse con el tránsito mixto.
- Transferencia abierta: Las estaciones de los diferentes corredores están separadas entre sí, el usuario es el que tiene que realizar el intercambio y para ello tiene que salir al tránsito mixto. Se tiene que planificar el tipo de cobro, ya que si no se piensa cobrar por el transbordo se tiene que invertir en tecnología que permita identificar a los usuarios que están cambiando de rutas.

Patios de almacenamiento y Talleres de mantenimiento: Son lugares específicamente asignados, en los cuales los autobuses ingresarán para recibir mantenimiento mecánico, realizar limpieza de las unidades vehiculares y guardar los autobuses cuando no estén en servicio.

La dimensión de los patios y talleres dependerá de la cantidad de vehículos, el tamaño de la flota, la línea y, sobre todo, el espacio del que se dispone.

“En la mayoría de los casos los patios están adyacentes a las terminales” (Lloyd, W. & Walter, H. (Eds.). [2007], p. 418) La cercanía de los patios con las estaciones terminales es para evitar la mayor cantidad de *kilómetros muertos* (*deadheading*, en inglés), que son la distancia que

recorren los vehículos y que no prestan servicio ni generan ganancias; sin embargo, hay desgaste de sus piezas y de combustibles. A esto se suma que, muchas de las veces, se tienen que incorporar al tránsito mixto para poder acceder a los patios.

Existen dos tipos de patios de almacenamiento: los garajes y los patios abiertos. Los garajes cuentan con instalaciones que los protegen del clima, y del ambiente externo en general. La inversión para un garaje suele ser más cara que un patio abierto en un 30% a 50%. Aunque se deben de cuidar la exposición a climas extremos y un desgaste de los vehículos (Vuchic, V. 2007) Material rodante: Es el material que proporcionará soporte a los vehículos, además del rozamiento que permitirá el desplazamiento. El factor principal para elegir el tipo de material rodante son los vehículos críticos que operaran, aquellos con el peso mayor. Existen dos tipos de material rodante, el concreto hidráulico y el asfalto. La elección dependerá de estudios geotécnicos.

Vehículos: La creación de los sistemas BRT fue producto de un proceso evolutivo, su misión fue mejorar el nivel del servicio de los sistemas convencionales de autobuses, esta evolución implicaba mejoras en los vehículos. No hay un conceso acerca de las características básicas que debe de presentar un vehículo para considerarse propio de un sistema BRT; a continuación, se enlistan algunas de las características más comunes y efectivas de los sistemas BRT (Vuchic, V. 2007):

- Tamaño vehículo: Los vehículos BRT suelen servir a líneas altamente transitadas, por lo que, la mayoría de las veces, operan con vehículos articulados (aproximadamente 18 metros) o vehículos biarticulados (aproximadamente 25 metros); aunque, si la demanda es baja, los vehículos estándar (12 metros) pueden funcionar bien.
- Altura de piso: Actualmente, los sistemas convencionales de autobús rara vez utilizan vehículos de piso alto (*high-floor* en inglés) por las dificultades de alineamiento con las paradas y el abordaje; sin embargo, la mayoría de los sistemas de autobuses BRT utilizan vehículos de piso alto, con la característica de contar con plataformas de piso alto, mejorando el alineamiento y el abordaje (que se realiza a nivel)
- Dirección y guía: La configuración de ejes/dirección depende del tipo de vehículo. Actualmente, la mayoría de los vehículos articulados cuentan con dirección en el primer eje y los demás rígidos, aunque existe también una configuración de dirección en el primer y tercer eje. La mayoría de los vehículos biarticulados cuentan con dirección en el primer y cuarto eje, aunque también existe la configuración de dirección en el primer y tercer eje.

Respecto a la guía, la mayoría de los sistemas BRT cuentan con tecnología de guía en las estaciones, para poder reducir los tiempos de espera en la estación. Los sistemas de guía en las estaciones se pueden clasificar en tres tipos:

Guía humana: Los conductores reducen la velocidad en las estaciones hasta estar alineados las puertas con las plataformas. Es la más lenta y la menos eficiente.

Guía electrónica: Un cable bajo tierra guía a los autobuses al llegar a las estaciones, cuando el vehículo sale de las estaciones los conductores retoman el control del vehículo.

Guía óptica: Se colocan ayudas visuales en el pavimento para que el vehículo pueda escanearlas y detectarlas, proporcionando una parada precisa.

Guía tipo O-Bahn: Requiere de infraestructura física especial, semejante a la utilizada por los vehículos O-Bahn en Alemania.

- Puertas, asientos y capacidad: Los sistemas BRT utilizan la tecnología mejorada de los sistemas de autobuses de tránsito, las puertas de doble canal de acceso, los vehículos BRT cuentan con dos puertas en vehículos estándar, de tres a cuatro en puertas vehículos articulados y hasta seis puertas en vehículos biarticulados, la cantidad de asientos suele ser la misma cantidad que los servicios de autobuses regulares. En algunas ciudades se suele ampliar los espacios en los asientos, para proporcionar un mayor nivel de servicio.
- Propulsión: Algunas de las mejoras proporcionadas a los vehículos BRT, es la inclusión de motores híbridos o de bajas emisiones. Generalmente son motores de combustión interna que funcionan con combustible de Diesel.
- Estética: Los vehículos de los sistemas BRT deben de contar con un diseño particular, que le permitan tener una imagen única a los usuarios.

A continuación, se presenta una tabla con las características de dos vehículos utilizados en el sistema BRT de la Ciudad de México:

Tabla 5 Características físicas de dos vehículos BRT

Característica	Modelo Volvo 7300 <i>BRT Articulado</i>	Modelo Volvo 7300 BRT <i>Biarticulado</i>	Modelo DINA Brighter
Largo	18 metros	25 metros	18.15 metros
Alto	3.81 metros	3.81 metros	3.77 metros
Motor	Volvo DH12E EEV Potencia 340 hp	Volvo DH12E EEV Potencia 340 hp	Cummins ISM 18 Lts. Potencia 380 hp
Combustible	Diesel Dos tanques de 300 Lts. Cada uno	Diesel Dos tanques de 300 Lts. Cada uno	Diesel Dos tanques de 210 Lts. Cada uno
Capacidad	160 pasajeros	240 pasajeros	160 pasajeros

Fuente: Elaboración propia; datos obtenidos de fichas técnicas de Volvo y Dina. 2017

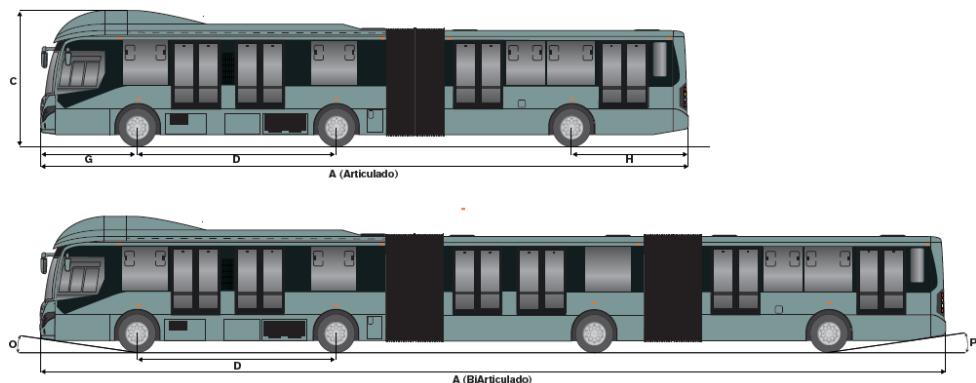


Figura 14 Vehículos Volvo 7300 BRT (Fuente: Ficha técnica Volvo Buses México)

4.1.4 Sistema de transporte de autobuses de tránsito rápido en el mundo

A partir de la creación del sistema de transporte de autobuses de tránsito rápido, (en Curitiba, Brasil) comenzó un proceso de expansión lenta de estas mejoras tecnológicas. Fue a partir de la creación del sistema BRT en la ciudad de Bogotá, Colombia (*Transmilenio*) en el año 2000 cuando comenzó una expansión acelerada de este sistema alrededor del mundo, ganando mucha popularidad y apoyo de ciertos sectores. Esa expansión se ha detenido en los últimos años, siendo cada vez menor la creación de corredores y estaciones.

A continuación, se mostrarán datos del panorama actual del BRT en el mundo, obtenidos de la *Global BRTData* (BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR)

Tabla 6 Características de los BRT en el Mundo

Continente	Países	Ciudades	Corredores	Pasajeros/Día	Longitud
Norteamérica	2	29	53	1'025,179	943 km
Suramérica	13	68	218	21'421,049	1,926 km
Asia	11	42	82	9'293,372	1,515 km
Europa	14	59	74	2'026,847	998 km
África	3	4	5	422,000	104 km
Oceanía	2	4	8	436,200	96 km

Fuente: Elaboración propia; datos obtenidos de BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR. Global BRT Data. 2017

La tabla muestra la fuerte presencia del sistema BRT en Suramérica, con la mayor cantidad de pasajeros y kilómetros de corredor; contrastante con los países de Norteamérica y Europa, donde la cantidad pasajeros/día es menos del 10% de la cantidad en Suramérica.

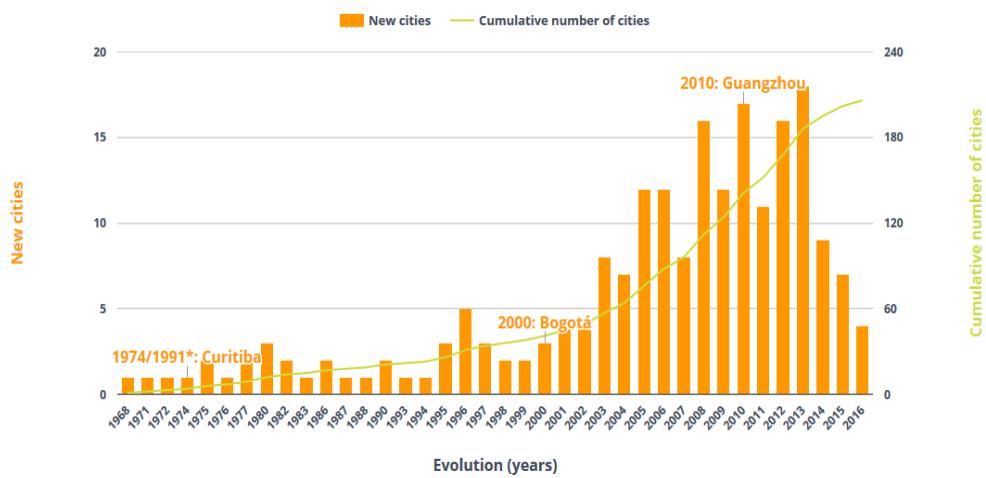


Figura 15 Incremento de ciudades con sistemas BRT.

En color naranja muestra las nuevas ciudades que adoptaron la tecnología BRT en ese año, en color verde se muestra el valor acumulado (Fuente: BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR. Global BRTData)

La figura 21 muestra la cantidad de pasajeros por hora por sentido en las ciudades con sistemas BRT. Se presenta la suma total de todas sus líneas.

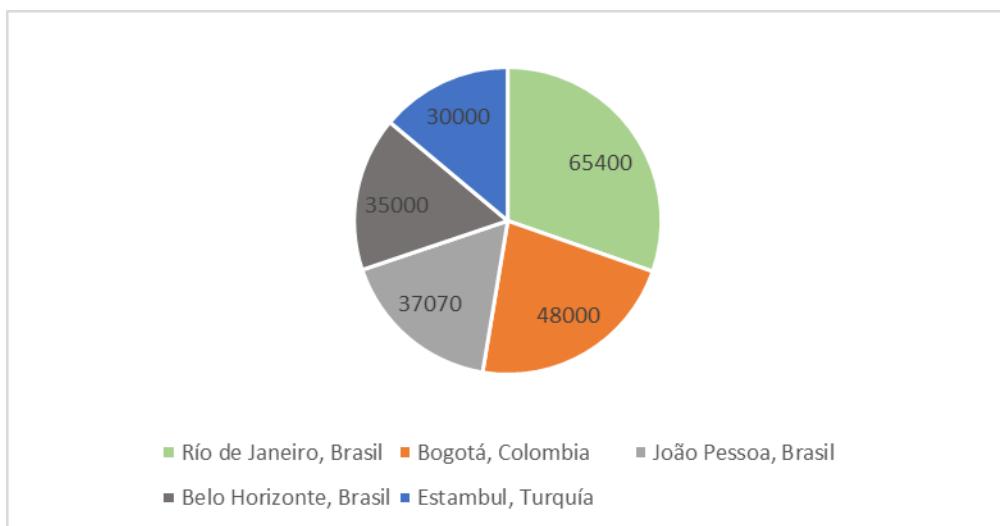


Figura 16 Pasajeros por hora por sentido en las ciudades con BRT (Datos obtenidos de: BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR. Global BRTData)

La figura 22 muestra la cantidad de pasajeros al día que utilizan las diferentes líneas de BRT en sus respectivas ciudades.

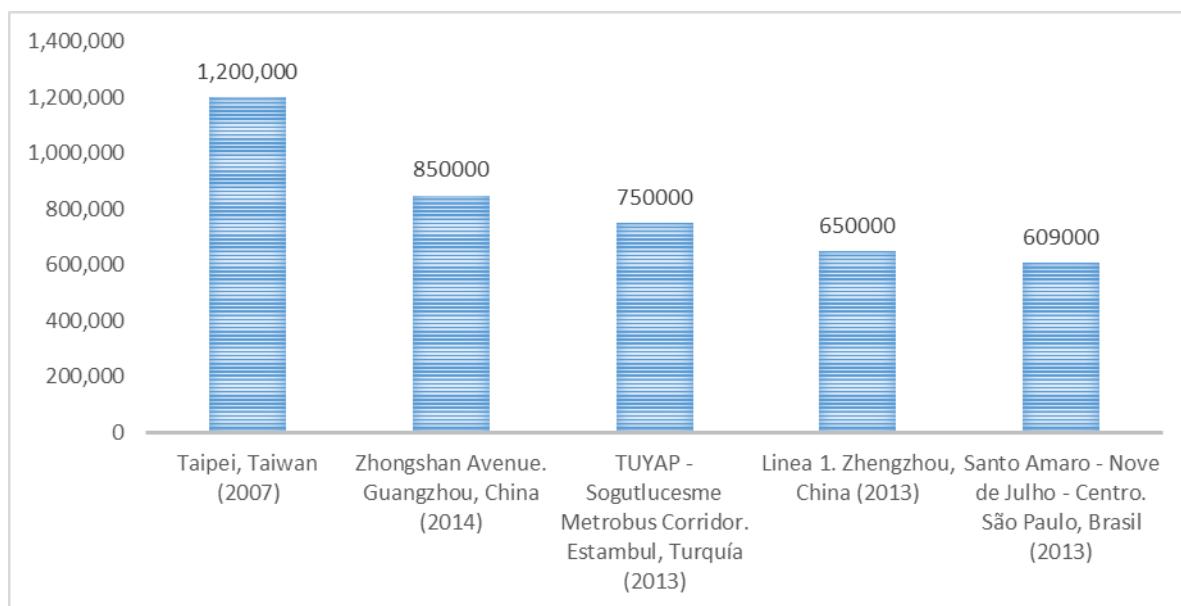


Figura 17 Pasajeros por día en el mundo en líneas BRT (Datos obtenidos de: BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR. Global BRTData)

La figura 23 muestra las ciudades con la mayor cantidad de corredores BRT.

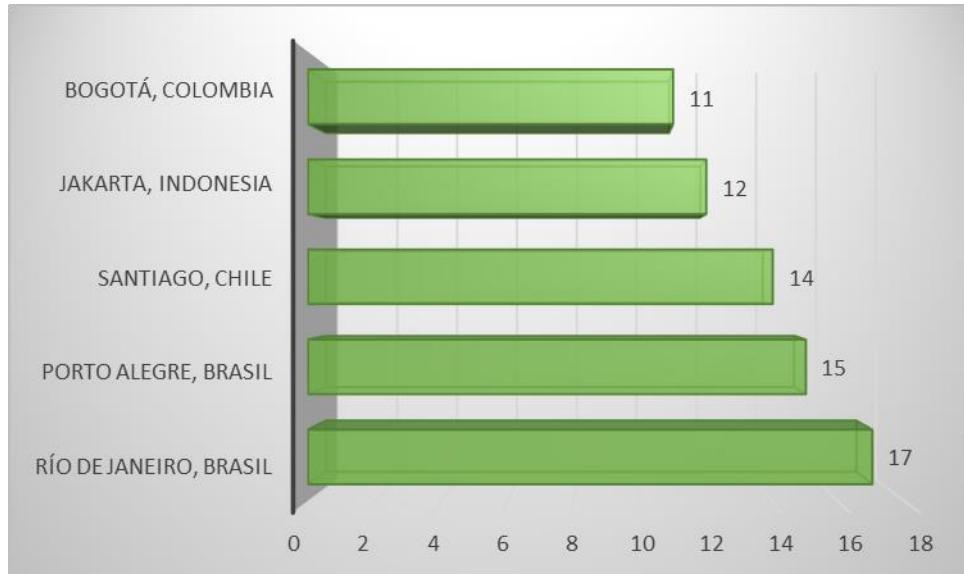


Figura 18 Cantidad de corredores de BRT por ciudad (Datos obtenidos de: BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR. Global BRTData)

El último gráfico (Fig. 3.17) muestra las ciudades con una mayor longitud total de corredores (en kilómetros) de sistemas BRT.

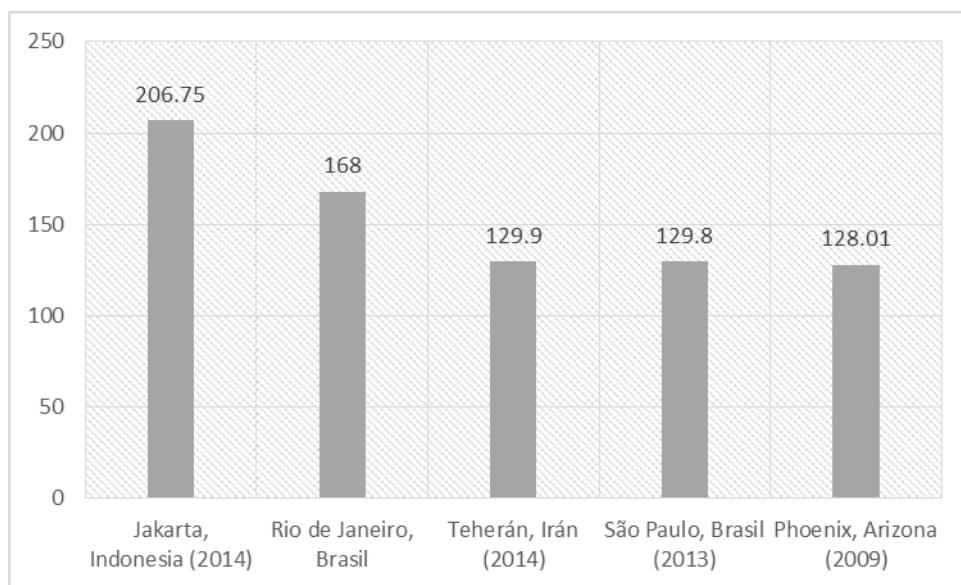


Figura 19 Longitud, de sistemas BRT en el mundo, total de los corredores (en kilómetros) en las diferentes ciudades (Datos obtenidos de: BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR. Global BRTData)

4.1.5 Autobuses de transito rápido en México

El primer sistema de transporte BRT llegó a México casi treinta años después de la creación del primer sistema, en Brasil (Curitiba), y tan solo tres años después de la creación del sistema *Transmilenio* de Bogotá. El primer sistema, *Optibus* de León, Guanajuato, contó con una inversión total de 450 millones de pesos mexicanos, para la construcción de los 26 kilómetros y sus 51 estaciones; sin embargo, el proyecto de mayor relevancia de México llegó dos años después, con la creación del *Metrobús* de la Ciudad de México. Siendo desde entonces el sistema más desarrollado del país, al que más usuarios atiende y el que cuenta con la mayor cantidad de corredores. A partir de la creación del *Metrobús* los sistemas BRT cobraron una mayor relevancia. Actualmente, según datos de la *Global BRTData* (BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR) México cuenta con 19 corredores en el país, atiende a 2 millones 512 mil 204 pasajeros al día y cuenta con una longitud total de 379 km. En América Latina, es el tercer con la mayor cantidad de pasajeros al día, el segundo país con la mayor cantidad de corredores y también el segundo con la mayor cantidad kilómetros construidos.

Tabla 7 Sistemas BRT en México

Nombre del sistema	Año de inauguración (Primera línea)
Acabus (Acapulco)	2016
Vivebús (Chihuahua)	2013
Macrobús (Guadalajara)	2009
Vivebús (Ciudad Juárez)	2013

<i>Optibús (León)</i>	2003
<i>Metrobus (Ciudad de México)</i>	2005
<i>Mexibus (Zona Metropolitana del Valle de México)</i>	2010
<i>Eco Vía (Monterrey)</i>	2014
<i>Tuzobús (Pachuca)</i>	2015
<i>RUTA (Puebla)</i>	2013

Fuente: *Elaboración propia. 2017*

Los siguientes gráficos muestran una comparativa entre los diferentes tipos de sistemas BRT que operan actualmente en el país (al año 2017) Los valores fueron obtenidos de la Global *BRTData* (BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR)



Figura 20 Pasajeros por día en los diferentes sistemas BRT que operan en México (Datos obtenidos de: BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR. Global BRTData)

Como se puede apreciar en los gráficos, el sistema de Metrobús, es el líder nacional de los sistemas, con una amplia ventaja. Esto no es casualidad, en la Ciudad de México la expansión de líneas de BRT ha cobrado una gran relevancia, en tan sólo 11 años se han construido seis líneas de Metrobús, y actualmente, se encuentra en construcción una séptima línea.

La popularidad adquirida por este sistema en la capital del país fue replicada por otras ciudades del país. Como se menciona en el *Ranking Nacional de los Sistemas BRT* (Zamudio y Alvarado,

2005 p.30) para el 2015 el Fondo Nacional de Infraestructura tenía presupuesto asignado para 25 proyectos de BRT en el país.

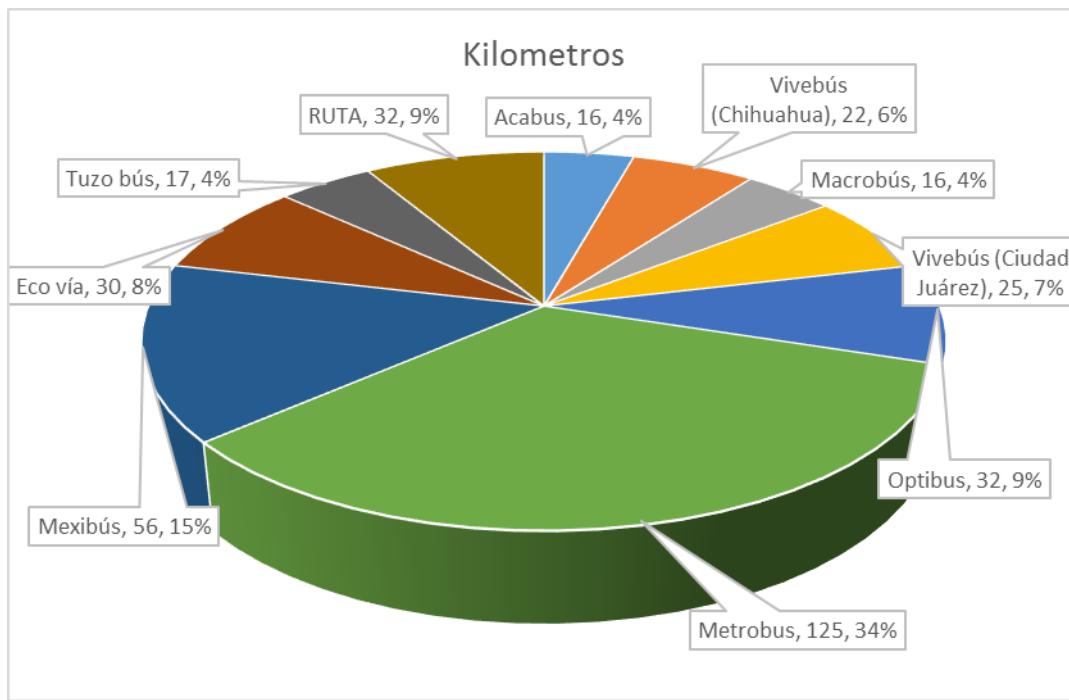


Figura 21 Cantidad de kilómetros construidos para los diferentes sistemas BRT que operan en México (Datos obtenidos de: BRT Centre of Excellence, EMBARQ, IEA y SIBR. Global BRTData)

Los proyectos de BRT en México siguen incrementando, con la creación de, por ejemplo, la línea de BRT en Torreón, Coahuila o la planeación de proyectos en ciudades como Xalapa o Cancún (el cual fue rechazado por la actual administración)

En México el *Institute for Transportation Development* (ITDP, por sus siglas) es uno de los principales promotores del sistema. En el 2014 presentó un plan para la construcción de 29 líneas de BRT (*Transporte Público Masivo en la Zona del Valle Metropolitano del Valle de México. Proyecciones de demanda y soluciones al 2024*), sumando unos 500 kilómetros aproximadamente a la red actual de Metrobús y Mexibus, con lo cual estiman beneficiar a más de 7.5 millones de pasajeros al día.

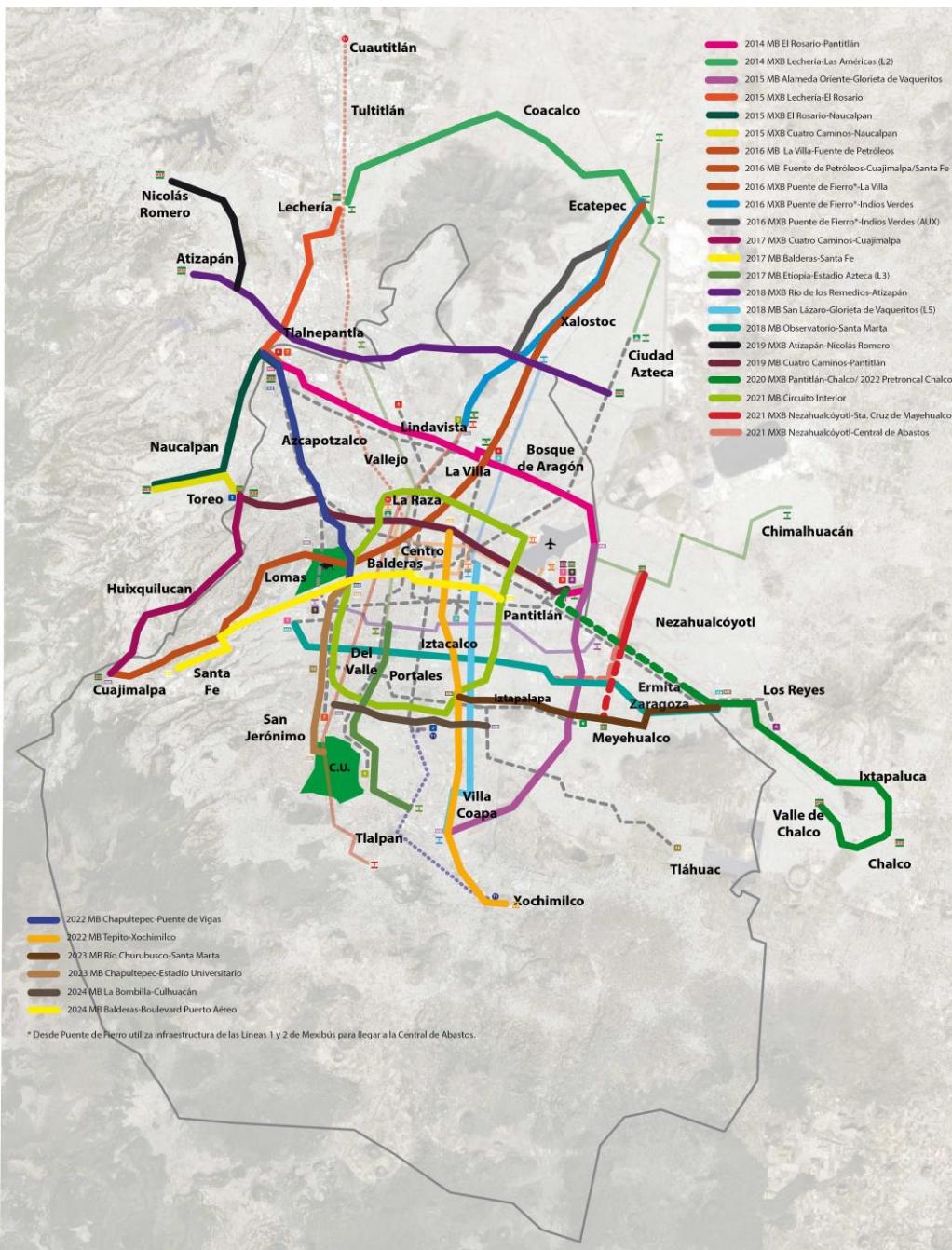


Figura 22 Mapa de las 29 líneas propuestas de BRT para su construcción en la Ciudad de México (Fuente: Transporte Público Masivo en la Zona del Valle Metropolitano del Valle de México. Proyecciones de demanda y soluciones al 2024. ITDP, 2014)

Esto convertiría a los sistemas BRT como la red principal de transporte urbano en el país, lo cual puede ser contraproducente, como lo sucedido en Bogotá, Colombia.

En el Diario de Chile *Tercera Razón*, el actual concejal del Concejo de Bogotá (Manuel Sarmiento) afirma que el sistema “fracasó dadas las limitaciones de los sistemas BRT en variables como capacidad y velocidad [...]” (Aguayo, Miranda y Fernández, 2017)

Estos problemas de saturación también los presentan los BRT en México, ya que la mayoría de los sistemas presenta bajos niveles de servicio y colapsos en horas pico (Zamudio y Alvarado, 2005 p.3)

En el 2014 el sistema de BRT en la Zona Metropolitana del Valle de México representaba el 5% de la contribución de los viajes de la población (Navarro y Licea, 2014)

4.1.5 Línea 1 del Metrobús

En el año 2000 la movilidad generaba una preocupación general; ya que, de no tomarse en cuenta, podría resultar en demasiados problemas en la década siguiente; es por eso que se empezaron a tomar medidas, y a desarrollar nuevas soluciones de transporte.

Una de las primeras fue la creación de corredores viales, implementando un nuevo sistema de transporte, el BRT. Esta solución planeaba mejorar la movilidad en una de las avenidas más importantes de la ciudad, la avenida de los Insurgentes. La cual estaba siendo operada por camiones de baja capacidad y con muy bajos niveles de servicio.

Esta solución ganó mucha popularidad y mejoró el servicio del transporte público en la avenida; generando un nuevo campo de oportunidad para los sistemas de transporte; sin embargo, la cantidad de pasajeros que generó fue tal que, en muy poco tiempo, ya se había alcanzado niveles de saturación.

Actualmente la línea 1 del Metrobús es la línea más grande del sistema, y del país, y sigue siendo una referencia para los sistemas BRT, aun con los problemas de saturación que ha enfrentado.

4.1.6 Antecedentes

En el año 2000 la situación de movilidad en la Ciudad de México alcanzó un punto crítico, tan solo el 24% de los viajes se realizaban en modos de transporte de alta capacidad, y tan solo los minibuses y combis realizaban el 54% de los viajes totales de la Zona Metropolitana del Valle de México (*Programa Integral del Transporte y Vialidad 2007-2012. Primera Parte*, 2010) Esta situación llevó a tomar acciones al gobierno local; por eso, en el año 2002 se publicó en la *Gaceta Oficial de la Federación No. 146* el *Programa Integral de Transporte y Vialidad 2001-2006*. En este documento se planeaba mejorar la movilidad de los habitantes de la Ciudad de México, con un transporte más eficiente, seguro y menos contaminante. El proceso sería a través de realizar un diagnóstico, y a partir de ahí, realizar las medidas necesarias para poder cumplir el objetivo. Una de las medidas más importantes, en el apartado de Infraestructura Vial, fue la *Construcción de los Corredores Estratégicos de Transporte Público*. Su objetivo era simple, mejorar la movilidad y el transporte público en los corredores más importantes, en ese momento, de la Ciudad de México.

En este documento los presenta de la siguiente manera: “Los corredores de transporte consisten en la construcción de carriles confinados exclusivos para autobuses que operen con reglas específicas para su uso, con una programación y control de servicio adecuados al comportamiento y horario de la demanda, y con el equipamiento necesario (coordinación de semáforos y señalización) para asegurar su operación eficiente. Para su operación se requiere, además, de la construcción de estaciones de transferencia en los extremos del corredor y de paradas en puntos seleccionados de la vialidad” (Gaceta Oficial del Distrito Federal No. 146, 2002, p. 44) Como se puede apreciar en la definición, la idea de los corredores de transporte claramente apuntaba a la implementación de sistemas BRT en las avenidas más saturadas de la ciudad.

Este proyecto contaba con el apoyo financiero de Fondo Global para el Medio Ambiente (GEF), el Banco Mundial y la Fundación Shell. Estos recursos estaban destinados a un programa piloto para el año 2002 y estudios de un proyecto ejecutivo para el año 2003.

Dos años después, en el 2004, el corredor de transporte público en Insurgentes empezó a tomar forma, el primer paso fue la publicación, en abril, del documento *Diseño conceptual, funcional, operacional y proyecto ejecutivo del corredor estratégico Insurgentes* elaborado por la Secretaría del Medio Ambiente. Este documento integraba en un solo proyecto las estrategias de operación y los elementos referentes a la construcción del corredor.

En septiembre ese mismo año, se oficializaron los corredores de transporte público. A través de un comunicado en la gaceta del Distrito Federal, se aprobaba el establecimiento de estos nuevos corredores. La publicación contaba con solo cuatro artículos, de los cuales destacan el segundo, el cual retoma la definición de corredor de transporte público del Programa Integral de Transporte y Vialidad 2001-2006, y el artículo tercero, el cual indica que la Secretaría de Transportes y Vialidades determinará las vialidades que operaran bajo este esquema, previo estudio técnico (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 98-BIS, 2004)

El siguiente paso del gobierno fue publicar la aprobación del establecimiento del corredor de transporte público “Metrobús” Insurgentes con la Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 101, 2004. Esta publicación contaba con tres artículos, los cuales se resumen de la siguiente manera:

1. Aprobación del Corredor de Transporte Público de Pasajeros “Metrobús” Insurgentes.
2. Aprobación en el tramo en la Avenida Insurgentes comprendido entre Indios Verdes y la intersección con el Eje 10 Sur. Una longitud aproximada de 19.4 kilómetros. Se confinaría el carril izquierdo en ambos sentidos para uso exclusivo del transporte público.
3. La Secretaría de Transportes y Vialidad sería la que otorgaría la autorización del corredor, con una previa Declaratoria de Necesidad.

El primer documento técnico que se publicó acerca de los corredores estratégicos de transporte, publicado 26 de septiembre del 2002, fue el *Documento de Evaluación del Proyecto de una Cantidad Propuesta por el Fondo Global para el Medio Ambiente por la Cantidad de 4.4 Millones*

de Derechos Especiales de Giro (Equivalente a 5.80 Millones de Dólares Estadounidenses) al Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C. y los Estados Unidos Mexicanos para la Introducción de Medidas Amigables de Transporte (Banco Mundial, Reporte No. 24871-ME, 2002) En este documento se desglosan las cantidades monetarias que se proporcionarían para la implementación del proyecto de reducción de emisiones, las cuales se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8 Cantidad financiada para el proyecto introducción de medidas ambientales amigables

Institución	Cantidad financiada (Millones USD)	Cantidad financiada (Millones de Pesos)*
Banco Nacional de Obras y Servicio Públicos S.N.C (Prestador/Receptor)	2.40	24
Fondo Global para el Medio Ambiente	5.80	58
Fuentes locales de préstamo del país (Empresas manufactureras de autobuses y empresas proveedoras de combustibles)	3.00	30
Fundación Shell	1.00	10
TOTAL	12.20	122

Fuente: Elaboración propia. 2017

*Tipo de cambio propuesto por el Fondo Global para el Medio Ambiente (Banco Mundial, Reporte No. 24871-ME, 2002)

Un detalle importante es que todos los estudios técnicos se realizaron en favor de los corredores estratégicos de transporte; es decir, no se realizaron estudios que compararan distintas alternativas de transporte.

El siguiente documento técnico de relevancia se presentó en la Gaceta Oficial del Distrito Federal, No.103, publicada el 6 de octubre del 2004; después de haber sido aprobado el corredor de transporte “Metrobús” Insurgentes, este documento presenta la concepción de los corredores estratégicos de transporte como “un proyecto urbano integral que generará un conjunto de soluciones viales locales que, sin perder el enfoque metropolitano, permitan un incremento en la densidad y habitabilidad de los corredores viales y la zona de influencia; que favorezca el uso eficiente de la energía y por ende la disminución de contaminantes de la zona” (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 103, 2004, p. 17)

También se menciona en este documento se menciona el *Proyecto Introducción de Medidas Ambientales Amigables*, realizado de manera conjunta por la Secretaría de Transportes y Vialidad y la Secretaría del Medio Ambiente. Fue el documento financiado mencionado con anterioridad y que sirvió de “diagnóstico integral de los aspectos sustantivos para el diseño y la implementación de los corredores estratégicos” (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 103, 2004, p. 17) Este documento contenía los aspectos legal-jurídicos, económico-financieros y técnicos, y sirvió como la base para desarrollar los corredores estratégicos de transporte.

Aquí es donde se presentan las diferentes opciones que se analizaron para implementar el primer corredor, mismos que presentaban “características particulares de oferta y demanda” y que además requerirían bajas inversiones en infraestructura. Los corredores que se habían seleccionado fueron: Avenida Insurgentes, Eje 8 Sur, Canal de Miramontes, Eje Central y Miguel Ángel de Quevedo, de estos cinco corredores se eligieron dos, en los cuales sería más favorable implementar el proyecto, los cuales fueron: Avenida de los Insurgentes y el Eje 8 Sur. La vialidad elegida funcionaría como un corredor piloto. Finalmente se eligió la Avenida de los Insurgentes, en el tramo comprendido entre Indios Verdes y la zona que se conocía como “El Relox”.

Sin embargo, lo más relevante de esta publicación, de la Gaceta del Distrito Federal, fue el *Aviso por el que se da a conocer el estudio que contiene el balance entre la Oferta y la Demanda de Transporte Público Colectivo de Pasajeros en la Avenida de los Insurgentes del Distrito Federal*. En esta parte del documento se presentaba el resultado del estudio técnico que contenía el balance entre la oferta y la demanda de transporte colectivo, con el que contaba la vialidad. Se presentaba a la Avenida de los Insurgentes como una vialidad que contaba con un sistema de transporte urbano inadecuado, en virtud del volumen de demanda que atendía. Para mejorar esto proponían una reforma global en el sistema de transporte urbano la cual incluiría: desestímulo y racionalización del uso del automóvil, mejora en la calidad del transporte público, ampliación de las rutas de transporte público, ordenamiento de la vialidad urbana y priorizar la circulación del transporte público (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 103, 2004, p. 17)

El transporte público urbano en la Avenida de los Insurgentes se realizaba, principalmente (atendían el 98.55% de la demanda), a través de la *Red de Transporte de Pasajeros* (RTP, por sus siglas), un Organismo Público Descentralizado; y por una concesión de transporte colectivo, conocida como *Rutas*, operando primordialmente la conocida como *Ruta 2*. Siendo estos los que se estudiaron para obtener el balance.

Las rutas principales de los dos prestadores de servicios eran las siguientes:

- Ruta 2: Indios Verdes-San Ángel
- RTP:
 - Indios Verdes-Glorieta de los Insurgentes/Chilpancingo/Villa Olímpica/Huipulco
 - Reclusorio Norte-Chilpancingo
 - Glorieta de los Insurgentes-San Pedro Mártir

La flota vehicular operaba con combustibles convencionales, sin ninguna tecnología amigable con el ambiente; es decir, Gas LP, gasolina, diésel. La flota vehicular total era de 350 unidades, de las cuales 90 pertenecían a RTP y 260 a Ruta 2. La edad promedio de los vehículos RTP era de 8.3 años. Mientras que, un 67% de los vehículos de la Ruta 2 tenía entre 6 y 9 años de antigüedad.

Las capacidades de los vehículos eran las siguientes:

- Autobús convencional: 90 pasajeros/vehículo

- Autobús articulado: 170 pasajeros/vehículo
- Microbús: 40 pasajeros/vehículo

De manera conjunta (Ruta 2 y RTP), el valor de la demanda se presentaba de la siguiente manera:

Tabla 9 Valores característicos de la operación conjunta RTP-RUTA 2

Característica	Valor en sentido	Valor en sentido Sur-	Valor total
	Norte-Sur	Norte	
Viajes de pasajeros	128,100	122,800	250,900
Carga máxima	44,400	35,200	75,700
Índice de renovación	2.89	3.49	3.33
Carga máxima horaria	5,512 pasajeros (de 07:00 a 08:00 horas)	3,497 pasajeros (de 15:00 a 16:00 horas)	6,382 pasajeros (de 07:00 a 08:00 horas)
Ocupación máxima	59.5% (07:00 horas)	45% (16:00 horas)	41.5% (07:00 horas)
Ocupación mínima	23.8% (19:00 horas)	21% (07:00 horas)	26.5% (10:00 horas)

Fuente: Elaboración propia. 2017

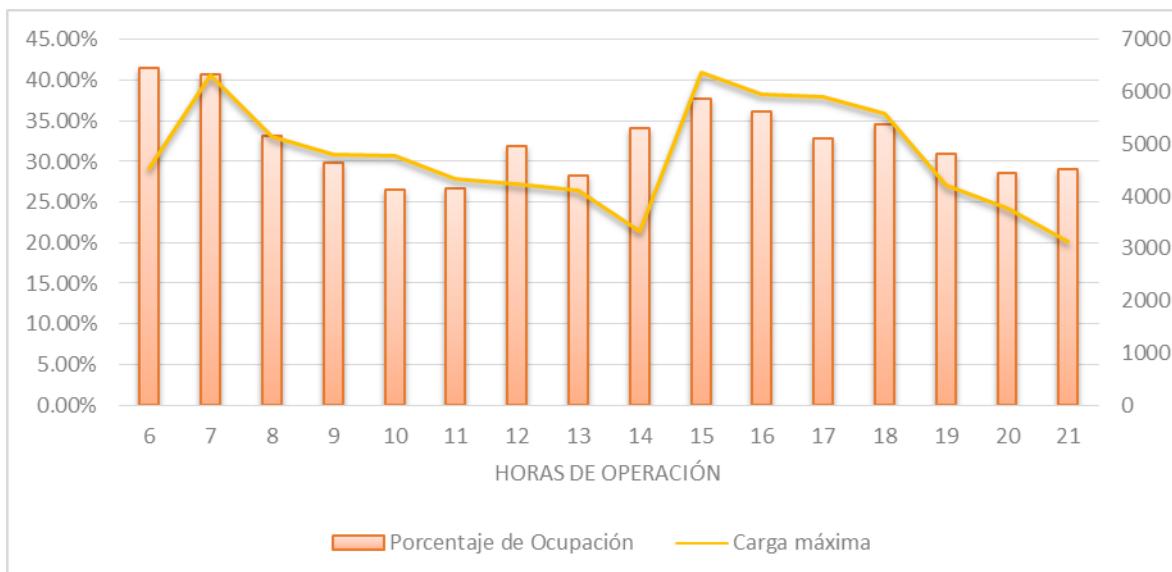


Figura 23 Distribución horaria del porcentaje de ocupación de los vehículos (barras) y distribución horaria de la carga máxima de pasajeros en los vehículos (línea continua) (Elaboración propia. Datos: Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 103, 2004)

Los estudios concluyeron que, “el transporte público que da servicio en la Avenida de los Insurgentes requiere modificar su equipamiento, esquema de operación, para mejorar las condiciones de calidad del servicio y la economía de los concesionarios. También requiere de una modernización tecnológica de la flota para lograr una mayor eficiencia energética. De igual

manera requiere una adecuación general de la infraestructura de la Avenida de los Insurgentes, para lograr una circulación más fluida de los vehículos" (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 119, 2005, p. 8)

4.1.7 Evolución

El corredor, como se conoce hoy en día, fue un proyecto que constó de dos partes, aunque fueron muy cercanas entre sí (tres años de diferencia entre inicios de operaciones) La primera parte fue el proyecto en el que se sustentaba todo el análisis técnico, el corredor de 19.4 kilómetros con terminales en Indios Verdes y Eje 10, respectivamente; posteriormente se decidiría ampliar el proyecto, en una segunda parte, con lo que se completaría el corredor actual, en su longitud total de 30 kilómetros.

Debido a las diferentes partes concesionarias operando en la vialidad, los parámetros operativos fueron diferentes entre ellas.

Sin embargo, para la segunda parte del proyecto (pensada como una ampliación del corredor que operaba), se realizaron una mucho menor cantidad de estudios técnicos, con el sustento de la información ya existente de la primera parte.

La aprobación del corredor "Metrobús" en la avenida de los Insurgentes estaba condicionada a la autorización mediante una declaratoria de necesidad emitida por la Secretaría de Transporte y Vialidad. Por eso, el 12 de noviembre del 2004, se publica la declaratoria de necesidad, haciendo oficial el inicio de construcción y operación del "Metrobús" en Insurgentes.

La "Declaratoria de necesidad para la prestación del servicio público de transporte de pasajeros en el corredor de transporte público de pasajero Metrobús Insurgentes" (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 119, 2004, p. 1) tenía en cuenta los estudios técnicos antes mostrados, en su apartado de consideraciones; además de estos estudios se presentaban los datos relativos al balance entre la oferta y la demanda de la Avenida de los Insurgentes como: 250 900 viajeros diarios y carga máxima de 5512 usuarios. En este documento se señalaba que "el volumen de demanda es insuficiente para un sistema de alta capacidad como son el tren ligero y el metro, que requieren demandas superiores a los 10 mil y 20 viajes por hora" (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 119, 2004, p. 8) En este documento se reitera la categoría de transporte de alta capacidad para el tren ligero. Además, se presentaba la siguiente tabla (Tabla 3.9) con una comparativa entre los diferentes costos de inversión para las tres alternativas de proyectos, la cual estaba en función de los requerimientos de infraestructura, instalaciones y equipamiento.

Tabla 10 Comparativa De Costos De Inversión Entre Las Diferentes Alternativas De Transporte De Pasajeros De La Avenida De Los Insurgentes

Sistema de Transporte	Pesos por Pasajero	Costo total en pesos*
Metro	\$40,000	\$10,036,000,000
Tren Ligero	\$8,500	\$2,132,650,000
Corredor de Transporte de Pasajeros (BRT)	\$1,000	\$250,900,000

Fuente: Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 119, 2004. Elaboración propia. 2017

*Valor obtenido a partir de los 250,900 viajeros diarios.

Según los datos presentados, el costo de inversión para un proyecto de metro sería 40 veces más caro que el de BRT, y 8.5 veces más caro para un proyecto de tren ligero.

El costo de inversión y la carga máxima de pasajeros con el sistema de transporte de ese momento, fueron los dos únicos valores por los cuales se decidió que el proyecto de corredor de transporte de pasajeros; es decir, que operara un sistema de transporte BRT, fuera la opción más factible para atender el transporte público en la avenida de los Insurgentes. Además, estos dos valores se consideraron para la operación del nuevo sistema de corredores de transporte; donde la carga máxima y demanda sería la misma que se presentaban.

El proyecto de corredores viales de transporte era una solución que mejoraría el nivel de servicio del transporte en vialidades con gran demanda (200 000 viajes diarios), realizando un confinamiento de carril en la vialidad para el transporte público. Esto se buscaba con un transporte público que requiriera una baja inversión en infraestructura.

Se remplazó la flota existente por autobuses articulados con motores con funcionamiento a base de diésel o gas. Se buscaron vehículos modernos y de bajas emisiones.

Las dimensiones aproximadas fueron de 18 metros de largo, 2.5 metros de ancho y 3.2 metros de alto. La capacidad sería de 160 pasajeros. Sus puertas se colocaron del lado izquierdo (contaban con un total de cuatro) La flota total fue de 80 autobuses, de los cuales el 5% estaría en reserva para reparaciones. Los vehículos deberían contar con motores certificados con las normativas vigentes EPA o EURO (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 119, 2004)

De estos 80 autobuses, 60 serían adquiridos por el concesionario. De los 60 autobuses, al menos 57 autobuses deberían de estar en operación y los 3 restantes cubrirían el mantenimiento y cualquier otra eventualidad. El concesionario también adquirió 17 autobuses convencionales con capacidad de 52 pasajeros, los cuales proporcionarían el servicio nocturno. El organismo público descentralizado RTP adquirió los otros 20 autobuses, de los cuales 19 estaría en operación y 1 en reserva. La vida útil de los autobuses se determinó de 10 años, al término de su vida útil los autobuses tendrían que retirarse definitivamente (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 74, 2005) Se implementaron controles que pudieran monitorear las unidades, para poder vigilar el servicio de las empresas transportistas (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 119, 2004)

Se eliminaron los giros a la izquierda en la vialidad, de manera que no interfiriera el tránsito mixto en la operación del Metrobús. Se trató de eliminar y suprimir el comercio ambulante en las aceras y accesos a las terminales. Se prohibió la circulación y estacionamiento de vehículos de transito mixto en los carriles de Metrobús, sitios, bases, lanzaderas y paradas temporales (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 35-BIS, 2005)

Las operaciones en horario diurno se realizarían de 05:00 horas a 23:00 horas. La demanda máxima que se estimo fue de 250,900 viajes al día, la carga máxima de 5,512 viajes por sentido. La velocidad de operación planeada era de 21.2 km/h, de esta manera los viajes se realizarían en 34.3 minutos (64.6 minutos el ciclo total) El intervalo de paso en las horas de mayor demanda era de 2 minutos (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 119, 2004) Se contaba con tres rutas de operación: Dr. Gálvez-Indios Verdes, Indios Verdes-Dr. Gálvez e Indios Verdes-Glorieta de los Insurgentes (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 74, 2005)

La longitud total del corredor fue de 19.4 kilómetros, a lo largo de la Avenida de los Insurgentes, de Indios Verdes a Eje 10 Sur. Se confinaron los carriles centrales de la Avenida, los cuales fueron para uso exclusivo de los vehículos del corredor.

Las estaciones tienen una separación promedio de entre 400 y 500 metros. Y están colocadas a una altura de un metro, para poder realizar los ascensos/descensos a nivel.

El corredor estaba conectado solamente con el sistema de transporte metro en:

- Indios Verdes (línea 3)
- La Raza (línea 3 y línea 5)
- Buenavista (línea B)
- Revolución (línea 2)
- Glorieta de los Insurgentes (línea 1)
- Chilpancingo (línea 9)

Las estaciones contaban con accesos adecuados para las personas con capacidades diferentes, tanto en autobuses como en estaciones (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 119, 2004)

De las 36 estaciones diseñadas, las terminales fueron Centro de Transferencia Modal Indios Verdes (ubicada al norte), Dr. Gálvez (ubicada en la intersección con Eje 10) y una terminal intermedia en la Glorieta de los Insurgentes. Además de las bases, se colocaron dos lanzaderas de autobuses. La primera está ubicada en la Calle de Oaxaca, y cuenta con seis espacios para autobuses articulados. La segunda está ubicada en la incorporación de San Jerónimo, esta cuenta con espacio para tres autobuses articulados La infraestructura antes mencionada fue provista por el gobierno local; pero, para la adecuada operación, el concesionario tuvo que proveer la siguiente infraestructura: dos patios de encierro, un taller y una estación de abasto de combustibles (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 74, 2005)

El cobro se programó para realizarse por medio de tarjetas inteligentes, las cuales se venderían en las estaciones, con equipos automáticos de peaje y controles de acceso.

La tarifa original de cobro fue de \$3.50 por viaje, en horario diurno, independientemente de la distancia de viaje (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 74, 2005)

La operación del entonces nuevo sistema de transporte estaría a cargo de los previos concesionarios de la Avenida de los Insurgentes (Ruta 2 y RTP); pero esta operación estaba condicionada, los concesionarios se tendrían que adecuar a las nuevas reglas operativas propuestas por la Secretaría de Transportes y Vialidad, a través del nuevo organismo descentralizado "Metrobús". Las reglas, derechos y obligaciones se establecieron en dos contratos:

- Título por el que se otorga la concesión para la prestación del servicio público de transporte de pasajeros en el corredor de transporte público de pasajeros "Metrobús" Insurgentes.
- Autorización para la prestación del servicio público de transporte de pasajeros en el corredor que transporte público de pasajeros "Metrobús" Insurgentes.

En el primero se le entregaría, a un privado, la concesión para la operación del Metrobús Insurgentes. En el segundo se autorizaría que el Organismo Público Descentralizado RTP operara también en la Avenida de los Insurgentes.

Ambos contratos de prestación de servicios se publicaron en la Gaceta Oficial del Distrito Federal Número 74 (2005); a continuación, se presenta un resumen por separado las condiciones específicas para cada operador (Ruta 2 y RTP), después se presentan los derechos, obligaciones, caducidad y revocación, que son similares para ambos operadores, finalmente se presenta un resumen de las obligaciones del nuevo organismo descentralizado, "Metrobús".

Los 262 concesionarios, que anteriormente poseían la concesión de la Ruta 2 (Ramal Insurgentes), se tuvieron que reorganizar como una sociedad mercantil, para poder operar el corredor. El 8 de diciembre del 2004, se constituyen como una sociedad anónima de capital variable, la cual se llamó "Corredor Insurgentes, S.A. de C.V." Su primer presidente del consejo administrativo fue Jesús Padilla Zenteno, el cual estaría a cargo por dos años.

El 24 de junio del 2005 se autorizaba al organismo descentralizado la prestación del servicio en el corredor Insurgentes. La autorización también se le otorgó por un periodo de 10 años, el cual se podía prolongar cumpliendo los mismos requisitos que se establecieron para el concesionario.

El 09 de marzo del 2003 (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 29) se crea el organismo descentralizado "Metrobús", el cual se sectorizo a la Secretaría de Transportes y Vialidad.

Este organismo se le asignó la planificación, administración y control de los sistemas de corredores de transporte público de pasajeros.

Desde ese día, y hasta la actualidad, realiza las siguientes operaciones:

- Auxiliar técnicamente a los prestadores de servicios.

- Establecer los criterios de coordinación con las demás entidades administrativas.
- Conservar, vigilar, proyectar, supervisar y mejorar el sistema.
- Fijar las normas de operación.
- Proponer la tarifa del sistema.
- Controlar los recorridos y vehículos del sistema.
- Coordinar la implementación de los sistemas de recaudo.
- Promover el desarrollo tecnológico del sistema.

Después de su aprobación el 12 de noviembre del 2004, el primero corredor de transporte público de pasajeros “Metrobús Insurgentes” inicio su construcción en diciembre del 2005, la cual concluyó en junio del 2005. La primera parte de la línea 1 del Metrobús inicio operaciones el 19 de junio del 2005.

Después de casi dos años de operaciones del primero corredor de transporte público de pasajeros, y debido a un incremento en la demanda en el sistema BRT, la Secretaría de Transportes y Vialidad decide implementar un segundo corredor; el cual, funcionaría como una expansión del primer corredor.

El 06 de julio del 2005, se publica el *Aviso por el que se aprueba el segundo corredor de transporte de pasajeros “Metrobús Insurgentes Sur” y se establecen las condiciones generales de su operación* (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 120, 2007) en el cual, en seis artículos se establecía lo siguiente:

- El segundo corredor se ubicaría en la Avenida de los Insurgentes Sur; en el tramo ubicado entre el Eje 10 Sur y la intersección con el Viaducto-Tlalpan (Monumento al Caminero)
- Para la operación de los corredores, se confinaría el carril izquierdo en ambos sentidos. Solo estaría permitida la circulación de vehículos BRT del sistema, y en su caso, vehículos de emergencia.

Al igual que en la primera parte del corredor, se eliminarían los giros a la izquierda, el comercio ambulante en las aceras o accesos a estaciones y todos los elementos incorporados a la vialidad que no fueran necesarios para la operación.

Para ser autorizado, se tenía que publicar una declaratoria de necesidad, la cual tenía que estar fundamentada en un estudio técnico; por ese motivo, el 14 de septiembre del 2007 se publica el *Aviso por el que se da a conocer el balance entre la oferta y la demanda de transporte público colectivo de pasajeros en el segundo corredor “Metrobús Insurgentes Sur”* (Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 170) A continuación, se presenta un resumen de lo más relevante de este estudio.

Al igual que el balance entre la oferta y la demanda de la primera parte del corredor de Insurgentes, este segundo estudio tenía como base el “Proyecto Introducción de Medidas Ambientales Amigables en Transporte”, financiado por el Banco Mundial.

Este estudio parte de un análisis previo, en el cual se analizaba la prefactibilidad de tres vialidades para la implementación de un corredor de transporte (Eje 5 Sur, Eje 6 Sur y la Avenida de los Insurgentes Sur), en el cual se determinó que la vialidad que mejor se adecuaba para las características del proyecto era la Avenida de los Insurgentes Sur.

Los objetivos específicos de este estudio fueron:

- Determinar el inventario de transporte público de pasajeros que recorre la Avenida de los Insurgentes, el tramo comprendido entre el Eje 10 Sur y el Viaducto Tlalpan (Monumento a El Caminero)
- Cuantificar la oferta y demanda, de ese entonces, de transporte público de pasajeros.
- Determinar el porcentaje de utilización de la cantidad de transporte público de pasajeros ofrecida.

Lo primero fue determinar el transporte que utilizara, aunque fuera parcialmente, la Avenida de los Insurgentes entre su intersección con el Eje 10 Sur y el Viaducto Tlalpan. Se determinó un total de 15 rutas, operadas por el organismo descentralizado RTP y por concesionarios privados a través de rutas, del total de 15 rutas que utilizaban la Avenida de los Insurgentes Sur en sus recorridos, se redujo a 9 rutas representativas, las cuales realizaban una mayor parte de sus traslados en la vialidad.

Al igual que en la primera parte del corredor, los concesionarios privados, asociados a través de las Rutas, no contaban con una planeación con base en la oferta y la demanda. Por otro lado, el organismo descentralizado RTP si contaba con una planificación de operaciones.

El parque vehicular con el que operaban era de dos tipos: Autobuses (con capacidad de 60 pasajeros, propulsados por gasolina) y Microbuses (con capacidad de 40 pasajeros, propulsados por gasolina o gas LP)

La edad de los vehículos de RTP oscilaba entre los 2 y 5 años, de la Ruta 1 y Ruta 76 era de entre 13 y 18 años, los vehículos de la Ruta 111 tenían más de 11 años.

Al día se ofrecían 109,580 plazas. El 79.6% (87,200) se ofrecían por medio de los microbuses, el 20.4% (22,380) restante se ofrecía por medio de autobuses. Las plazas se ofrecían en mayor cantidad en el sentido norte-sur, con un 56.1%

Con base en estos estudios, también se pudo determinar los puntos con mayor cantidad de ascensos y descensos en la vialidad. Se determinó que existen seis puntos que concentraban la mayor cantidad de incorporaciones/desincorporaciones, los cuales eran los siguientes:

- San Ángel
- Periférico
- San Fernando
- Corregidora
- Ayuntamiento
- El Caminero

Al día, la Avenida registraba una demanda de 76,640 usuarios. De los cuales, 40,496 viajes se realizaban en sentido norte-sur, los otros 36,144 se realizaban de sur a norte.

El siguiente gráfico muestra el balance entre la oferta y la demanda del corredor; los valores de oferta se muestran como capacidad dinámica (que es el producto de la oferta de plazas por día y la longitud del recorrido), en unidades de plazas-km/día, los valores de la demanda se muestra como volumen de demanda (que resulta de multiplicar la demanda del corredor y la longitud promedio de recorrido de los pasajeros), sus unidades son viajeros-km/día. Esta comparativa resulta más significativa, ya que permite identificar las variaciones de demanda debida a la longitud solicitada por el viajero; es decir, permite eliminar errores de sobrevalorar la demanda debida a viajes cortos.

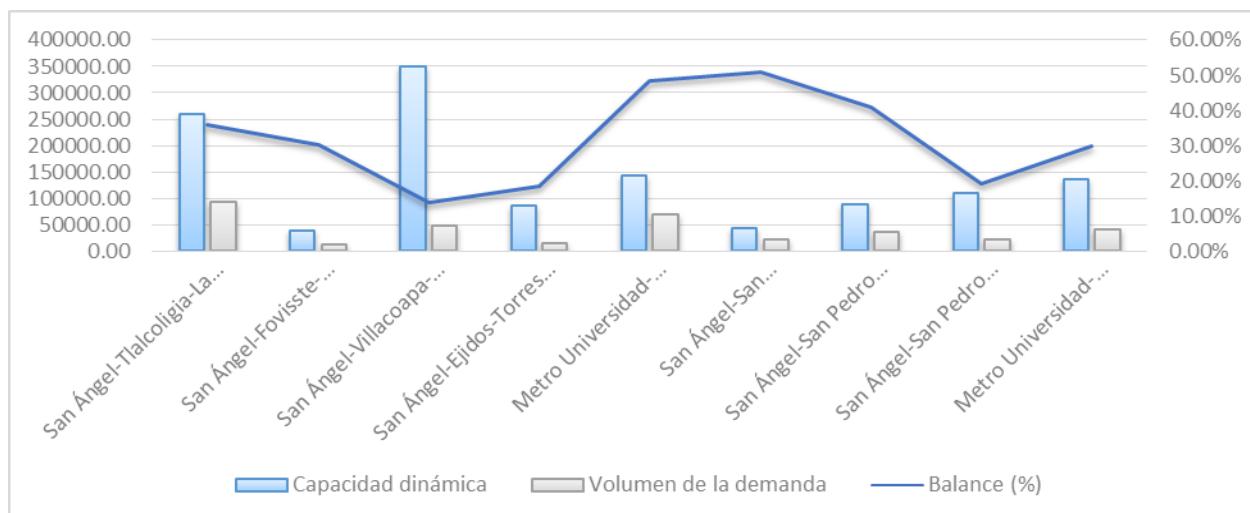


Figura 24 Balance entre la oferta y la demanda que se ofrecía en la Avenida de los Insurgentes Sur (Elaboración propia. Fuente: Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 170, 2007)

Contado todas las rutas, la capacidad dinámica era de 1'291,740 plazas-km, mientras que el volumen de la demanda era de 190,013 viajeros-km. Lo que resultaba en un balance de 28%, de aprovechamiento de la oferta; es decir, Había una sobreoferta del 72%.

De los recorridos significativos, tomando en cuenta solo los ascensos y descensos en la Avenida de los Insurgentes Sur, se tenía un total de 53,500 usuarios en un día hábil. De los cuales, 26,300 pasajeros se movían de Norte a Sur, y 27,200 en sentido inverso.

En total el total de la red, los concesionarios de la Ruta 1 (en sus dos ramales: Rey Cuauhtémoc y Villa Coapa) cubrían la mayor parte de la demanda, los cuales cubrían un 72.6%; en el troncal cubrían un 71% de la demanda. Por sí solo, el ramal Rey Cuauhtémoc cubría un poco más de la mitad de la demanda del total (54.4% de la red y 58.4% en el troncal) El organismo descentralizado RTP también cubría una gran parte, en el troncal cubría el 20% de la demanda; esto dejaba a Ruta 76 y Ruta 111 con una participación menor al 10%, en el troncal.

En el siguiente número de la Gaceta Oficial del Distrito Federal (No. 171, 2007) se anexaban al estudio técnico, que contenía el balance entre la oferta y la demanda de transporte público colectivo de pasajeros en el segundo corredor “Metrobús Insurgentes Sur”. Este estudio técnico, de balance entre la oferta y la demanda, era la justificación para la implementación del segundo corredor de transporte público. Las principales razones para modificar el transporte en la vialidad eran: el aprovechamiento de la demanda de solo el 28%, el parque vehicular compuesto por unidades de mediana y baja capacidad, las pocas alternativas para cruzar el periférico y la edad del parque vehicular.

La Gaceta Oficial del Distrito Federal No. 170 (2007) era el documento que presentaba la *Declaratoria de Necesidad para la Prestación del Servicio de Transporte Público de Pasajeros en el Segundo Corredor de Transporte Público de Pasajeros “Metrobús Insurgentes Sur”* el cual basada en el estudio técnico de balance entre oferta y demanda. En esta publicación funcionaría como una aprobación para la construcción del segundo corredor de transporte “Insurgentes Sur”, con el cual se completaría la línea 1 del Metrobús. También se establecieron las características operativas (las cuales serían iguales a la primera parte del corredor), se establecieron los parámetros para el otorgamiento de la concesión de operaciones (la cual priorizaría a los actuales concesionarios) y se decretaba la participación entre los dos operadores del primer corredor del transporte y el nuevo concesionario.

En total se requirieron de 26 autobuses con capacidad de 60 pasajeros. La participación estaría divida, un 70% sería otorgado a una concesión de operación privada, el 30% restante sería otorgado al organismo público descentralizado RTP.

Las características técnicas, que se proyectaron, fueron las siguientes:

Tabla 11 Ficha técnica del segundo corredor de transporte de pasajeros “Insurgentes Sur” (2007)

Estaciones	Terminales	2
	Estaciones intermedias	8
Demanda	Volumen de diseño	2739 pasajeros por hora por sentido
	Total	53,503 pasajeros al día
Autobuses	Autobuses en operación	21
	Autobuses en reserva	5
Tiempo	Flota total	26
	Retorno Doctor Gálvez	7 minutos
	Retorno El Caminero	3 minutos
	Tiempo de recorrido N-S	27 minutos
	Tiempo de recorrido S-N	27 minutos
Kilometraje	Tiempo de ciclo	64 minutos
	Día hábil	5,897.85
	Por autobús promedio diario	251.84

	Ruta 1 (70%) anual	1'235,906
	RTP (30%) anual	529,674
	Total anual	1'765,580
	Sábado (55% de un día hábil)	3,243.82
	Domingo (36% de un día hábil)	2,123.23
	Máximo anual por autobús	67,906.92
Distancia	Retorno Norte	2,297.70 metros
	Retorno Sur	390.88 metros
	Longitud Norte-Sur	7,947.12 metros
	Longitud Sur-Norte	7,947.12 metros
	Longitud Total	18,583.02 metros
Velocidad	Velocidad promedio	22 km/h

Fuente: Gaceta Oficial del Distrito Federal, No. 171, 2007, p. 42-43

La concesión se le otorgó a 137 concesionarios individuales de Ruta 1 (Título por el que se otorga la concesión para la prestación del servicio público de transporte de pasajeros en el segundo corredor de transporte público de pasajeros “Metrobús Insurgentes Sur”, No. STV/METROBÚS/002/2008, 2008) Por su participación en la demanda que existía en ese momento, se decidió que la operación corriera a cargo de los concesionarios de la Ruta 1 y el organismo descentralizado RTP. La distribución de la demanda sería, un 70% cubierta por la Ruta 1 y 30% por el organismo descentralizado RTP, esto quiere decir que el concesionario debía adquirir 19 vehículos, de los cuales 18 estarían en operación y 1 en reserva.

Para poder obtener la concesión los antiguos concesionarios se tuvieron que asociar por medio de una sociedad anónima de capital variable, llamada “Rey Cuauhtémoc S.A. de C.V. Su concesión se le otorgó por diez años, con posibilidad de expansión de la concesión, bajo los mismos parámetros que se le establecieron a “Corredor Insurgentes S.A. de C.V.”

Originalmente, no había un plan de operaciones definido. Se planeaba que la empresa “Rey Cuauhtémoc S.A. de C.V.” operara de la estación Dr. Gálvez a El Caminero. Sin embargo, el contrato le permitía utilizar toda la infraestructura del corredor (de Indios Verdes a El Caminero) Además, la concesión indicaba que el concesionario podría operar alguna ruta diferente en el corredor, siempre y cuando, la asignara el organismo descentralizado “Metrobús”.

El título de concesión fue sumamente similar al que se le dio a “Corredor Insurgentes S.A. de C.V.” en la primera parte del corredor.

Su inicio de operaciones fue el 13 de marzo del 2008.

4.1.8 Situación Actual

La línea 1 del Metrobús tiene una extensión de 30 kilómetros por sentido. Su vialidad de circulación es la Avenida de los Insurgentes (Norte, Centro y Sur), desde el Centro de

Transferencia Intermodal Indios Verdes hasta la intersección con el Viaducto Tlalpan (Monumento El Caminero)

Su derecho de vía es del tipo B, segregada por medio de bordos (por ley, está prohibido el tránsito de cualquier vehículo particular) Los vehículos operan en el sentido del flujo de tránsito. La línea no cuenta con carriles de rebase, ni en las estaciones.

Cuenta con estaciones y carriles en el separador central. A su costado, la Avenida de los Insurgentes cuenta con tres carriles por sentido (en la mayoría de su recorrido) Las estaciones tienen una configuración alargada. En total se cuenta con 47 estaciones, de las cuales se han establecido tres terminales. Las estaciones terminales y la estación Insurgentes cuenta con múltiples puntos de atraque. Cuenta con estaciones ubicadas en el lado cercano, lado lejano y el bloque medio de la vía.

No están permitidos los giros a la izquierda. En la ruta existe una glorieta, debido a su configuración no requiere de alguna adecuación especial para ingresar a ella, su acceso lo realiza por medio de fase semafórica con el resto del tránsito.

Cuenta con rutas acortadas, las cuales van entre las terminales. No cuenta con servicios exprés ni de paradas limitadas.

El precio de servicio es de 6 pesos, la tarifa es plana. El recaudo se hace por medio de tarjetas de prepago, las cuales se pueden adquirir en las estaciones (las tarjetas son válidas para múltiples modos de transporte) Las recargas también se realizan en las estaciones, antes del abordaje, en los mismos puntos donde se pueden adquirir tarjetas.

La velocidad promedio de operación es de 20 km/h, el recorrido se realiza en una hora con treinta minutos.

La frecuencia de los autobuses es de 40 segundos en hora pico, en hora valle la frecuencia es de 1.5 minutos.

La máxima demanda diaria del sistema se presentó el 17 de marzo del 2017, cuando se registró un total de 615, 838 usuarios.

La demanda horaria de la línea está distribuida de la siguiente manera:

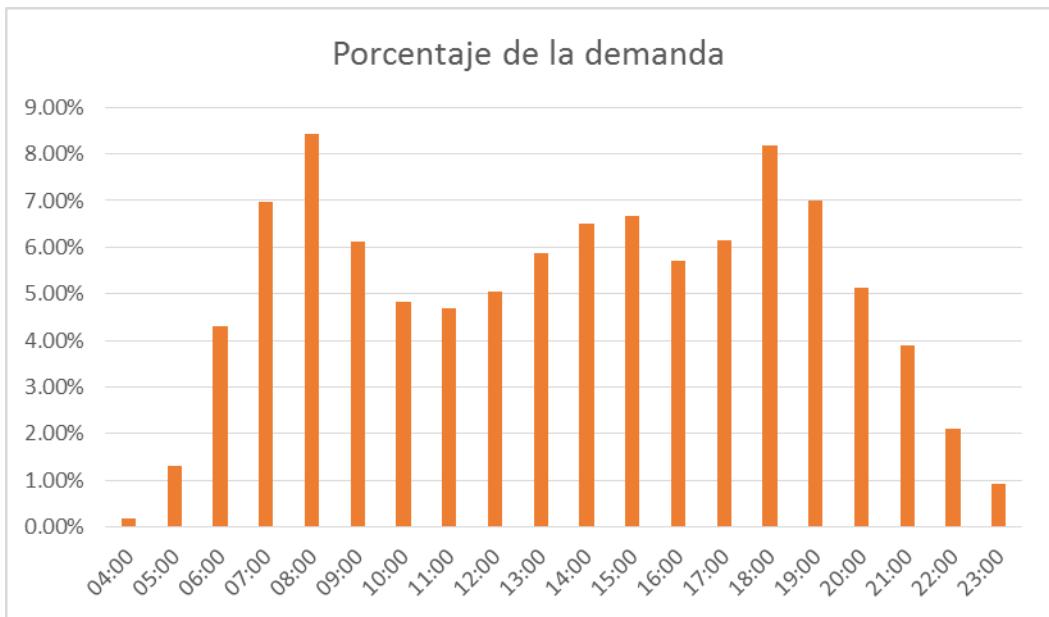


Figura 25 Distribución horaria de la demanda de la línea 1 del Metrobús, en términos de porcentaje (Elaboración propia. Fuente: Datos proporcionados por Metrobús)

El organismo descentralizado Metrobús estima que, para 2017, la Línea 1 del Metrobús producirá las siguientes cantidades de emisiones:

Tabla 12 Emisiones estimadas para 2017 de la Línea 1 Del Metrobús

Contaminante	Cantidad (en toneladas)
Dióxido de Carbono Equivalente (CO2EQ)	34,094
Monóxido de Carbono (CO)	42.9
Óxidos de Nitrógeno (NOX)	57.2
Material Particulado (PM)	0.64

La Línea 1 del Metrobús cuenta con sistemas inteligentes de transporte, los cuales incluye:
Autobuses

- Consola de control embarcada con localizador GPS.
- Cámaras de vigilancia (de vía e interior)
- Pantallas informativas
- Sistemas de audio informativo
- Consola del operador
- Sistemas de manos libres para comunicación telefónica desde el centro de control

Estaciones

- Pantallas informativas
- Sistemas de audio bajo demanda

El sistema cuenta con una flota vehicular de 211 autobuses en operación, de un total de 236 vehículos.

En cuestión administrativa, la línea 1 del Metrobús ha reportado el siguiente flujo de efectivo (de enero a marzo del 2017):

Tabla 13 Flujo de dinero en la Línea 1 del Metrobús de enero a marzo del 2017

	Concepto	Cantidad (millones de pesos)
Ingresos	Ingresos	141.93
	Tarjetas	539.7
	Total	141.39
Egresos	Financiamiento	10.96
	Recaudo	7.73
	Conexos	10.13
	Kilometraje	101.27
	Metrobús	0
	Total	130.09
	Diferencia	11.29

Las estaciones con mayor afluencia son las siguientes:

- Indios Verdes: 41,434 pasajeros promedio en día hábil
- Buenavista: 26,383 pasajeros promedio en día hábil
- Polifórum: 24,376 pasajeros promedio en día hábil
- Félix Cuevas: 24,279 pasajeros promedio en día hábil
- Glorieta de los Insurgentes: 23,283 pasajeros promedio en día hábil
- Perisur: 20, 424 pasajeros promedio en día hábil

La línea 1 del Metrobús tiene 4 transferencias con líneas del Metrobús (línea 2, 3, 4 y 6) y 9 transferencias con líneas del Metro (línea 1, 2, 3, 5, 6, 9, 12 y B) Todas las transferencias con el Metro se realizan saliendo de las estaciones, no se cuenta con ninguna infraestructura de transferencia (a excepción del Centro de Transferencia Modal en Indios Verdes) Las transferencias con líneas del Metrobús son de dos tipos: abiertas y de plataforma.



Figura 26 Mapa actual de la línea 1 del Metrobús (Fuente: Metrobús, 2017)

4.2 Tren Ligero

El Tren Ligero (LRT por sus siglas en inglés *Light Rail Transit*) es un sistema de transporte perteneciente al modo ferroviario. Los trenes ligeros son la respuesta a un proceso evolutivo, el cual buscaba mejorar las características operativas de los tranvías.

El modo ferroviario se caracteriza por: segregación parcial o total de su vía (derecho de vía tipo A y B), propulsión eléctrica (en la mayoría de los casos), una guía externa y tecnología férrea (ruedas metálicas, con pestañas y conificadas, las cuales sirven de guía y soporte) En general, son las características básicas de los modos ferroviarios; sin embargo, existen algunas excepciones, por ejemplo, los trenes de tránsito rápido cuentan con ruedas neumáticas y no metálicas, o los tranvías, que generalmente no tienen segregación de su vía.

4.2.1 Antecedentes

Los trenes ligeros tienen una historia muy antigua, la cual se puede rastrear hasta principios del siglo XIX; sus versiones más arcaicas no solo se identifican como uno de los sistemas de transportes urbanos más antiguos, sino como el primero.

El autor Garret, T. (2004) señala que la historia de los trenes ligeros comenzó en el año de 1829, con un servicio de transporte público ofrecido en la ciudad de New York, el cual consistía en un tranvía tirado por caballos. Este servicio estaba concesionado, era operado por empresas privadas las cuales tenían derecho a prestar el servicio en la ciudad. Este tipo de tranvía tirado por caballos se expandió a Boston en 1935 y a Baltimore 1844. El nivel de servicio que se ofrecía era muy bajo, los tranvías compartían las calles con los peatones y carruajes, por lo que su velocidad de operación era demasiado lenta; además, los asientos eran muy incomodos, y las calles no estaban pavimentadas, lo que producía un viaje muy poco placentero.

Para el año de 1850 los tranvías tirados por caballo recibieron una mejora (inspirados en los carros utilizados para trasladar materia prima en las minas) la instalación de rieles en pavimento de las calles. Esta mejora produjo una velocidad de operación mayor, se incrementó la capacidad de los tranvías (debido a la reducción de la fricción), los cuales ya podrían trasladar hasta 30 personas.

En el año de 1853 los empresarios estadounidenses llevaron la tecnología de los tranvías tirados a caballo (conocidos con el término *street railway*) a Europa, la instalación del primer tranvía de este tipo tuvo lugar en París. En 1860 se instaló en Birkenhead, Inglaterra y en 1863 en Copenhague, Dinamarca.

A partir de 1850, los servicios de transporte público en las ciudades cobraron una gran importancia, teniendo una gran prioridad y construyendo una gran cantidad de líneas en los Estados Unidos de América.

En 1860 se desarrolló una nueva tecnología, el *cable car*, el cual era un tranvía utilizaba como fuerza motriz un cable, el cual era jalado en una estación central por medio de máquinas de vapor. Los costos operativos de cable car eran demasiado altos, por lo que se decidió limitar su operación a las zonas más congestionadas; sin embargo, su éxito fue demasiado corto, poco a poco se fueron reemplazando por tranvías convencionales de esa época (en la actualidad sobreviven algunos pocos, como el de San Francisco).

En la década de 1870 fue cuando comenzó una expansión acelerada de los tranvías. Para 1880, Estados Unidos ya contaba con más de 400 compañías operadoras, más de 9600 kilómetros y trasladaba a 180 millones de pasajeros al año (Garret T, 2004, p. 6)

La invención del dinamo de Werner Von Siemens en 1879 trajo el mayor avance en los tranvías, con esto se sustituyó la propulsión por medio de caballos a motores eléctricos. Este cambio representó una mejora en el servicio, los motores eléctricos eran más limpios y proporcionaban una mayor velocidad de operación. El sistema funcionaba con una estación eléctrica en algún punto, la cual generaba la energía necesaria para la tracción y la cual se conducía a través de la línea mediante cables sobre el vehículo o directamente en los rieles (en los próximos años se adopta universalmente los cables sobre el vehículo, por razones de seguridad) En 1881, en Berlín, se construyó la primera línea de tranvía eléctrico, por la compañía Siemens & Halske.

La popularización del tranvía eléctrico duro, aproximadamente 25 años, el cual llegó a operar en ciudades como París, Frankfurt, Kioto, Bangkok, Ciudad de México, entre otras. Para 1900 casi todas las líneas de tranvías tirados por caballos habían sido modernizadas a tranvías eléctricos, en Estados Unidos y Europa.

La época dorada del tranvía terminó en la década de 1910, cuando una serie de factores sociales y económicos comenzó, poco a poco, con su declive.

En los documentos escritos por Norley K. (2006, p. 6-10) y Taplin M. (1998) podemos encontrar tres momentos claves en la decadencia del tranvía, los cuales no fueron sucesos estrictamente relacionados con la ciencia o la ingeniería, sino fueron sucesos históricos y sociales, los cuales tuvieron una repercusión en el transporte.

A pesar de que el tranvía se encontraba en su mejor momento para la década de 1910, contando con más de 24,000 kilómetros en Estados Unidos, el estallido de la Primera Guerra Mundial (1914) comenzó la desaparición del tranvía, principalmente en Estados Unidos. Durante este conflicto bélico la economía se enfocó principalmente en el desarrollo de armas, dejando a un lado el desarrollo del transporte en las ciudades.

Al término de la Primera Guerra Mundial (1918) Estados Unidos, como un vencedor del conflicto, se encontraba en una buena racha económica, lo que potencializó en sus ciudadanos la adquisición de vehículos privados. Los ciudadanos comenzaban a realizar más viajes por medio

de sus automóviles que en tranvía, lo que fue poniendo en riesgo su situación financiera, situación que se agravo en el segundo momento clave.

La depresión de 1929, generado por la caída de la bolsa de Wall Street de Estados Unidos, desencadeno una fuerte crisis económica en todo el mundo. Los gobiernos se enfocaron a tratar de salvar la economía, por lo que la inversión en transporte quedo completamente detenida; además, los apoyos económicos (en Estados Unidos) a las compañías operadoras de los tranvías se retiraron. El descenso en los aforos de usuarios, la crisis económica y el retiro de los apoyos del gobierno pusieron en crisis la situación financiera de los tranvías; los cuales, para 1930 enfrentaban ya una grave situación. El tercer momento clave inicio un parteaguas en las tendencias de planeación de transporte, lo que desencadenaría en la desaparición de los tranvías en una parte del mundo, y en una modernización que culminaría en la creación del tren ligero en la otra parte.

La Segunda Guerra Mundial fue el último acontecimiento que marco el destino de los tranvías. Desde su inicio (1939) el desarrollo de infraestructura quedo completamente detenida, y la inversión quedo totalmente olvidada. Una vez terminada la Segunda Guerra Mundial (1945) Estados Unidos detuvo totalmente su sistema de tranvías, quedando reducido a unos cuantos; el mismo patrón lo siguieron países como el Reino Unido, Francia, España y Australia.

Tras una victoria en la guerra, la población decido invertir en vehículos privados, y se apostó por un sistema de transporte basado en los vehículos privados, pensando que todos los ciudadanos tendrían un automóvil, aquellos que no pudieran pagar un vehículo se trasladarían en autobuses. Esta política pronto llevo a retirar a todos los tranvías de las calles, para hacer espacio para los automóviles. En cuestión de unos años todos los tranvías habían sido sustituidos por automóviles y autobuses.

Por otro lado, en Europa, después de la Segunda Guerra Mundial los sistemas de transporte no quedaron intactos ante la destrucción de la guerra, y al verse totalmente devastados se vio como una oportunidad de reestructuración y modernización, basada en los sistemas ferroviarios (tren ligero y metro). Los países que lideraron esta tendencia fueron: Alemania (principalmente la Occidental), Países Bajos, Bélgica, Luxemburgo, Suiza, Suecia y la Unión Soviética, la cual vio una oportunidad de reforzar sus ideales políticos por medio del transporte urbano masivo.

La situación en Estados Unidos, para 1960, era crítica. Los vehículos estaban saturando las calles; aumentando los tiempos de recorrido y la contaminación en los centros de las ciudades. En esta década fue cuando se creó un término que terminaría en la concepción del actual tren ligero (light rail vehicle, en inglés), la idea era crear un prototipo de tranvía modernizado (siguiendo el estilo europeo) pero con un diseño estadounidense. El resultado no fue favorable, el modelo no funcionó y fue desecharlo; sin embargo, eso no impidió el intento de retomar el tranvía moderno y reestructurar el transporte.

En Europa no se veía como un nuevo sistema de transporte, el tranvía moderno, sino hasta la década de 1970, cuando en Alemania se crearon unos códigos de práctica, por medio de la Asociación Alemana de Operadores de Transporte Público (*Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe*, en alemán), en la cual se les asignaban nuevos estándares a los tranvías, convirtiéndolos en sistemas más parecidos a los metros. Estados Unidos siguió de cerca esta evolución, y la concepción de un tranvía con segregación en su derecho de vía, prioridad de tránsito, vehículos más grandes y acoplados en trenes de hasta cuatro vehículos lo hizo identificarlo como un nuevo sistema de transporte, naciendo el término tren ligero.

Los nuevos sistemas de trenes ligeros se desarrollaron en Alemania bajo el nombre de Stadtbahn y U-bahn; de los cuales resaltan los de München, Frankfurt, Hannover, Stuttgart y Köln. Sistemas como el de Frankfurt decidieron hacer subterráneas las operaciones del tren ligero en los centros de las ciudades; otras ciudades decidieron seguir el modelo de Gothenburg, Suecia; en el cual se restringía totalmente el transito privado en el centro de la ciudad, dejando visible en todo momento el sistema. Estos nuevos sistemas se fueron esparciendo por el mundo, llegando a países donde se había abandonado como España, Francia, Reino Unido, y por supuesto, Estados Unidos.

Poco a poco los trenes ligeros fueron ganando terreno, y aunque aún existen tranvías modernos, los trenes ligeros se consolidaron como un sistema de transporte independiente, el cual resultó de una evolución de los tranvías.

4.2.2 Definición

El término tuvo origen en la década de 1960, en los Estados Unidos. En esa década, la Asociación de Tránsito Urbano Masivo (*Urban Mass Transit Administration*, ahora conocida como *Federal Transit Administration*) buscaba implementar nuevos vehículos de tranvías en San Francisco y Boston; sin embargo, debido al descuido que se le había dado en los últimos años a este modo de transporte, los trabajadores de este programa consideraban que la imagen negativa podría traer problemas políticos en su implementación. Es por esto que decidieron introducir un nuevo término, “vehículo ferroviario ligero” (*light rail vehicle*) (Lawrence L, 2012)

Existen múltiples organismos que han definido a los trenes ligeros, algunas de las principales definiciones son:

“Sistema eléctrico ferroviario caracterizado por su habilidad de operar con un solo o múltiples carros, los cuales operan en derecho de vía exclusivo y a nivel de piso, en estructuras áreas, túneles o calles. Tiene la posibilidad de generar los ascensos y descensos por medio de estaciones de plataforma, vías o a nivel de piso. Normalmente es motorizado por cables eléctricos localizados sobre el vehículo” (American Public Transportation Association, 2012)

“El tren ligero es un sistema de vehículos de pasajeros eléctricamente impulsado con ruedas metálicas, que son impulsadas a través de vías construidas de rieles metálicos. La propulsión es extraída por medio de un cable, localizado sobre el vehículo, por medio de un pantógrafo, o cualquier otro colector de corriente, y se regresa a la subestación por medio de los rieles. Los rieles y los vehículos deben de ser capaces de compartir las vías con vehículos de tránsito de neumáticos y peatones. El sistema de rieles puede ser construido con alguna segregación en su derecho de vía. Los vehículos pueden tomar curvas cerradas, de 25 metros, inclusive más cerradas, con el fin de poder transitar dentro de las ciudades. Los vehículos no son construidos, en su criterio estructural (principalmente impactos, “crashworthiness”, y cargas en el buff, “buff strength”), para compartir vías con trenes interurbanos y equipos de carga (Lawrence L, 2012, p. 1-4)

“El tren ligero consiste en un vehículo motorizado eléctricamente, de alta capacidad, silencioso y de alta calidad de montaje, operando con uno a cuatro vehículos, predominantemente con una segregación en su derecho de vía [...] Los trenes ligeros usualmente tienen vehículos articulados, con dos a siete secciones articuladas, cuatro a diez ejes, en algunos diseños con ruedas suspendidas. Pueden operar con trenes sencillos o de múltiples unidades [...] Los vehículos articulados tienen una longitud entre 18 a 42 metros. Estos vehículos pueden trasladar hasta 250 personas, de las cuales entre el 20% y el 50% van sentadas. Los vehículos de los trenes tienen una alta capacidad de aceleración-desaceleración, 1-2 m/s² en condiciones normales, 3 m/s² en frenado de emergencia [...] Los vehículos de tren ligero operan entre un 70% y 90% de las veces en derecho de vía tipo A o B, el derecho de vía tipo C se utiliza en el centro de las ciudades o en vías congestionadas (Vuchic V, 2007, p. 302)

Podemos distinguir algunas características en común de todas las definiciones, y poder identificar al tren ligero como:

Sistema de transporte motorizado eléctricamente, el cual cuenta con cables sobre el vehículo, que le permiten generar su movimiento. Cuenta con ruedas y rieles metálicos, los cuales tienen una segregación en su derecho de vía (derecho de vía tipo A o B); sin embargo, puede operar en derecho de vía tipo C, por lo que su infraestructura debe de poder compartir vía con el tránsito mixto. Puede operar con trenes de un solo vehículo o hasta cuatro vehículos acoplados. Sus vías y vehículos no están diseñados para compartir el tránsito con trenes de conexión o de carga.

4.2.3 Características tecnológicas y operativas

Los sistemas de trenes ligeros en el mundo son muy variados entre sí, ya que cada uno cuenta con características especiales que le permitan servir de mejor manera la demanda.

A pesar de ser muy diferentes cada sistema, y contar con sus propias peculiaridades, los trenes ligeros se pueden agrupar debido sus características físicas, y así poder clasificarlos e identificarlos.

A continuación, se presentan las características para identificar a un tren ligero las cuales son:

Material rodante: Se refiere a todo a los referentes a los vehículos que pueden transitar sobre rieles. Aquí se definirán los tipos de vehículos, el equipo eléctrico y el cuerpo del vehículo. Estas características son tomadas del autor Vuchic, V. (2006, p. 309-336)

Tipos de vehículos: La clasificación de los vehículos puede ser muy extensa, la cual se puede realizar dependiendo del tipo de característica a analizar. Existen seis categorías:

- Fuerza motriz
 - Vehículo motorizado: Es un vehículo el cual cuenta con motorización en alguno o todos sus ejes. Puede operar solo o acoplado en tren.
 - Tráiler motorizado: Es un vehículo que está motorizado; sin embargo, no cuenta con controles para manejarlo. Su operación tiene que ser junto con vagones que cuenten con controles.
 - Tráiler: Es un vehículo que no cuenta con motorización, el cual es remolcado por algún vehículo motorizado o por una locomotora.
 - Locomotora: Es un vehículo sin pasajeros y motorizado, sirve para remolcar o empujar tráileres.
 - Vehículo A-B: Son vehículos motorizados, y que comparten piezas para operar entre sí. Solo pueden operar de manera conjunta. Cuentan con controles en la parte delantera y en la parte posterior.
- Propulsión
 - Eléctrica: Son vehículos o trenes que funcionan por medio de motores de DC o AC.
 - Motor de combustión interna: Son vehículos o trenes que cuentan con motor que funciona con diésel, o algún combustible similar.
 - Híbrido: Son una combinación de motores eléctricos y de combustión interna.
- Operación
 - Unidad simple: Es un vehículo que puede operar solo.
 - Par unido o unidad de tres vehículos: Son vehículos que comparten componentes mecánicos y eléctricos para operar. El par unido es un vehículo tipo A-B, el de tres vagones es un A-B más un C, que pudiera o no estar motorizado.
 - Vehículo motorizado con tráiler: Mayormente usado en trenes ligeros y tranvías.
 - Locomotora con tráiler: Mayormente usado en metros.
 - Múltiples unidades: Son múltiples vehículos motorizados. El término se utiliza para diferenciarlo del vehículo/locomotora con tráiler.

- Tipo de vehículos
 - Sencillos: Vehículo continuo y sin uniones.
 - Articulados: Son vehículos que cuentan con cuerpos conectados por medio de uniones, estos cuerpos pueden ser de dos a cinco. En su interior son continuos en todo su cuerpo. Las uniones les permiten girar entre los cuerpos, tanto vertical como horizontalmente. Son comúnmente usados en trenes ligeros y tranvías.
- Número de niveles (decks)
 - Double-decker: Son vehículos que cuentan con dos niveles de asientos, los cuales están conectados por un par de escaleras.
- Altura de piso:
 - Piso alto: El piso de los vehículos se encuentra entre 0.8 y 1.2 metros por encima de los rieles. Para su acceso se cuenta con escaleras, o bien con plataformas altas en las estaciones.
 - Piso baja: Su piso se encuentre entre 0.20 y 0.40 metros por encima de los rieles. Es la forma en la que operan la mayoría de los trenes ligeros.

Bogíes/Trucks y ejes: Eje “Es una pieza cilíndrica de acero sobre la que se montan las ruedas, las cajas de grasas y los elementos terminales de la transmisión de un vehículo ferroviario” (León M, 2000, p. 199)

Las ruedas metálicas están fijas a los ejes, y son las que proporcionan la guía y el soporte. La guía se produce por la conicidad de las ruedas y por las pestañas que están en contacto con los rieles (Vuchic V, 2006, p. 316)

El autor Vuchic, V. (2006, p. 314-316) define a los trucks (bogíes) la parte del vehículo que contiene los ejes con ruedas, motores, frenos y diversos componentes mecánicos y eléctricos. Los bogíes funcionan con dos ejes paralelos fijos. Al centro del marco de los trucks se encuentran las placas centrales (*centreplate*, en inglés) los cuales soportan el cuerpo del vehículo, pero permiten la rotación horizontal del mismo. Los trucks permiten una mayor longitud de los vehículos, mayor capacidad y un mejor nivel de servicio en el viaje.

Propulsión: El sistema de propulsión de los trenes ligeros es a base de motores eléctricos. Su funcionamiento es el siguiente: La electricidad viaja de alguna planta de energía eléctrica, la cual se encuentra en una distancia lejana, la planta envía corriente alterna de alto voltaje. Esta energía eléctrica es enviada a subestaciones, las cuales cuentan con transformadores y rectificadores; en ellas se reduce el voltaje y se transforma la corriente, de alterna a directa. De las subestaciones la energía eléctrica se dirige hacia cables, los cuales están localizados sobre el vehículo. La extracción de la energía hacia los vehículos se realiza por medio de un pantógrafo, el cual envía la energía eléctrica de los cables hacia el vehículo, dentro de los vehículos pueden existir dos tipos de motores: de corriente directa o de corriente alterna, los cuales generan la tracción que mueve los ejes, haciendo girar las ruedas, generalmente, para todos los vehículos de

LRT cada eje cuenta con un motor (por lo tanto, hay dos motores por truck), en caso de que el vehículo sea de piso bajo se instala un motor por rueda.

Los motores eléctricos pueden ser utilizados para realizar el frenado en el vehículo, esta acción se realiza por medio de fuerzas magnéticas, sin presentar fricción; además de presentar ventajas como la ausencia de polvo, olor o sonido, con el frenado de motor eléctrico puede generar recuperación de energía eléctrica durante la desaceleración, existen dos tipos de frenos con motor eléctrico: los dinámicos y los regenerativos, la diferencia consiste en que los regenerativos cuentan con el equipo para recuperar energía durante el frenado, estos sistemas de frenado utilizan el motor eléctrico como un generador, en lugar de utilizar la energía eléctrica como fuente motriz del eje (Vuchic V, 2007, p. 107) Adicionalmente al sistema de frenado dinámico (o regenerativo), la mayoría de los sistemas de frenados en trenes ligeros cuentan con frenos neumáticos, los cuales funcionan cuando los frenos dinámicos ya bajaron la velocidad del vehículo, y se lleva al vehículo un frenado total; los frenos neumáticos funcionan con compresores, válvulas y cámaras de aire; los cuales están conectados a discos de frenados en las ruedas (o zapatas de freno), y son accionados mecánicamente al realizarse cambios de presiones en el mecanismo (Vuchic V, 2007, p. 318) Los trenes ligeros, además, deben de contar con unos frenos de emergencia y de frenado rápido, debido a que comparten sus vías con otros medios de transporte. La mayoría de los vehículos cuenta con frenos electromagnéticos de patín (*magnetic track brakes*, en inglés) los cuales consisten en un patín de metal, el cual cuenta con una bobina, localizado entre las ruedas, el patín se encuentra suspendido entre los rieles y el vehículo. Cuando el vehículo está operando normalmente los imanes están inactivos; cuando el vehículo requiere frenar de emergencia se hace pasar corriente eléctrica por las bobinas, lo cual suelta a los patines, que son atraídos a los rieles por magnetismo, con una fuerza de entre 2 y 4 toneladas (Vuchic V, 2007, p. 320)

Vehículo: Como menciona el autor Vuchic, V. (2007, p. 322) los factores para poder seleccionar algún tipo de vehículo son múltiples. La elección del vehículo incluye:

- La operación del sistema: La capacidad de la línea, frecuencia, costos operativos, etc.
- Las operaciones de los pasajeros: El ascenso/descenso del vehículo, el número de puertas, la cantidad de asientos, las congestiones en las entradas/salidas, etc.
- Consideraciones estéticas: Una imagen positiva, la estética dentro y fuera del vehículo. Que la población se sienta identificada, y que sienta una conexión positiva con el servicio.
- Costos de mantenimiento: La durabilidad de las piezas, el costo de las refacciones, la limpieza del vehículo, la pintura, etc.
- Costos de inversión: Depende de las instalaciones por las cuales realizará sus recorridos, la durabilidad, la complejidad de las operaciones, etc.

La idea siempre es buscar el mínimo costo de mantenimiento y de inversión, pero no se debe de tener una imagen asilada de estos dos factores, se debe de considerar el costo total del equipo durante su vida útil.

Los vehículos de LRT articulados llegan a medir entre 18 y 54 metros, con un ancho entre 2.20 y 2.80 metros. En Estados Unidos, los trenes ligeros que circulan en derecho de vía tipo A y B llegan a tener longitudes entre los 72 y 96 metros (Vuchic V, 2007, p. 323)

Los vehículos articulados ha sido la mayor tendencia en los sistemas de LRT, los cuales pueden tomar curvas cerradas (con radios entre 15 y 25 metros)

Los laterales del vehículo son afectados por el número de puertas, el cual está estrechamente relacionado con el volumen de pasajeros. Existe una relación inversamente proporcional entre cantidad de puertas-asientos. Para los servicios urbanos, como los que proporciona el LRT, con gran volumen de pasajeros, un fuerte intercambio de pasajeros en las estaciones y una distancia corta (relativamente) entre estaciones, la capacidad de las puertas debe de ser alta. La localización de las puertas también debe de ser estratégica, ya que la distancia desde la puerta a cualquier punto del vehículo debe de ser minimizada. Usualmente los vehículos de LRT cuentan con una puerta al frente, para permitir el pago por el servicio. A su vez, las puertas están limitadas por la localización de trucks y articulaciones. Los vehículos de LRT tienen una gran cantidad de puertas, entre 5 y 10 por vehículo. Las puertas de los vehículos varían, en ancho, entre 1.10 y 1.50 metros. Existen tres tipos básicos de puertas: puertas plegables (las más comunes en trenes ligeros), puertas deslizantes (las más veloces en operar) y “plug doors” (las más complicadas mecánicamente) En cuanto a las ventanas, los vehículos LRT en su mayoría cuentan con una vista panorámica (Vuchic V, 2007)

El interior del vehículo incluye el tipo de asientos y la cabina del conductor. El área requerida por cada asiento doble está entre 0.35 m^2 y 0.55 m^2 , y para las personas de pie entre 0.20 m^2 y 0.25 m^2 . Los vehículos con un ancho de 2.40 metros cuentan con filas de 2 asientos y una fila de 1 asiento, los que cuentan con un ancho de entre 2.50 y 2.60 ya pueden meter dos filas de dos asientos (aunque el espacio para moverse dentro del vehículo es muy estrecho), lo recomendable es para anchos mayores a 2.65 metros. En cuestión de comodidad existen dos tipos de asientos, de plástico y tapizados, usualmente los trenes ligeros cuentan con asientos de plástico (Vuchic V, 2007, p. 334-336)

Superestructura: Se compone, principalmente, de tres elementos: el balasto, los durmientes y los rieles. Los siguientes elementos los explica el autor Vuchic, V. (2007, p. 354-362), a continuación se muestra un resumen de estos elementos.

- El balasto es piedra machacada (en la gran mayoría de los casos grava), y funciona como un sostén de las vías y los durmientes, transfiriendo la carga a un terreno firme. También

funciona para facilitar el drenaje en las vías. Es de simple construcción, y ayuda a mantener un nivel horizontal y vertical.

- Los durmientes son soportes de los rieles, se encargan de mantenerlos en posición y de asegurar el ancho entre los rieles. Usualmente los durmientes se separan entre ellos cada 60 o 70 cm. Existen de tres tipos de materiales: madera, concreto preefoscado y metálicos. Los más comunes y más usados son los de madera; son muy ligeros, fáciles de instalar y de reemplazar.
- Los trenes ligeros, debido a su interacción con otros modos de transporte, cuentan con sus rieles montados sobre una base de concreto, con una capa intermedia de asfalto (que sirve como una conexión flexible) La construcción sobre asfalto es más simple, con la desventaja de que produce una mayor vibración y una mayor cantidad de ruido; además de presentar una mejor disipación del calor. La separación estándar entre rieles (*railroad gauge*, en inglés) es de 1.435 metros (4 pies y 8.5 pulgadas) En Europa también es común otro tipo de configuración, el “Metro gauge” (separación de 1 metro) La mayoría de las ciudades europeas cambiaron de configuración “Metro gauge” a la estándar cuando mejoraron sus tranvías a trenes ligeros.

Derecho de vía: Como indica el autor Vuchic, V. (2007, p. 362-382), las características físicas del derecho de vía están determinadas por su posición y separación del resto del tránsito. En general, se pueden clasificar en cuatro categorías:

- Elevada o aérea: Utiliza terraplenes, viaductos y puentes. Sus operaciones se encuentran totalmente controladas, en derecho de vía tipo A.
- A nivel: Se refiere a nivel de calle, en operación con diferentes formas de tránsito. Su segregación puede ser de nula a total, por lo que el derecho de vía varía de tipo A a C.
- Deprimida: Se refiere a vías colocadas bajo el nivel de calle, pero con un diseño abierto. Son utilizados cuando la intrusión visual o de ruido debe de ser minimizada, o en intersecciones de cruces complicados.
- Túneles: Son estructuras totalmente cerradas, localizadas bajo el nivel de calle y con operaciones totalmente controladas.

El sistema de tren ligero operando en un derecho de vía tipo C debe de tener medidas regulatorias de tránsito, que mejoren su operación; de lo contrario, sus operaciones entran en conflicto con el resto del tránsito, proporcionando un servicio más bajo que los autobuses.

Algunas de las medidas regulatorias son las siguientes:

- Eliminación de los giros a la izquierda.
- Prohibición del cruce de tránsito mixto en intersecciones no señalizadas.
- Isla peatonal restringida: Se construye una barrera física en dirección del tránsito mixto. Esta construcción permite que no obstruyan las zonas de abordaje y descenso, y que los

peatones tengan mayor seguridad. Solo se construyen si en las vías cuentan con el ancho suficiente.

- Operación de las señales: En las intersecciones se les da prioridad a los vehículos de tren ligero, de esta manera no esperan en las intersecciones.
- Eliminación de estacionamiento: Prohibición de estacionamiento en las calles, para que no existan vehículos que entorpezcan las operaciones.
- Posición asimétrica de la vía u operación en contraflujo.
- Carriles reservados: Delimitar un carril para el uso exclusivo del tren ligero, marcándolo con pintura en el piso.
- Uso de carriles reservados en conjunto con autobuses.
- Operación en zonas comerciales (Transit malls)

Las operaciones con una segregación en su vía (derecho de vía tipo B) tienen una protección física, que impide a otros modos de transporte invadir su vía. Las técnicas más comunes de separación física son las siguientes:

- Bordo y una pequeña elevación en el pavimento: Es la medida más económica, aunque la separación es mínima.
- Bordo y elevación en el área de vías: El área de la vía es de grava o de pasto. Es la manera más común de separar las vías en las calles del tránsito mixto. La elevación evita los cruces descontrolados de los peatones. Si se decide un área verde en la vía, se le proporciona un atractivo visual y ambiental.
- Vías en áreas verdes o parques: Existen ciudades las cuales cuentan con sus vías en áreas verdes y parques, lo que le proporciona al pasajero un viaje más cómodo.

La vía protegida usualmente se coloca en el centro de la vía. Existe una configuración simétrica a cada lado de la vía, además de la configuración asimétrica. La localización en los carriles centrales permite velocidades de operación más altas, ya que se localiza más alejada de los carrieles de tránsito lento y de las banquetas; además, cuenta con una mejor geometría, facilitando los movimientos en las intersecciones. La mayor ventaja de las vías en los costados es que no requiere dos carriles separados para cada dirección, haciendo el ancho de vía más corto.

En algunas ciudades se ha puesto como barrera física arbustos o maleza. Estos arbustos deben de ser de mínimo 1 metro de alto. Este tipo de segregación requiere un mayor mantenimiento, sin embargo es mucho más estético. La mayor separación se consigue a través de barreras de concreto, aunque tiene la desventaja de ser la segregación menos estética.

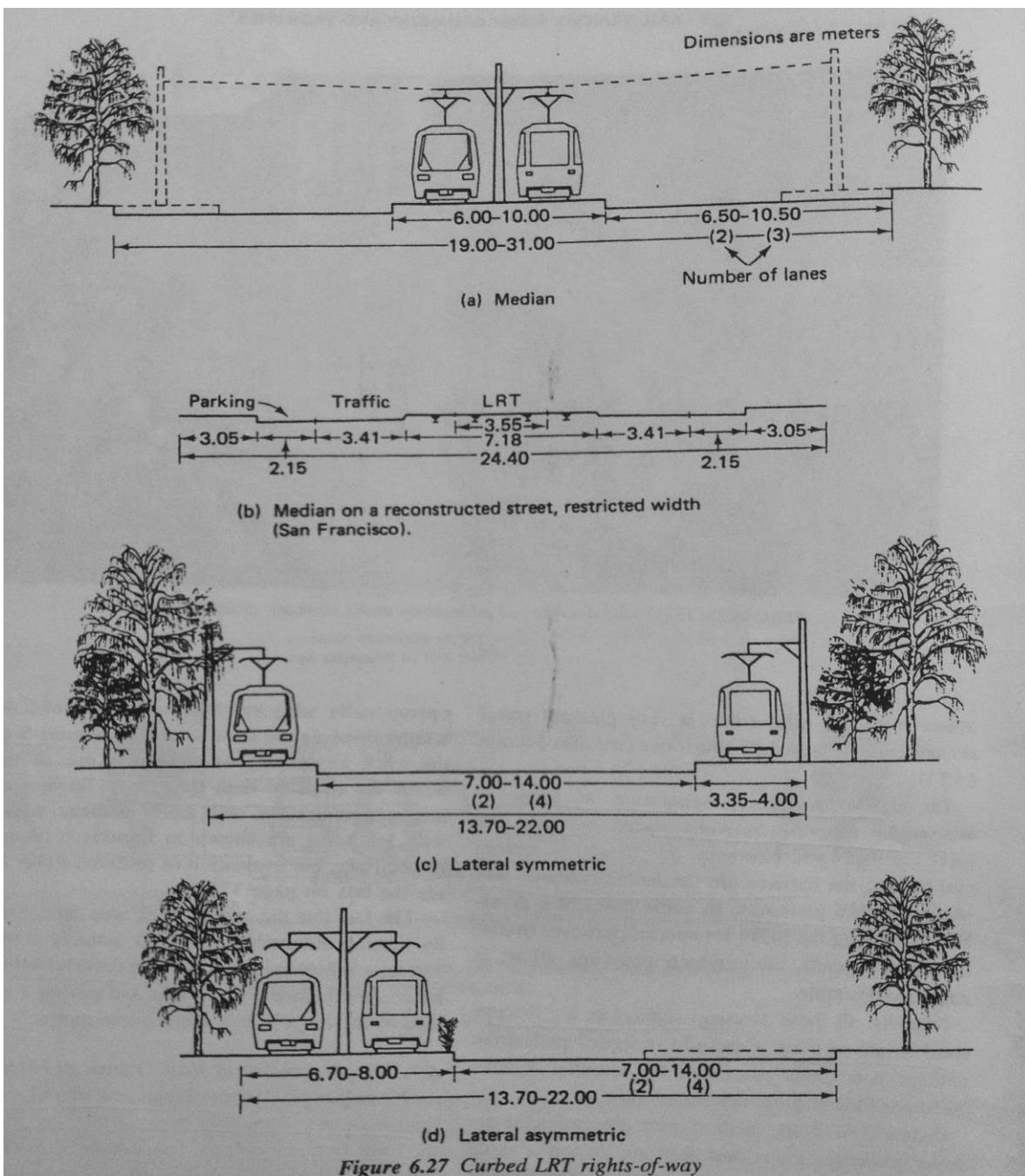


Figure 6.27 Curbed LRT rights-of-way

Figura 27 Localización de las vías en las calles. La configuración "a" ubica a los dos carriles en la parte media, La figura "b" muestra en corte las medidas de vías en la parte central con elevación. La configuración "c" muestra a las vías en la parte lateral de la calle, de manera simétrica. La configuración "d" también las muestra en la parte lateral, pero de manera asimétrica. Las medidas están en metros y son medidas mínimas propuestas por el autor (Fuente: Vuchic, V. 2007, p. 370)

Las intersecciones son de gran importancia en los sistemas de trenes ligeros, se debe de contar con algún tipo de preferencia para el servicio; de lo contrario, se pueden originar muchos retrasos. Los métodos más comunes de priorización del servicio son:

- Eliminar los giros a la izquierda.
- Señales de tránsito especiales (ciclos semafóricos especiales con preferencia al servicio)
- Señales de tránsito que se activan con los vehículos.
- Señales visuales y barreras de tránsito (se activan antes de que pase el vehículo, impidiendo cruces en las intersecciones)
- Separación a nivel del resto del tránsito.

Las señales de tránsito especiales pueden ser de varios tipos como, por ejemplo: adelantar el ciclo de avance del tren al resto del tránsito o, por el contrario, rezagar su fase un poco.

El vehículo puede estar totalmente o parcialmente sincronizado con las fases semafóricas. Esto se logra solo con una gran planeación, tomando en cuenta los tiempos de recorrido, la localización de las estaciones y la intersección.

En los cruces se debe de considerar el tipo de vehículo y la velocidad de operación. Si el vehículo es pequeño, y su velocidad es menor a los 70 km/h, las señales semaforizadas son lo suficientemente seguras para controlar los cruces. Para velocidades mayores, es necesario contar con barreras o luces parpadeantes, que se activen antes del paso del tren. En algunas ciudades, los trenes ligeros suenan un claxon antes de llegar a la estación.

La máxima separación del sistema de trenes ligeros del resto de tránsito se genera con una separación a nivel (derecho de vía tipo A), esto se logra con dos tipos de estructuras: elevadas y túneles.

La separación por medio de estructuras elevadas es, muchas veces, la única forma de separar a los trenes ligeros del tránsito mixto. Las estructuras elevadas consisten, básicamente, de una columna de concreto que soporta una vía con dos carriles para trenes. El diámetro de las columnas es de 1.00 a 1.50 metros, con un claro de 20 y 30 metros. La vía tiene un ancho aproximado de 7.25 metros, con el ancho suficiente para incluir un camino lateral para emergencias y mantenimiento (*catwalk*, en inglés) El uso de las estructuras aéreas depende de la densidad de las ciudades y del tipo de uso de suelo de las zonas cercanas a la línea.

Los túneles son la solución más efectiva para segregación de la vía del resto del tránsito, esto permite tener un control total en la vía, ya que: las operaciones están totalmente protegidas de cualquier interferencia, incluido el clima. Esto permite una gran confiabilidad y seguridad; además, reduciendo los costos de mantenimiento en las vías y estaciones

Existen dos tipos de túneles, según su alineamiento, elevación y su método de construcción:

- Los túneles superficiales son aquellos construidos a una profundidad menor a los veinte metros bajo el nivel de calle, son construidos de la superficie y siguen el alineamiento de la calle.
- Los túneles profundos son construidos mediante técnicas de ingeniería en perforación, sus profundidades son mayores a los sesenta metros y tienen un alineamiento independiente de las calles. La profundidad de estos túneles, y su método de

construcción (Milán, Hamburgo, Ámsterdam, etc.) depende de las condiciones locales, y de la línea propia.

Todos los túneles deben de contar con caminos protegidos para la gente de mantenimiento, además de rutas de evacuación cuando algún tren sufra una falla.

Paradas, estaciones y patios

El autor Vuchic, V. (2007) considera que estas instalaciones representan el lugar donde los usuarios se encuentran con el sistema. Es en este lugar donde se experimenta su imagen, servicio y su comodidad. Estos factores afectaran severamente el nivel de servicio que experimenta el pasajero.

Las estaciones se pueden clasificar en tres tipos:

- Estaciones a nivel: Son las estaciones que se encuentran a nivel de calle y que tienen una interacción con otros modos de transporte.

Para los sistemas de LRT es muy común colocar las estaciones en las baquetas, de esta manera se protege al usuario. Otra tendencia ha sido el colocar las estaciones en los centros de áreas exclusivas para peatones, como en distritos comerciales, plazas, comercios, entre otros; para esta técnica es muy efectivo colocar las paradas con algún pavimento de diferente color o algún mosaico. Sin importar si el vehículo es de piso alto o bajo, y si las plataformas son de bajas o altas, los cruces peatonales siempre son a nivel.

- Estaciones de Transferencia a nivel: Lo más importante de este tipo de instalaciones es colocarlas en zonas largas, de un amplio espacio y alejadas del tránsito vehicular. Este tipo de estaciones tiene libre cruce en las intersecciones, solo estaciones conflictivas, con frecuencias muy altas, o con una alta demanda se puede pensar utilizar pasos a desnivel.

- Estaciones de Acceso Controlado: Este tipo de estaciones está separada del tránsito mixto, por lo que sus operaciones no son interferidas por otros modos de transporte. Estas estaciones tienen un impacto en su ambiente durante un tiempo prolongado, por este motivo se deben diseñar cuidadosamente las estaciones, teniendo en cuenta a los tres actores en ellas: los pasajeros, los operadores y la comunidad. .

Las plataformas en las estaciones pueden ser de dos tipos: plataformas laterales o plataformas centrales

Las ventajas de las plataformas centrales, sobre las plataformas laterales, son las siguientes:

- Requieren de un ancho mucho menor, ya que debe tener el ancho suficiente para la cantidad de pasajeros en hora pico en un sentido más la cantidad de pasajeros en el otro sentido, las plataformas laterales requieren un ancho total deben de tener el ancho suficiente para cada sentido.
- Solo requieren de un set de instalaciones (escaleras, elevadores, módulos de información, etc.)
- Mayor facilidad de supervisión.
- Las plataformas centrales son más angostas en los extremos, donde la concentración de pasajeros es menor.

Aunque también existen algunas desventajas, como:

- Mayores costos de construcción.
- Posibles confusiones en los pasajeros, sobre la dirección de los trenes.
- No se puede separar el flujo pasajeros que van en cada dirección, complicando las operaciones.

También se puede operar con plataformas múltiples, la construcción de una tercera plataforma permite que cada línea cuente con una plataforma en cada lado, de esta manera el intercambio de pasajeros es más rápido. Las estaciones con múltiples vías permite el sobrepaso para rutas exprés.

La longitud de la plataforma debe ser para el tren más largo que vaya operar, más 5 o 10 metros. Esta longitud extra reduce los costos operativos, ya que el frenado en la estación no debe de ser exacto. Algunas líneas de LRT en el mundo son diseñadas con ancho suficiente para puedan parar dos o tres trenes simultáneamente. Las plataformas de los trenes ligeros pueden ser desde 30 metros hasta 100 metros de largo.

Las plataformas bajas tienen entre 0.20 y 0.35 metros. Son muy usados en sistemas LRT. Su costo de construcción es bajo; sin embargo, su alineamiento y su ascenso/descenso es bajo. Esto se mejoró con la invención de los vehículos de piso bajo, que permite que el intercambio sea directo. Las plataformas altas tienen una altura de entre 0.85 y 1 metro. Tiene que ser de la altura, o un poco más baja, que la altura del vehículo. Algunos sistemas de LRT cuentan con este tipo de plataforma, la cual permite tener un intercambio de pasajeros más rápido y seguro.

Las estaciones de transferencia con acceso controlado que no converjan las líneas en la misma plataforma tendrán que realizar los intercambios por medio de niveles; es decir, cada transferencia deberá incluir un nuevo nivel plataformas. La mejor opción será colocar las líneas una sobre la otra, reduciendo el tiempo de traslado entre ellas. En caso de que las intersecciones sean con otros sistemas, la construcción de un mezanine facilita el peaje entre sistemas.

Al igual que las estaciones de transferencia, las estaciones que sirven como alimentadores deben de minimizar el recorrido de los pasajeros entre los diferentes modos de transporte. Existen dos diseños típicos de estaciones alimentadoras:

1. Loop: Es un diseño de vía rectangular o circular, en el cual se permiten rebases y que cuenta con múltiples puntos de parada, todos en torno a una isla central. Es recomendable también incluir espacios para almacenamiento de vehículos en horas valle.
2. Bahías paralelas: Este diseño es más común para autobuses y trolebuses. En este diseño cada línea cuenta con su propia vía de acceso a una bahía, en la cual acceden para realizar el intercambio de pasajeros.

Los patios de mantenimiento se ven influenciados por varios factores. Al igual que en los sistemas BRT, la localización es de suma importancia. Se debe de minimizar la distancia entre la línea y el patio, ya que es una distancia muerta (en la que no se ofrece servicio, pero se desgasta

el vehículo y se generan gastos operativos) Los patios están localizados, usualmente, en los extremos de la línea. Es recomendable instalar patios en la parte intermedia de la línea.

Los patios deben de incluir:

- Lugares para mantenimiento, inspección y reparaciones menores de los vehículos.
- Instalaciones de limpieza de los vehículos.
- Vías de almacenamiento, durante las operaciones o en las noches.
- Vías de almacenamiento, para vehículos en espera de mantenimiento.
- Vías para maniobras.

4.2.4 El tren ligero en el mundo

Los trenes ligeros están presentes en 388 ciudades del mundo (Laurent & Mircea, 2015) y en alrededor de 79 países (Taplin, 2017)

El continente europeo es el líder en cuanto a la cantidad de ciudades con sistemas de LRT con 206, la zona de Eurasia cuenta con 93 ciudades, Asia con 41 y Norteamérica con 36 (Laurent & Mircea, 2015) Sudamérica es la región con menos sistemas de trenes ligeros, solo cuatro países cuentan con este sistema (Taplin, 2017)

En el 2015, los sistemas de trenes ligeros del mundo realizaron 13.5 billones de viajes al año, el 3% del total de los viajes realizados en transporte urbano. De 1985 a 2015 el sistema presentó un incremento considerable, construyéndose en 121 ciudades (Laurent & Mircea, 2015)

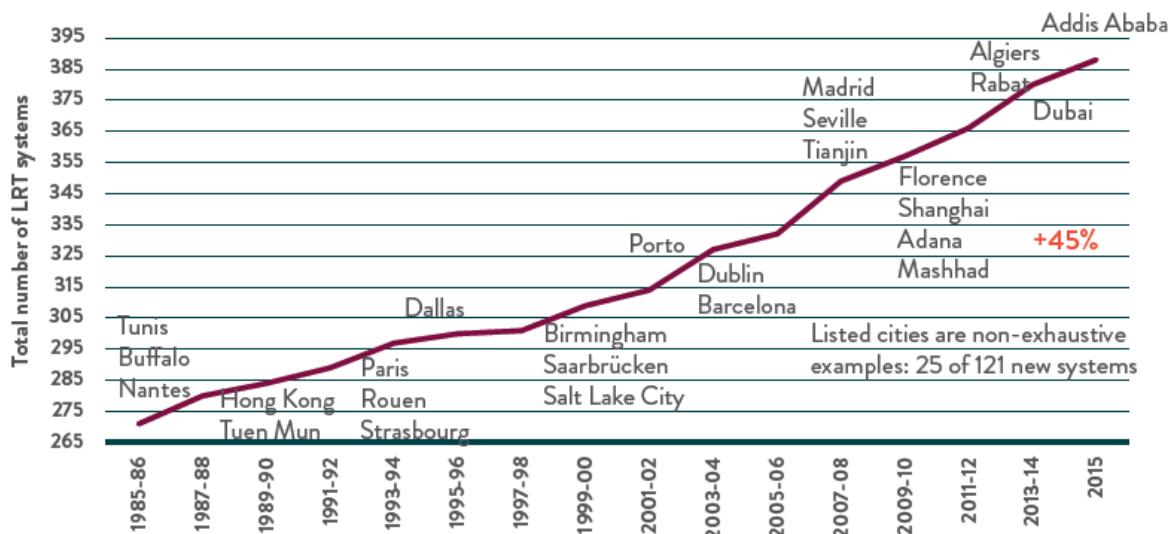


Figura 28 Nuevos sistemas de tren ligero en operación de 1985 a 2015. La gráfica muestra solo algunos ejemplos del total construido entre esos años (Fuente: Laurent & Mircea, 2015)

En el informe de la ERRAC (*The European Rail Research Advisory Council*, en inglés) del 2012 indica que en Europa contaban con 488 kilómetros de tren ligero en construcción y había más de 1086 kilómetros de vía planeados. También menciona que se contaban con 189 sistemas. Las

ciudades que contaban con mayor cantidad de sistemas de tren ligero eran: Alemania (64), Francia (19) y Polonia (14)

En un estudio realizado en 2015, Europa contaba con 8'941 kilómetros de vía, moviendo a 8'741 millones de pasajeros al año (Laurent & Mircea, 2015)

En el año 2009 había más kilómetros en construcción de LRT (488) que de Metro (391), también se estaban planeando más kilómetros de LRT (397) que de Metro (1086) En ese año el 86% de los sistemas europeos eran operados por compañías públicas, 5% operados por empresas privadas y 9% operado por empresas de participación mixta. La velocidad de operación promedio en Europa en este año era de 22.76 km/h. Irlanda registraba en promedio 35 km/h, mientras que el Reino Unido alcanzaba velocidades de 33 km/h, siendo los países con las velocidades más altas. La flota vehicular de ese año era de 20'273 vehículos (ERRAC & UITP, 2009)

Las principales ciudades con mayor cantidad de pasajeros año se encuentran en Europa. Budapest es la ciudad que encabezaba la lista en el 2015, con 396 millones de pasajeros (Figura 3.46) (Laurent & Mircea, 2015)

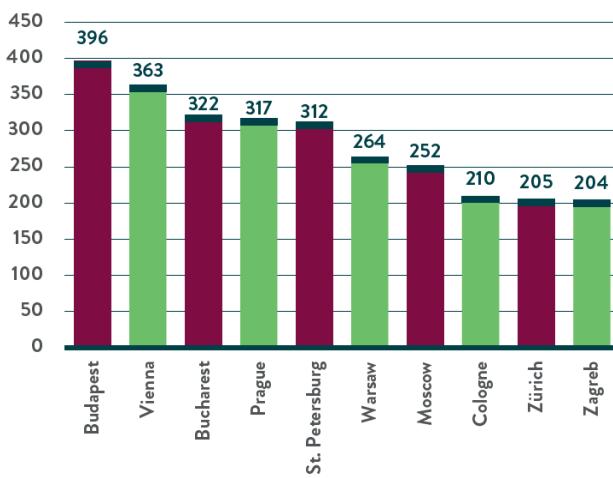


Figura 29 Las diez ciudades con la mayor cantidad de pasajeros al año, en millones (Fuente: Laurent & Mircea, 2015)

A pesar de que Latinoamérica es la región geográfica con la menor cantidad de sistema, es la región que, en promedio, cuenta con los corredores con mayor longitud, con una longitud promedio de 9.9 kilómetros. Norteamérica también cuenta con corredores de gran longitud, en promedio 9.6 kilómetros. Estos dos están muy por debajo de la tendencia mundial, de 6.7 kilómetros en promedio (Figura 3.47) Este fenómeno se puede explicar debido a que las ciudades europeas son más compactas (por eso la longitud de los sistemas es menor) y también son más densas (por eso la distancia entre las estaciones son menores) La longitud de los sistemas

también puede ser menor debido a que muchas veces varias líneas comparten la misma infraestructura (Laurent & Mircea, 2015)

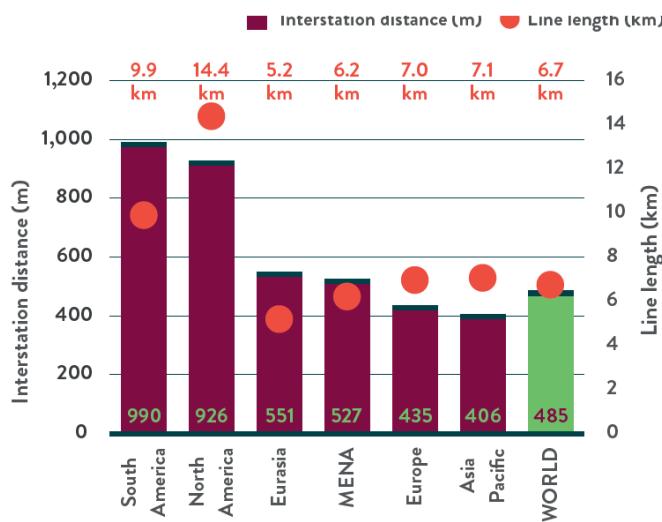


Figura 30 Gráfica que representa: en barras la distancia promedio entre las estaciones (en metros) y con puntos, la longitud promedio de los corredores (en kilómetros) MENA contiene a la región del Medio Oriente y África (Fuente: Laurent & Mircea, 2015)

De las diez ciudades que contaban con los corredores más concurridos, en el 2015, cinco también estaban dentro de la lista de las diez ciudades con la mayor cantidad de kilómetros (Budapest, San Petersburgo, Moscú, Kölن y Viena)

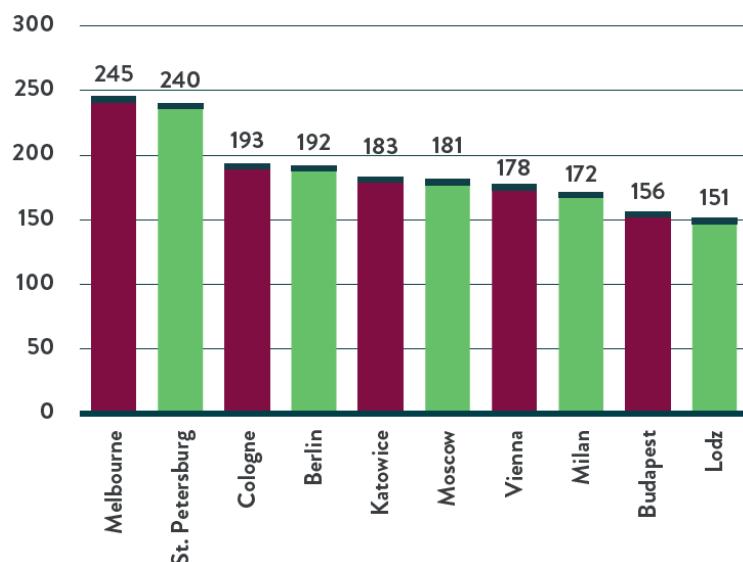


Figura 31 Gráfica en la que se encuentran las redes más largas de LRT por ciudad, en kilómetros (Fuente: Laurent & Mircea, 2015)

En cuanto a las redes más concurridas, Budapest es la única ciudad que se vuelve a repetir. En la lista de las primeras diez redes, se encuentran dos localizadas en Hong Kong (Tuen Mun y tram) Resalta también el caso de Tokio, que solo cuenta con una línea de tren ligero (Tōkyo Setagaya)

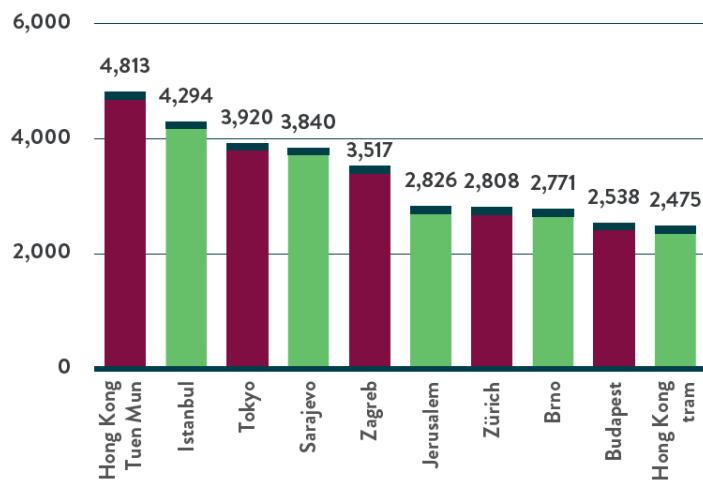


Figura 32 Gráfica con las redes más concurridas de LRT, miles de pasajeros por cada kilómetro (Fuente: Laurent & Mircea, 2015)

En Estados Unidos, en 2013, contaban con un total de 24 sistemas. El tren ligero, en ese mismo año, realizaba el 4.3% de todos los viajes del país (solo detrás del autobús regular, el tren [*heavy rail*, en inglés] y el tren de cercanías) El sistema realizó 458 millones de viajes, movió a 2,376 millones de pasajeros; en una distancia promedio de 5.6 kilómetros por viaje. El consumo eléctrico fue de 834.9 Kilowatt-hora. Los gastos operativos fueron de 5'017.19 millones de dólares, que representaba un 18% de los costos operativos totales de todos los modos de transporte urbano (Neff, 2015)

4.2.5 Tren Ligero en México

La historia del tren ligero en México tiene sus antecedentes en los tranvías, remontándose al año 1857. En ese año, se instalaron tranvías tirados por animales (utilizando mulas y caballos) que trasladaron pasajeros durante 11 meses, de manera provisional, entre las estaciones Tlatelolco y Villamil de ferrocarril, recorriendo una distancia de 1.8 kilómetros. En esa época los sistemas de ferrocarriles ya estaban consolidados. Se buscó la construcción de tranvías permanentes en tres ocasiones (1840, 1849 y 1852), pero ninguna tuvo un resultado favorable. Fue hasta el año de 1856 cuando el estadounidense George Louis Hammeken obtuvo la concesión para un tranvía que iría del Zócalo a Tacubaya (pasando por la Alameda, Plaza de Toros, Avenida de los Insurgentes, Avenida Oaxaca y Avenida Tamaulipas) Los vehículos se importaron de Estados Unidos, y la inauguración tuvo lugar el 1 de enero de 1858, en Guadalajara las operaciones

comenzaron hasta 1878, por la compañía norteamericana de John Stephenson y J.G. Brill. En 1865 comenzó operaciones una segunda compañía de tranvías, llamada Ferrocarril de Chalco, la cual también llegaba a Tacubaya (a través de Avenida Chapultepec) En 1869 se extendió esta línea, llegando a San Ángel y Tlalpan. Para 1890 la empresa Ferrocarriles del Distrito Federal había absorbido la mayoría de las empresas que operaban tranvías, contando con 3'000 mulas que movían 600 vehículos de tranvías. Los tranvías tirados por animales continuaron operando hasta 1932, cuando el vehículo 2133 hizo su último recorrido en la línea Granada. México fue uno de los primeros países en contar con sistemas de tranvías tirados por animales, estando a la vanguardia de transporte de las grandes ciudades de esos años (Morrison, 2003)

El siguiente paso en la evolución del transporte en México fue la electrificación de los tranvías tirados por caballo, situación que se presentó en el año de 1896. El primer tranvía eléctrico fue construido en la Ciudad de México, operando en la Hacienda de la Condesa, en Tacubaya. En ese mismo año, el 14 de abril, la empresa Compañía de Ferrocarriles del Distrito Federal obtuvo el permiso para la electrificación de todas las vías de tranvías, la empresa fue adquirida por empresas canadienses y europeas, las cuales se convirtieron en Tranvías Eléctricos de México, que estaría encargada de la construcción y operación de los tranvías eléctricos, por medio de la subsidiaria Compañía de Ferrocarriles del Distrito Federal. Después de la modernización, se abrieron seis nuevas líneas; para 1900 la Compañía de Ferrocarriles del Distrito Federal contaba con 97 kilómetros de ruta. Los tranvías eléctricos no solo funcionaba como transporte público urbano, también funcionaba como transporte funerario. En 1906, la Tranvías Eléctricos de México contaba con 178 vehículos de pasajeros, 44 vehículos fúnebres, 44 vehículos de tráiler, 72 vehículos de carga y 79 tráileres de carga, aún contaba con vehículos sin electrificar, incluidos ambulancias y vehículos de transporte de prisioneros. La innovación tecnológica se completó en 1909, cuando se estudiaron la construcción de dos líneas interurbanas: Huipulco-Puebla y Tacubaya-Toluca, la primera solo alcanzo a llegar a Tulyehualco (con una ampliación la línea de 11 kilómetros) y la segunda llegó a Las Ventas (con una extensión de la línea de 18 kilómetros), antes del estallido de la Revolución Mexicana que detuvo las operaciones hasta 1915 (Morrison, 2003)

Después de la Revolución, en 1917, la compañía Tranvías Eléctricos de México retomó control de las operaciones, en los años siguientes se dedicaron a la producción de vehículos en la estación de Indianilla. Durante la década de los años 20's México tuvo el mayor auge en su sistema de tranvías, contando con: 348.61 kilómetros de vías, 321 vehículos de pasajeros, 20 vehículos de pasajeros de tráileres sencillos, 82 vehículos de pasajeros de tráileres dobles, 43 vehículos de carga, 60 tráileres de carga, 29 vehículos funerarios y 27 tráileres funerarios; Guadalajara ya contaba con 110 tranvías y 98 kilómetros vías, Puebla y Veracruz también contaba con sistema de tranvías eléctricos (Morrison, 2003)

A partir de la década de 1930, el declive de los tranvías en México comenzó a tomar fuerzas. En 1932 cerró la línea Granda, y le siguieron, en 1934, la línea Tulyehualco (después de San Gregorio) y la línea Azcapotzalco-Tlalnepantla.

En 1945 comenzaron a existir problemas entre la compañía canadiense Tranvías Eléctricos de México y el gobierno mexicano. El gobierno mexicano acusaba a la compañía de mal servicio e incumplimiento de contratos, por lo que le confisca sus bienes y formó una nueva compañía, Servicio de Transportes Urbanos y Suburbanos, la cual operaría estos vehículos confiscados. Para 1952, la compañía mexicana se había reestructurado y se cambió el nombre a Servicio de Transportes Eléctricos, y compró la compañía canadiense en ese mismo año, teniendo la operación completa de trolebuses y tranvías en la Ciudad de México (Morrison, 2003)

La disminución de rutas y flota de tranvías en la Ciudad de México comenzó a ser más marcada a partir de un choque entre dos vehículos, en 1953, en la línea La Venta. Después del accidente la línea cerró, y meses después se cerraron las líneas Belén, Coyoacán, Iztapalapa, Lerdo y Tizapán. Para el año 1957, Servicio de Transportes Eléctricos abandonó el taller de Indianilla, y había cambiado la mayoría de los tranvías por trolebuses y vehículos PCC. El siguiente cambio fue en 1967, cuando se creó el Servicio de Transporte Colectivo Metro, y empezó la construcción de líneas de metro en donde empezaron las primeras líneas de tranvías, el gobierno dejó de invertir en tranvías y favoreció la inversión en metro. Se construyó el “circuito histórico” con un tranvía renovado, que recorría desde la Av. Cuauhtémoc hasta la Glorieta de Chilpancingo, este servicio dejó de operar en 1979. Durante varias años solo existieron dos líneas de tranvías, Xochimilco y Tlalpan, las cuales operaron hasta 1984; a partir de ese año, y durante dos años, México no contaba con servicios de tranvías o de trolebuses. En 1986 la STE reabrió las líneas de Taxqueña (de Taxqueña a Estadio Azteca) y Tlalpan (de Huipulco a San Fernando), con un nuevo sistema mejorado, creando el tren ligero. En 1988 regresó el servicio a Xochimilco, con las estaciones Francisco Goitia y Embarcadero (ahora Xochimilco) La línea de Tlalpan dejó de operar en 1900 (Morrison, 2003)

Actualmente, México cuenta con tres servicios de tren ligero: dos líneas en Guadalajara, una línea en la Ciudad de México y un tren turístico (con características de tren y tren ligero, de motor híbrido gasolina-electricidad) Puebla-Cholula; además, el tren ligero de Guadalajara inició dos proyectos, el primero es la ampliación de la línea uno, el segundo es la construcción de la tercera línea de tren ligero.

La ciudad de Guadalajara es la que cuenta con el servicio de tren ligero líder en el país., el nombre del sistema es Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR) El sistema inició operaciones en 1989, su línea 1 tiene una longitud de 15.5 kilómetros, de los cuales cuenta con 6.6 kilómetros de vía por túneles, el resto se hace de manera superficial, la vuelta completa se realiza en 63 minutos y el intervalo de paso en hora pico es de 5 minutos, mientras que en hora valle es de 7 a

9 minutos. La segunda línea tiene una extensión de 8.5 kilómetros, y fue inaugurada en 1994, la vuelta del circuito se realiza en 36 minutos, su intervalo de paso en hora pico es de 3 minutos y medio y en hora valle entre 6 y 7 minutos. La línea 1 y 2 cuenta con una flota de 48 vehículos, de modelos TEG-90 y TLG-88. La tercera línea tendrá una longitud de 21.45 kilómetros, y su recorrido conectará Zapopan, Guadalajara y Tlaquepaque, la capacidad de los vehículos será de 500 pasajeros y realizará su recorrido con una velocidad comercial de 39 km/h, el material rodante estará compuesto de trenes de diferentes marcas (CAF, ALSTOM, Bombardier y Siemens) La línea tres contará con viaductos elevados y túneles.

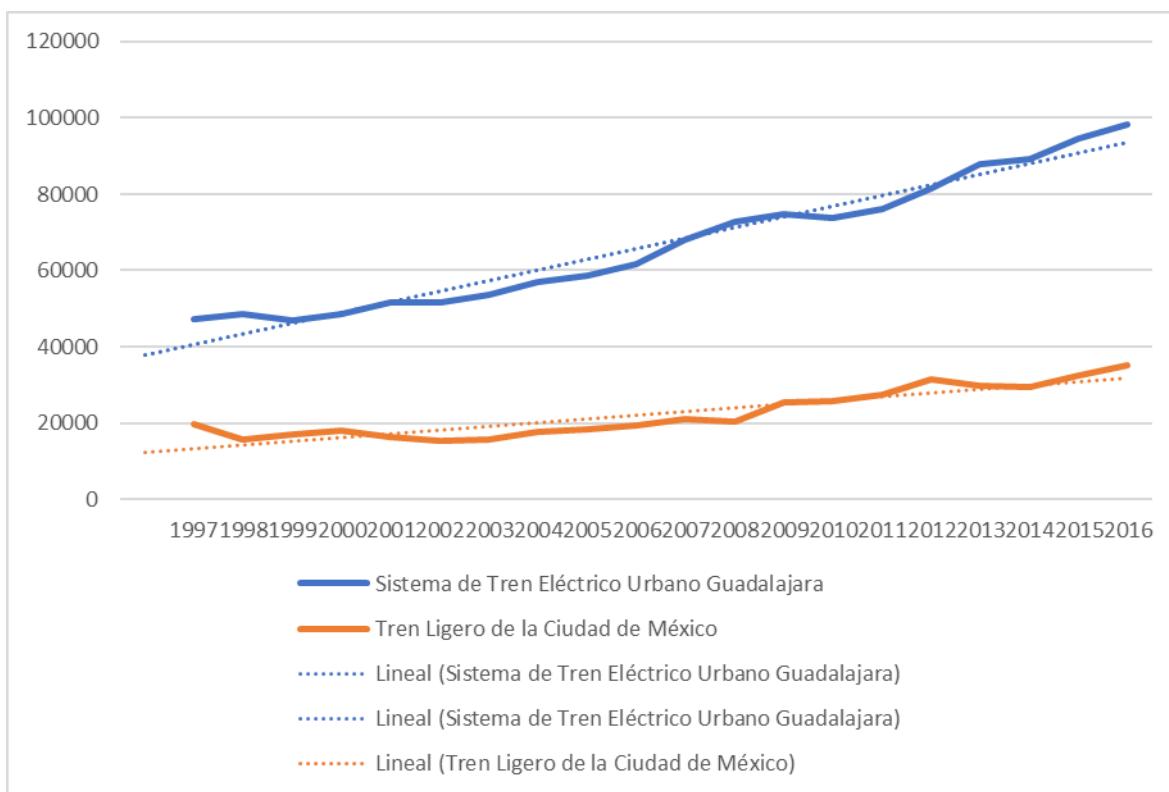


Figura 33 Evolución de la demanda de los últimos veinte años, en miles de pasajeros al año (1997-2016) La línea punteada representa sus respectivas tendencias con un ajuste lineal (Fuentes: Gobierno de la Ciudad de México. Servicio de Transportes Eléctricos. Sistema de Transporte Colectivo de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Dirección General del Sistema del Tren Eléctrico Urbano, a través de INEGI. Fecha de consulta: 05 de octubre del 2017. Elaboración propia)

En los últimos veinte años ambos servicios han presentado un incremento en la demanda. Al tener más líneas y una mayor capacidad, el Sistema de Tren Eléctrico Urbano Guadalajara presentó un incremento del 178% (de 1997 a 2016); por otra parte, el Tren Ligero de la Ciudad de México incrementó su demanda en un 48% (de 1997 a 2016) En el 2016 el Sistema de Tren Eléctrico Urbano, en sus dos líneas, registró 98'268,000 pasajeros, el Tren Ligero de la Ciudad de

México registró 35'061,000. De continuar la tendencia, en diez años el Sistema de Tren Eléctrico Urbano de Guadalajara podría llegar casi a los seis mil millones de pasajeros al año, y el de la Ciudad de México a los dos mil millones de pasajeros, situación que estaría limitada por su infraestructura, además la tendencia cambiaría llegando al límite de su capacidad. Lo que está claro es que ambos modos de transporte tenderán a incrementar su demanda en los años siguientes.

La longitud del Sistema de Tren Eléctrico Urbano de Guadalajara es casi doble del de la Ciudad de México, en cuestión de vehículos también cuenta casi con el doble. El sistema de la ciudad de Guadalajara claramente presenta un mayor servicio al de la Ciudad de México.

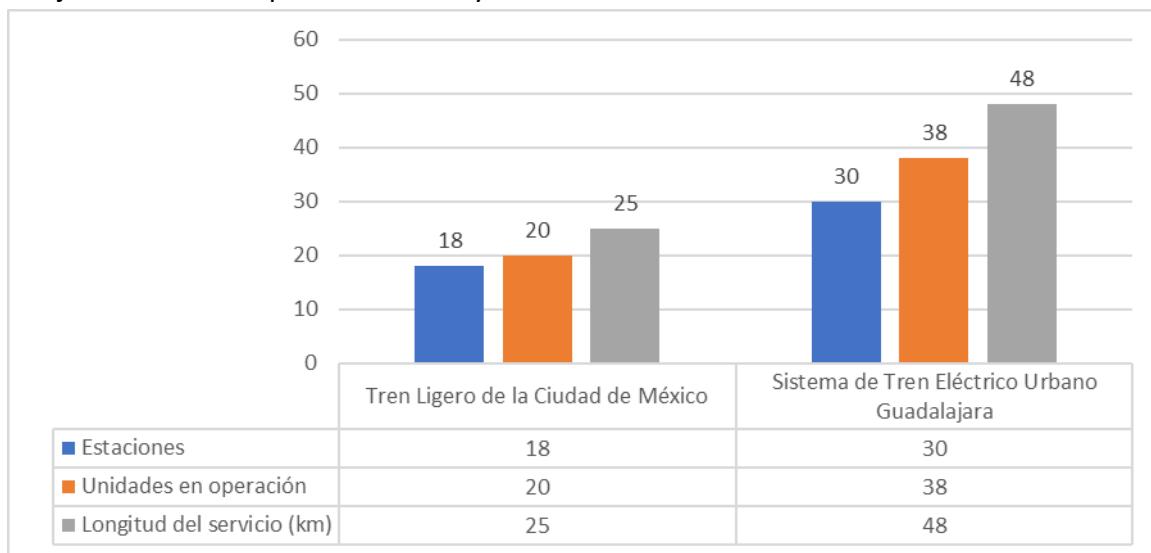


Figura 34 Características generales de los servicios de tren ligero en México (Fuentes: Gobierno de la Ciudad de México. Servicio de Transportes Eléctricos. Sistema de Transporte Colectivo de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Dirección General del Sistema del Tren Eléctrico Urbano, a través de INEGI. Fecha de consulta: 05 de octubre del 2017. Elaboración propia)

Al contar con una red mayor, y una flota más grande, el tren ligero de Guadalajara pudo recorrer una mayor cantidad de kilómetros. En el año 2016 recorrió 5.7 millones de kilómetros. El último mes, el tren ligero en México recorrió 477 mil kilómetros y 153 mil kilómetros, en Guadalajara y Ciudad de México respectivamente.

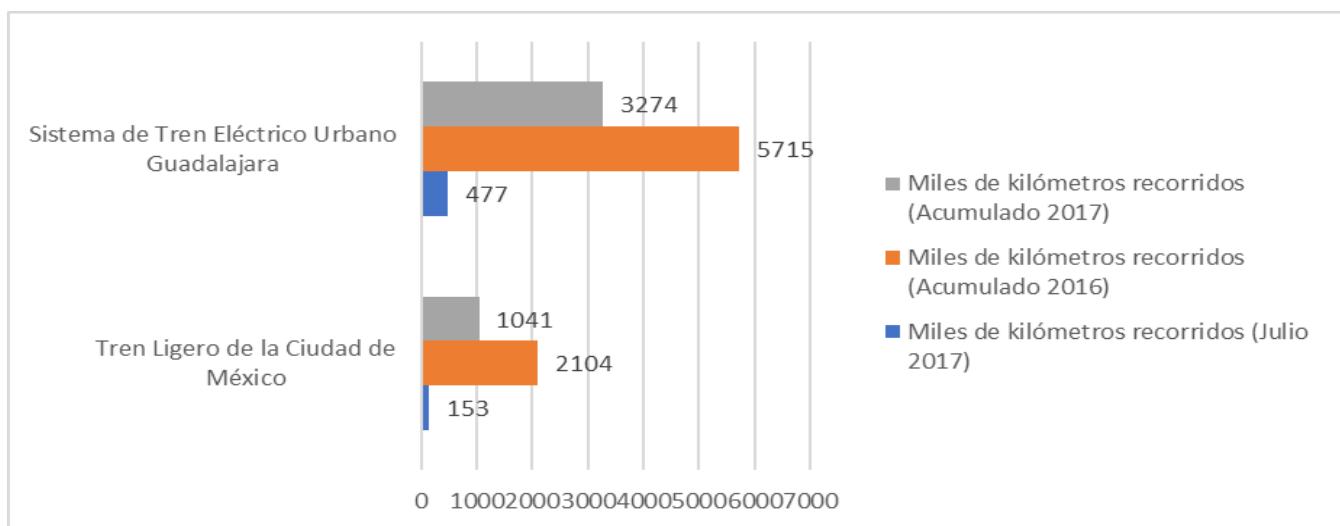


Figura 35 Cantidad de kilómetros recorridos en el último mes, el último año y el acumulado del 2017 (al mes de Julio), en miles de kilómetros (Fuentes: Gobierno de la Ciudad de México. Servicio de Transportes Eléctricos. Sistema de Transporte Colectivo de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Dirección General del Sistema del Tren Eléctrico Urbano, a través de INEGI. Fecha de consulta: 05 de octubre del 2017. Elaboración propia)

El servicio de tren ligero de Guadalajara cuesta \$7 (pesos mexicanos), mientras que el de la Ciudad de México cuesta \$3 (pesos mexicanos). Siendo mayor el costo del servicio, y la cantidad de pasajeros que usan el sistema, los ingresos del Sistema de Tren Eléctrico Urbano de Guadalajara son mayores al de la Ciudad de México. En 2016 tuvo un ingreso de \$475'000,000, un ingreso siete veces mayor al de la Ciudad de México. Para poder ingresar a ambos servicios se tiene que adquirir una tarjeta de prepago.

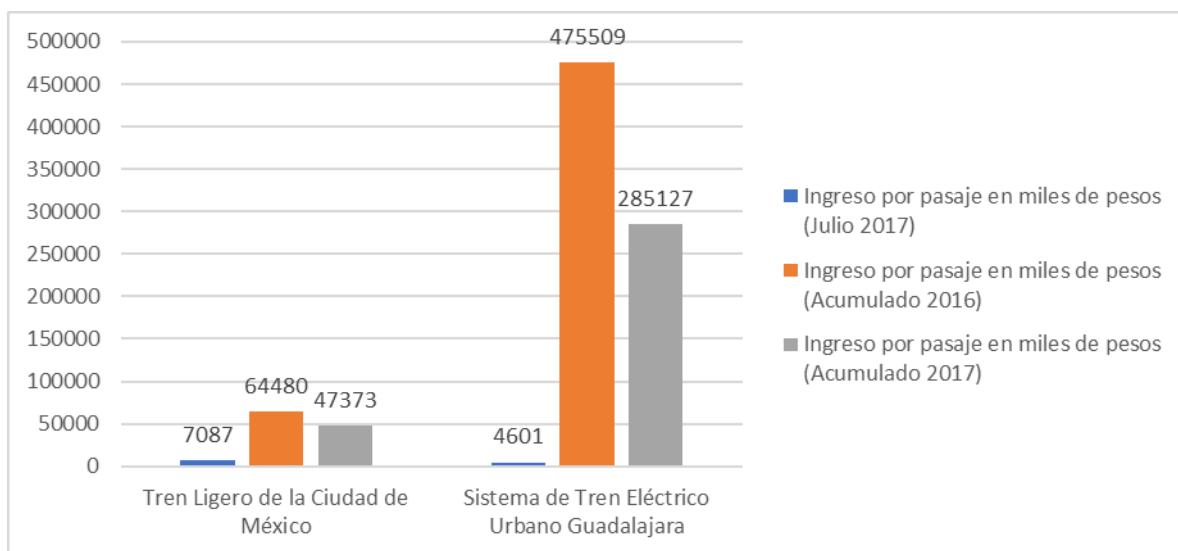


Figura 36 Ingresos de los sistemas de tren ligero, en el último mes, año y el acumulado del 2017 (a Julio), en miles de pesos (Fuentes: Gobierno de la Ciudad de México. Servicio de Transportes Eléctricos. Sistema de Transporte Colectivo de la Zona

Metropolitana de Guadalajara. Dirección General del Sistema del Tren Eléctrico Urbano, a través de INEGI. Fecha de consulta: 05 de octubre del 2017. Elaboración propia)

4.2.6 Tren Ligero de la Ciudad de México

El tren ligero de la Ciudad de México es un sistema que nació a partir de los tranvías que operaban en la ciudad, fue el único sistema que sobrevivió y logró realizar el salto para convertirse en un sistema de mayor nivel y características superiores.

Actualmente cuenta con un servicio de 13.04 kilómetros, recorriendo la ciudad a lo largo de tres delegaciones: Xochimilco, Tlalpan y Coyoacán. El sistema cuenta con dos estaciones terminales (Xochimilco y Tasqueña) y 16 estaciones intermedias.

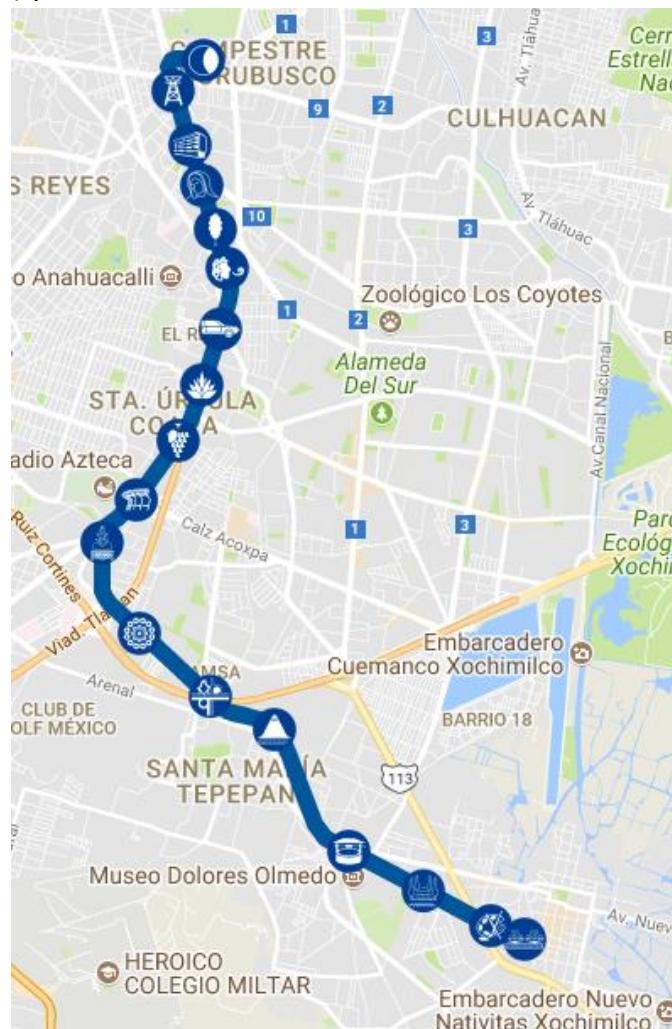


Figura 37 Red actual del Tren Ligero de la Ciudad de México (Fuente: Sistemas de Transportes Eléctricos)

La flota con la que cuenta la red es la siguiente:

Tabla 14 Flota de trenes en la línea de tren ligero de la Ciudad de México

Modelo	Empresa	Año de fabricación	Cantidad	Capacidad de pasajeros
TE-90	Siemens	1990	12	292
TE-95	Siemens	1995	4	292
TE-06	Siemens	2006	4	292
TE-12	Siemens	2012	4	292
	TOTAL		24	

Datos obtenidos de Sistemas de Transportes Eléctricos. Fuente: Elaboración propia. 2017

Las horas pico del sistema son de 06:00 a 09:00, en el horario matutino, en el horario vespertino son de las 17:01 a 21:00; las horas valle son de 09:01 a 17:00 horas. La tendencia es muy marcada, en la mañana la gente utiliza el servicio para ir a su trabajo y en las tardes para regresar a casa, esto se puede corroborar con las máximas demandas por sentido.

En el sentido Xochimilco-Tasqueña la máxima demanda horaria se presenta entre las 07:00 y las 08:00, con una demanda de 4,414 pasajeros; en el sentido Tasqueña-Xochimilco la mayor demanda horaria se presenta de 19:00 a 20:00 horas, con una cantidad de 3,740 pasajeros. Las estaciones en las que se presenta la mayor demanda son Xochimilco y Tasqueña.

La velocidad máxima de los trenes es de 70 km/h, la velocidad de operación es de 20.52 km/h (debido a las condiciones y trazo de las líneas), esto permite realizar el recorrido en 74 minutos, con un tiempo promedio de espera en las estaciones de 18 segundos.

La frecuencia de vehicular en hora pico es de 12 trenes por hora por sentido (un intervalo de paso de 5 minutos) y en hora valle es de 10 trenes por hora por sentido (con un intervalo de paso de 6 minutos)

La demanda máxima diaria promedio es de 93,914 pasajeros, aunque la capacidad de la línea es de 113,468 pasajeros en un día laborable. Aunque no está trabajando al límite de su capacidad, la línea presenta una saturación del 100% en sus horas de máxima demanda. Aunque en los últimos 20 años el incremento de la demanda ha sido del 48% en los últimos 10 años la demanda ha incrementado a un ritmo de 4.43%.

La línea de tren ligero en el último mes no presentó ningún incidente en el último mes. El único Sistema de Transporte Inteligente con el que cuenta la línea es una tarjeta de prepago, que es funcional para el Metro y el Metrobús.

Con un total de 24 unidades, y con un promedio de 14 corridas por hora, el consumo de energía eléctrica fue el siguiente:

Tabla 15 Consumo de energía en los trenes, en el último mes y por corrida

Consumo de Energía en kWh (Agosto 2017)	Consumo de energía en kWh, por corrida promedio (14 corridas promedio) (Agosto 2017)
507,212	36,229.42

Datos obtenidos de Sistemas de Transportes Eléctricos. Fuente: Elaboración propia. 2017

La línea cuenta con 7 subestaciones eléctricas rectificadoras, a las cuales les es suministrada la energía por parte de la Comisión Federal de Electricidad.

El gasto por consumo eléctrico fue el siguiente:

Tabla 16 Facturación eléctrica en pesos

Agosto 2017	Anual 2016
\$1'119,681.00	\$12'166,766.00

Datos obtenidos de Sistemas de Transportes Eléctricos. Fuente: Elaboración propia. 2017

El reporte de costos en la línea fue el siguiente:

Tabla 17 Costos del último mes y año del Tren Ligero de la Ciudad de México

	Costo de operación	Costo de mantenimiento
2016 (Enero-Diciembre)	\$71,308,047.47	\$73,902,172.16
2017 (Septiembre)	\$3,965,801.28	\$4,149,597.03

Datos obtenidos de Sistemas de Transportes Eléctricos. Fuente: Elaboración propia. 2017

La línea de tren ligero de la Ciudad de México actualmente no cuenta con ningún proyecto de expansión o de creación de alguna nueva línea, tampoco se cuenta con algún proyecto de mantenimiento a la línea.

4.2.7 Plan Maestro del Tren Ligero. Revisión 1996

El Plan Maestro del Tren Ligero es una herramienta de planeación elaborada en 1996, por la entonces Secretaría de Transportes y Vialidad, en colaboración técnica con la empresa privada ICA Ingeniería, S.A. de C.V.

Este documento identifica que, en esos años, la situación del transporte ya era crítica, se identificaba que el transporte privado no podría satisfacer las necesidades de movilidad de la población, por lo que era necesario empezar a desarrollar proyectos de transporte masivo; por lo tanto, se empezaron a diseñar proyectos de ampliación y de construcción de las líneas de metro y tren ligero.

Se creó una red de corredores de líneas de Metro y Tren Ligero con un horizonte a 2020, en los cuáles se analizaron los siguientes atributos: captación global y por línea, descongestionamiento y redistribución de líneas actuales, congruencia con los programas de desarrollo urbano y ecología, población beneficiada, ahorro en horas –hombre, población beneficiada, costo del viaje/km construido, impacto social y económico.

El documento consideraba al tren ligero como un servicio de baja capacidad, con una capacidad de 15,000 pasajeros/hora/sentido.

La situación del transporte en la Ciudad de México era la siguiente:

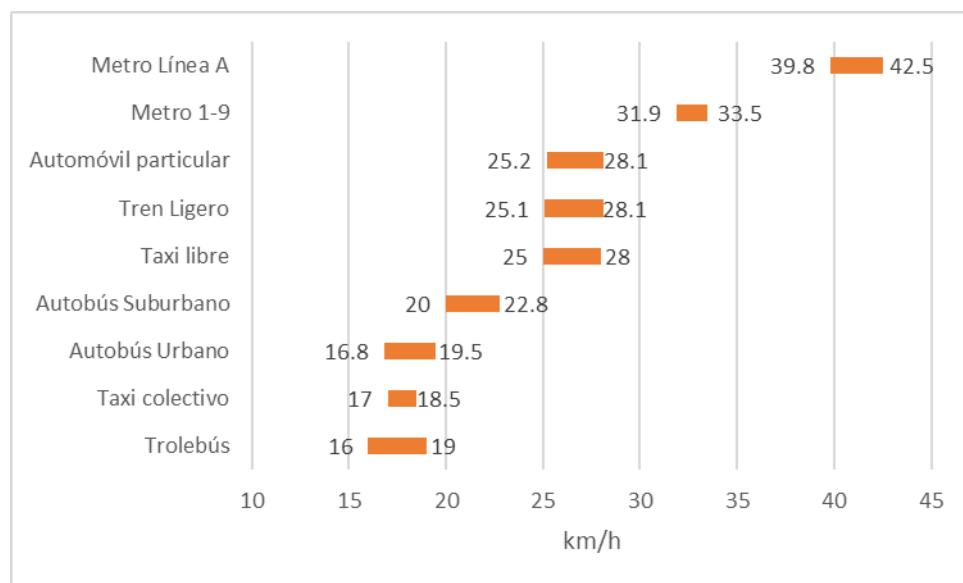


Figura 38 Velocidad de operación de los diferentes modos de transporte urbano en la Ciudad de México, en 1994 (Fuente: Plan Maestro del Metro y Tren Ligero. Revisión 1996, p. 20)

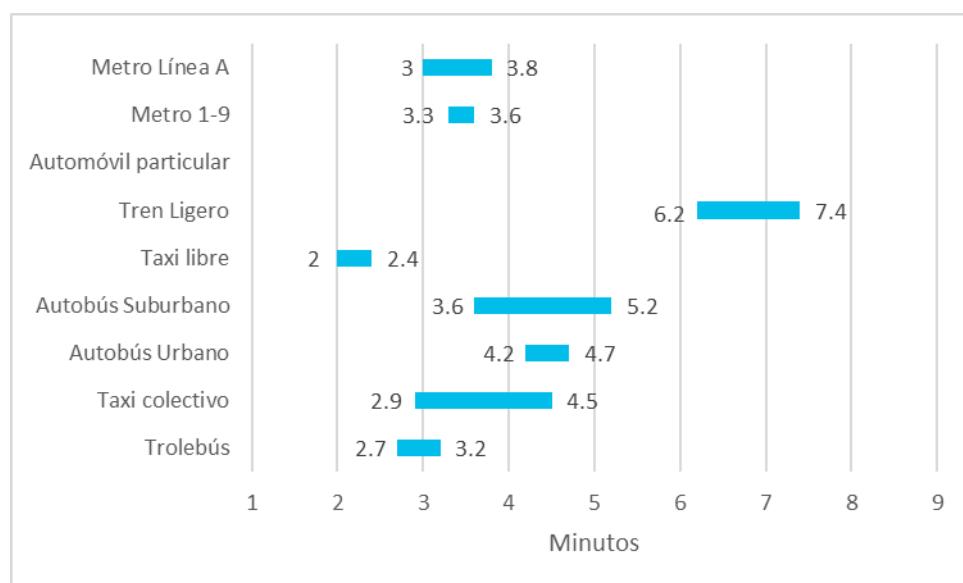


Figura 39 Intervalo de paso de los diferentes modos de transporte urbano en la Ciudad de México, en 1994 (Fuente: Plan Maestro del Metro y Tren Ligero. Revisión 1996, p. 20)

Para la obtención de los parámetros que servirían como base de las nuevas líneas a implementar se realizó una encuesta Origen-Destino (EOD-94) El tiempo promedio de viaje era de una hora. Parte del trabajo fue realizar un pronóstico con horizonte al año 2020, en este análisis se determinó que velocidad promedio iría disminuyendo paulatinamente, hasta llegar a un rango entre los 15 y 20 km/h.

Con base en los estudios de diagnóstico demográfico, urbano y de movilidad se definió una red de corredores urbanos para integrar la red de Metro y Trenes Ligeros para el año 2020. Se eligieron 54 corredores en un principio, después se realizó una modelación de distribución de demanda futura la cual redujo la red a 27 líneas para el año 2020. Estas nuevas líneas serían implementadas en tres horizontes: 2000, 2006 y 2020.

Después de varias simulaciones y procesos iterativos en la red, se determinó que la propuesta final de sistema para el año 2020 quedaría definido de la siguiente manera:

Tabla 18 Red de Metro y Tren Ligero del Plan Maestro Revisión 1996

Línea	Origen-Destino	Kilómetros de servicio
Metro con rueda neumática (STC)		
1	Observatorio-Pantitlán	16.654
2	Cuarto Caminos-Tasqueña	20.712
3	Indios Verdes-Ciudad Universitaria	21.279
4	Santa Clara-Santa Anita	14.869
5	Tlalnepantla-Pantitlán	20.284
6	El Rosario-Villa de Aragón	17.049
7	El Rosario-San Jerónimo	22.274
8	Indios Verdes-Acoyapa	27.093
9	Observatorio-Pantitlán	14.493
10	Eulalia Guzmán-Cuicuilco	18.640
11	Santa Mónica-Bellas Artes	19.965
12	Santa Lucía-Constitución de 1917	16.622
13	Parque Naucalli-San Lázaro	17.485
B	Hipódromo-Ciudad Azteca	27.736
Metro con rueda metálica (STC)		
A	Pantitlán-La Paz	14.649
B	Cuautitlán Izcalli-El Rosario	24.900
D	Coacalco/Ojo de Agua-Santa Clara	27.275
Tren Ligero (STE)		
T-1	Taxqueña-Embarcadero	14.005
T-2	Constitución de 1917-Chalco	23.840
T-3	Villa de Aragón-Emisora	16.760
T-4	Olivar del Conde-E.	17.130

Constitucionalista		
T-5	Pantitlán-Degollado	14.550
T-6	Pantitlán-Estadio Neza 86	10.560
T-7	Atizapán-El Rosario	9.985
T-8	Estadio México 68-Emisora	13.380
T-9	E. Constitucionalista-Estadio Neza	9.205
	86	
T-10	Pirámides-Ciudad Azteca	11.105
	Red de Metro	342.429
	Red de Trenes Ligeros	140.520
	Total	482.949

Datos obtenidos de *Plan Maestro del Metro y Trenes Ligeros. Revisión 1996*. Fuente: Elaboración propia. 2017

Para la implementación de las líneas se consideraron cuatro alternativas factibles y previamente aplicadas en la Ciudad de México: elevada, superficial, subterránea y túnel.

La red completa quedaría configurada de la siguiente manera:

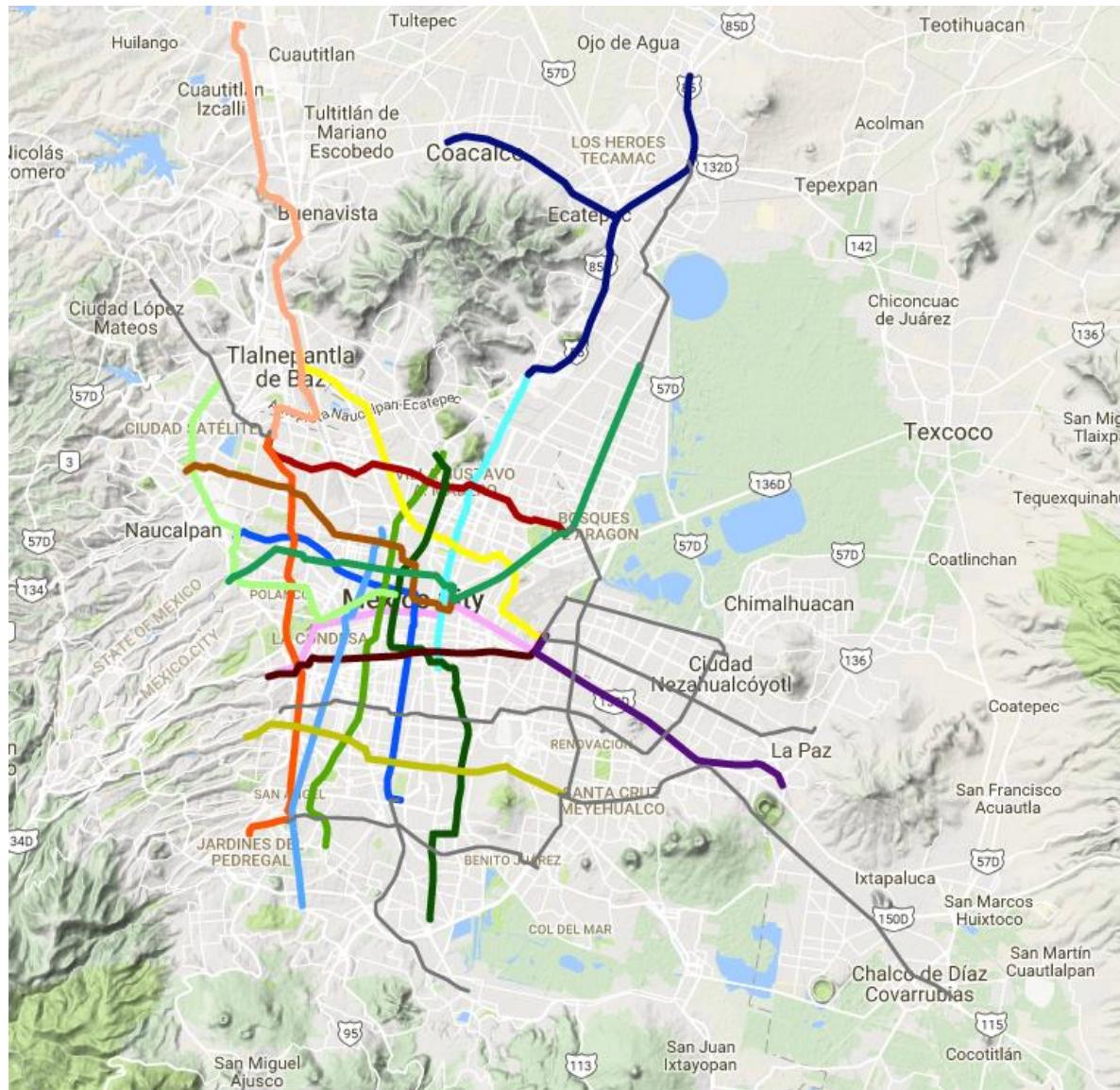


Figura 40 Esquema de las líneas proyectadas en el Plan Maestro de Metro y Trenes Ligeros. Revisión 1996. Las líneas de metro están representadas por líneas de color y de mayor grosor, las líneas de tren ligero están representadas por líneas más delgadas y de color gris (Fuente:

https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=17hL1gZuxdWTJtkKxS4Tb9iy3_IQ&hl=en_US&ll=19.546995179265814%2C-99.01564097314451&z=12 Consultado: 16/10/2017)

De toda la red nos interesan las 10 líneas de tren ligero, y la línea 10 del Metro, que estaba planeada para recorrer toda la Avenida de los Insurgentes, en donde se encuentre ahora la línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México.

Tabla 19 Línea 10 del Metro y las diez líneas del tren ligero, características proyectadas

Línea	Pendientes	Interferencias con líneas	Estructuras factibles
10	±1% Hasta el estadio México 68 y 2% en el resto del recorrido	Líneas del Metro: 1, 2, 7, 9, 13 y B Líneas del Tren Ligero: T-4 y T-8	Subterránea, subterránea profunda y superficial
T-2	Menores al 2%	Líneas del Metro: 12 y A Líneas del Tren Ligero: T-3	Superficial y elevada
T-3	Menores al 2%	Líneas del Metro: 6 y 12 Líneas del Tren Ligero: T-2, T-4, T-6 y T-8	Subterránea y superficial
T-4	Cercanas al 2%	Líneas del Metro: 2, 3, 7 y 8 Líneas del Tren Ligero: T-9	Subterránea
T-5	Entre ±1%	Líneas del Metro: 1, 5, 9 y A Líneas del Tren Ligero: T-3, T-6 y T-9	Superficial
T-6	Menores al 1%	Líneas del Metro: 1, 5, 9, y A Líneas del Tren Ligero: T-3, T-5 y T-9	Superficial
T-7	Máxima del 6%	Líneas del Metro: 6, 11 y C	Elevada, túnel y subterránea
T-8	Menores al 2%	Líneas del Metro: 3, 7, 8 y 10 Líneas del Tren Ligero: T-1	Subterránea y profunda
T-9	Menores al 1%	Líneas del Metro: A	Superficial

		Líneas del Tren Ligero: T- 4, T-5 y T-6	
T-10	Aproximada al 1%	Líneas del Metro: B y D	Superficial

Datos obtenidos de *Plan Maestro del Metro y Trenes Ligeros. Revisión 1996*. Fuente: Elaboración propia. 2017

El mapa de estas líneas de tren ligero y la línea 10 del metro es el siguiente:

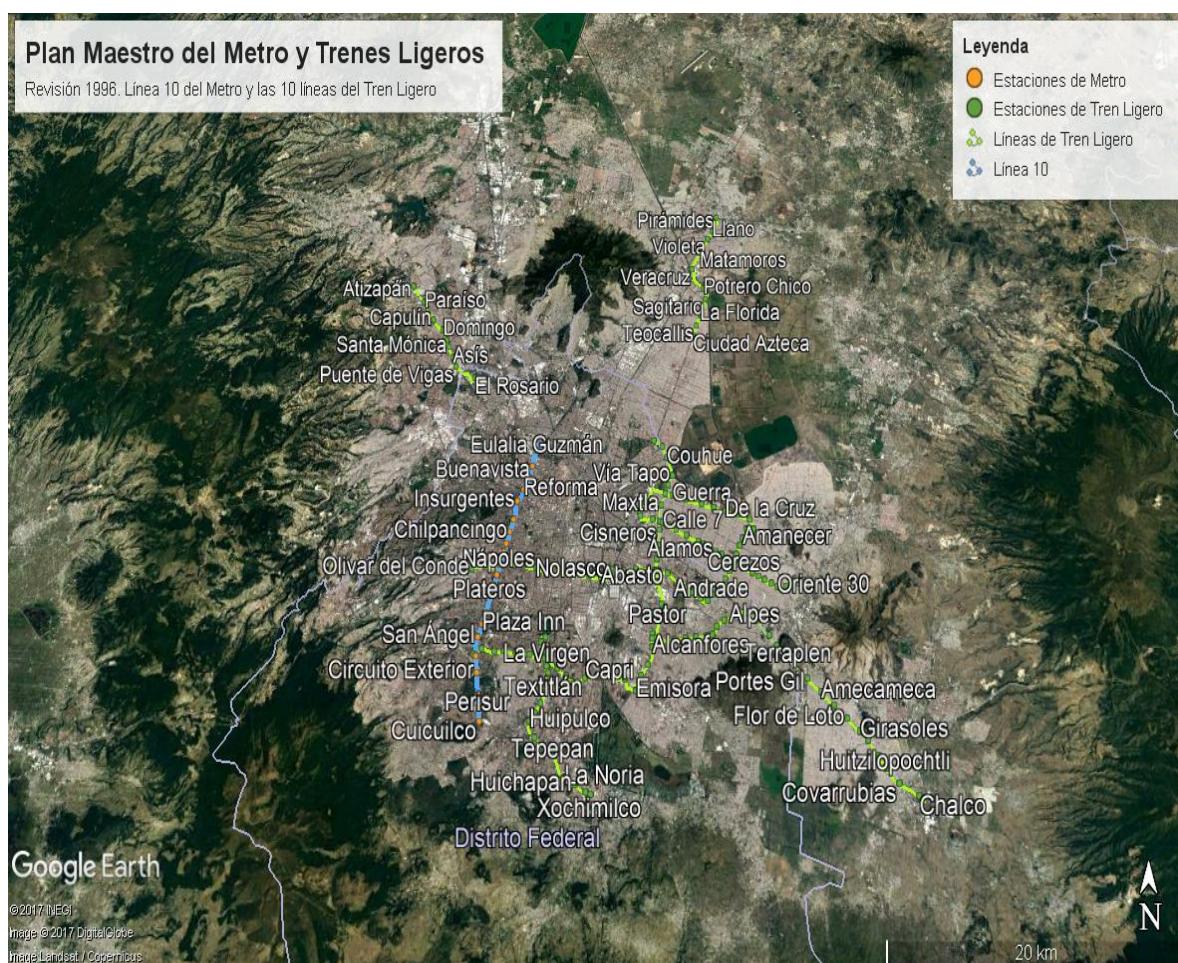


Figura 41 Mapa de la línea 10 del Metro y las diez líneas del tren ligero, del Plan Maestro del Metro y Trenes Ligeros. Revisión 1996 (Elaboración propia)

Los vehículos tendrían las siguientes capacidades:

- Metro de rueda metálica y neumática: Hasta nueve carros con capacidad de 1500 pasajeros
- El tren ligero, convoy de hasta tres carros con capacidad de 675 pasajeros. Los vehículos tendrían rueda metálica y la toma de corriente sería mediante una catenaria.

La red de trenes ligeros contaría con talleres de pequeña revisión en las estaciones Santa Clara, Emisora y Atizapán, el taller de grandes revisiones se localizaría en la Terminal Ejército Constitucionalista. Se planeó una subestación en cada estación de 45 KVA, y una de 2000 KVA cada 1200 metros.

Tabla 20 Línea 10 del Metro y las diez líneas del tren ligero, características operativas

Línea	Velocidad comercial (km/h)	Intervalo (segundos)	Número de trenes
1	35	200	23
T-2	30	120	45
T-3	35	230	20
T-4	30	210	21
T-5	30	150	28
T-6	30	170	26
T-7	30	225	11
T-8	30	280	13
T-9	30	240	12
T-10	30	270	12
Total de trenes en la red de Tren Ligero (contando la línea 1)			204

Datos obtenidos de Plan Maestro del Metro y Trenes Ligeros. Revisión 1996. Fuente: Elaboración propia. 2017

La construcción de la línea 10 del metro quedó planeada su construcción para el año 2006, cuando se terminará su construcción la red tendrá una longitud de 232.460 metros y su capacidad sería de 7'532,572 pasajeros diarios, y 903,909 pasajeros en la hora de máxima demanda.

Las líneas de tren ligero estaban planeadas para un horizonte de construcción al año 2020.

5. COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS DE AUTOBUS DE TRÁNSITO RÁPIDO Y TRENES LIGEROS

En el siguiente capítulo se desarrollará la comparativa entre dos modos de transporte urbano de capacidad media, los autobuses de tránsito rápido y los trenes ligeros. La comparativa estará enfocada a dos sistemas implementados en la Ciudad de México, la línea 1 del Metrobús y el Tren Ligero, debido a la accesibilidad de los parámetros técnicos-operativos de ambos servicios.

La finalidad de esta comparativa es poder encontrar, de manera cualitativa, una calificación global (que incluye todas las características, atributos y costos) que permita decidir cuál modo de transporte se desempeña de mejor manera, y bajo qué circunstancias, en el medio urbano de la Ciudad de México.

El modelo estará integrado por cinco categorías: características de los sistemas de transporte de capacidad media, desempeño del sistema, impactos, nivel de servicio y costos, los cuales están

integrados por diferentes componentes. La tabla 21 resume las características y sus respectivos componentes a comparar.

Tabla 21 Características y componentes de la comparativa

Característica	Componente
Características de los sistemas de transporte urbano de capacidad media	Derecho de vía Capacidad de los vehículos
Desempeño del Sistema	Frecuencia del Servicio Velocidad de operación Confiabilidad Seguridad Capacidad de la línea Capacidad productiva Productividad Utilización Flexibilidad Densidad Energía
Impactos	Impactos sociales Impactos económicos Emisiones
Nivel de Servicio	Calidad del Servicio Precio
Costos	Costos de Inversión Costos de Operación Costos de Emisiones Costos Totales Anuales Análisis de Sensibilidad

La integración matemática de estos componentes está representada por la siguiente fórmula, la cual determinará la calificación de cada modo de transporte:

$$\text{Calificación general} = \alpha_1 CCM + \alpha_2 DS + \alpha_3 I + \alpha_4 NS + \alpha_5 Co$$

Donde:

CCM: Calificación de las Características de los Sistemas de Transporte Urbano de Capacidad Media

DS: Calificación obtenida del Desempeño del Sistema

I: Calificación obtenida de los Impactos

NS: Calificación obtenida de Nivel de Servicio

Co: Calificación obtenida de los Costos

Considerando a autores como Vuchic, V. (2007) y Vibhuti, A. (2008) que enfatizan que cualquier comparativa entre modos de transporte debe considerar todos los aspectos de una manera integral, y no haciendo un énfasis en alguna característica específica, se decidió proporcionar a cada característica una ponderación igual (definiendo un mismo valor para los valores de α_n), integrándolo en una calificación máxima de 1; por lo tanto, el modelo matemático quedaría definido de la siguiente manera:

$$1.00 \geq \alpha_1 CCM + \alpha_2 DS + \alpha_3 I + \alpha_4 NS + \alpha_5 Co$$

Donde:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n = 0.20$$

Por lo tanto:

$$1.00 \geq 0.20 CCM + 0.20 DS + 0.20 I + 0.20 NS + 0.20 Co$$

Como se aprecia en la ecuación anterior, la calificación en la comparativa para cada modo de transporte estará acotada a un máximo de 1.00; además, cada característica tendrá un valor máximo de 0.20, la cual se obtendrá dependiendo de sus componentes.

El mejor modo de transporte urbano de capacidad media, en las condiciones de estudio y con las características señaladas en esta investigación, será el que obtenga la calificación más alta, más cercana a 1.00.

5.1 Características de los sistemas de transporte urbano de capacidad media

La relación desempeño-capacidad es la característica principal para agrupar a los diferentes sistemas de transporte, y la que permite conocer la clasificación de los sistemas de transporte de capacidad media, a la cual pertenecen los autobuses de tránsito rápido y los trenes ligeros.

El derecho de vía y la capacidad son los principales parámetros que influirán en la relación desempeño-capacidad; aunque el parámetro de servicio también influye en el desempeño del sistema de transporte no fue considerado para esta clasificación, ya que el servicio que ofrecerán es función del lugar y las características de donde será implementado, no es intrínseco del sistema de transporte. Por otro lado, las características tecnológicas se han dejado de lado, debido a que no influyen directamente en la capacidad-desempeño del vehículo, son factores que no son determinantes en esta relación.

Ambos componentes son igual de importantes; sin embargo, para esta comparativa se decidió darle una mayor prioridad a la capacidad de los vehículos, debido a que en el ámbito urbano el objetivo es mover la mayor cantidad de pasajeros; además, se parte de la base de que siendo ambos modos de transporte urbano de capacidad media tienen que tener una priorización en su derecho de vía, teniendo como mínimo un derecho de vía tipo B en la mayor parte de su recorrido. Para esta sección se decidió darles los siguientes valores a los componentes:

Tabla 22 Componentes e indicadores de las características de los sistemas de transporte de capacidad media

Característica	Indicador	Componente	Indicador
Características de los sistemas de transporte de capacidad media	0.2	Derecho de vía	0.4
		Capacidad de los vehículos	0.6

Por lo tanto, el valor de las características de los sistemas de transporte de capacidad media queda definido de la siguiente manera:

$$CCM = \beta_1 DV + \beta_2 CV$$

Con los valores de los respectivos indicadores propuestos para esta tesis:

$$1.00 \geq CCM = 0.4DV + 0.6CV$$

Donde:

CCM: Calificación de las Características de los Sistemas de Transporte Urbano de Capacidad Media

DV: Calificación del Derecho de Vía

CV: Calificación de la Capacidad de los Vehículos

La calificación máxima de esta característica será menor o igual a 1, la cual después será modificada por el indicador α_n .

5.1.1 Derecho de vía

Un derecho de vía de mayor categoría permitirá tener una mayor confiabilidad del sistema, velocidad de operación, atracción de pasajeros y una mejor imagen ante la población. El tránsito en un sistema de transporte urbano de capacidad media es, primordialmente, por medio de un derecho de vía tipo B; por eso, para integrar la calificación del derecho de vía se decidió utilizar como cien por ciento un derecho de vía tipo B, el cual será asignado en caso de que el sistema cuente con un derecho de vía tipo B en todo su recorrido, y solo podrá ser afectado en caso de que presente invasión en su derecho de vía por parte del tránsito mixto. Para el caso de que el sistema cuente con un derecho de vía tipo A o C, se utilizará las ecuaciones que se presentan en la tabla 21, las cuales están en función del porcentaje de derecho de vía tipo A o C con el que cuente el sistema, en caso de que cuente con un porcentaje de derecho de vía tipo C se disminuirá la calificación hasta alcanzar un mínimo de 0.5 (en caso de que el cien por ciento del derecho de vía del sistema sea tipo C), en caso de que cuente con un porcentaje de derecho de vía tipo A se incrementara su calificación hasta que alcance un máximo de 1.20 (en caso de que el cien por ciento del derecho de vía del sistema sea tipo A). En caso de que el sistema cuente con derecho de vía tipo A, B y C, se utilizará el promedio de los resultados de las ecuaciones del derecho de vía tipo A y C.

Los valores elegidos para determinar el indicador del derecho de vía son:

Tabla 23 Valores del indicador derecho de vía

Derecho de vía	Valor (DV)
A	$DV = 0.002 \%A + 1.00$
B	1.0
C	$DV = 1.00 - 0.005 \%C$

%A: Porcentaje de derecho de vía tipo A en el sistema, expresado en cien por ciento.

%C: Porcentaje de derecho de vía tipo C en el sistema, expresado en cien por ciento.

La línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México ha optado por un derecho de vía tipo B en su totalidad, con una separación física semipermanente a base de pequeños bordos que identifican al carril del Metrobús como de tránsito exclusivo; además, se han desarrollado políticas para multar a los vehículos privados que invadan su carril de tránsito. El sistema no cuenta en ninguna parte de su recorrido con alguna infraestructura que la separe totalmente del resto del tránsito; por lo tanto, no se utilizará la ecuación de derecho de vía tipo A.



Figura 42 Separación de vía tipo B en el Metrobús de la Ciudad de México (Fuente: Notimex. 29 de julio del 2016. Elaboración propia)

El sistema cuenta con tramos en los que opera con el tránsito mixto, debido a las condiciones de la avenida de los Insurgentes que fue necesaria la adecuación de giros a la izquierda para el tránsito mixto (en Loreto y Eje 10); sin embargo, su distancia total es menor al 1% del total de la ruta, por lo que fueron despreciados para este cálculo, considerando, en un principio, otorgarla la calificación de 1.00 para derecho de vía tipo B.

Uno de los principales problemas de este tipo de separación de vía es que, aunque existe la barrera física que divide el sistema del resto del tránsito es muy fácil de poder invadir el carril del sistema BRT, esto demerita la imagen del sistema, puede retrasar las operaciones y ser causante de accidentes. Aun con las medidas para prohibir la invasión al carril exclusivo del Metrobús, durante las horas pico es una práctica común por parte de los conductores de vehículos privados. Por esta razón, se ha decidido disminuir a 0.80 la calificación del derecho de vía para el Metrobús.



Figura 43 Vehículo privado invadiendo el carril del Metrobús en la Ciudad de México (Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=L49hdmVtOls>)

En el caso del sistema LRT de la Ciudad de México, también operan con derecho de vía tipo B, aunque implementando una segregación de mayor nivel para evitar las invasiones en su vía, ya sea por medio de pequeños muros de contención o por medio de banquetas que aíslan el sistema. Esta segregación permite que no se pueda invadir su vía por medio del tránsito mixto. Ya que el sistema de Tren Ligero de la Ciudad de México cuenta con un derecho de vía tipo B a lo largo de todo su recorrido, y el tipo de infraestructura con el que cuenta no permite invasión a su vía, se ha decidido otorgarle el valor de 1.00.



Figura 44 Separación de vías del resto del tránsito en el Tren Ligero de la Ciudad de México (Fuente: El Universal. Foto por Ramón Romero)

En la siguiente tabla se presenta los valores que cada sistema obtuvo para el derecho de vía.

Tabla 24 Valores de Derecho de Vía para BRT y Tren Ligero

Sistema de transporte	Derecho de vía (DV)
Tren Ligero de la Ciudad de México	1.00
Línea 1 del Metrobús	0.80

5.1.2 Capacidad de los vehículos

La capacidad de los vehículos estará medida por dos factores:

1. La cantidad de vehículos privados equivalentes que podrían retirar del tránsito de las calles por cada vehículo y el total de su flota, para cada sistema de transporte. Para esto se utilizará una tasa de ocupación vehicular promedio de 1.2 personas por vehículo privado (ONU-Hábitat, 2015)
2. La cantidad de flota vehicular existente en comparación de la flota vehicular estimada, utilizando la ecuación de Hsu & Wu para el cálculo de flota vehicular para trenes ligeros y autobuses de tránsito rápido (2008)

Para ambos escenarios se utilizará el mayor valor como el 100% de calificación, el resultado menor obtendrá su calificación en proporción del mayor; finalmente, el valor total de la capacidad se obtendrá como un promedio de ambas calificaciones.

La capacidad de los vehículos depende del fabricante y del modelo del vehículo; sin embargo, para los autobuses de tránsito rápido se ha estandarizado, en general, la capacidad. Para los autobuses articulados una capacidad de 160 pasajeros y para los biarticulados una capacidad de 240 pasajeros. Los vehículos del Metrobús de la Ciudad de México cuentan con esas capacidades, su flota está conformada de la siguiente manera:

Tabla 25 Flota vehicular de la línea 1 del Metrobús

Empresa	Modelo	Tipo de Autobús	
		Articulado (160 pasajeros)	Biarticulado (240 pasajeros)
CISA	VOLVO B12M	61	
	VOLVO B10	7	
	VOLVO 7300	15	5
	DINA	15	
VYC	VOLVO 7300	5	14
	SCANIA	30	
SM1	MERCEDES	12	
	VOLVO 7300	14	17
RECSA	VOLVO 7300	21	7
	SCANIA MEGA		3
CE4-17MSA	VOLVO 7300		10
Total, por tipo de Autobús		180	56
TOTAL			236

La flota de la línea del Tren Ligero de la Ciudad de México se presentó en la Tabla 14, donde se indicaba que se contaba con una flota de 24 trenes, con una capacidad de 292 pasajeros por vehículo.

Para el cálculo de la flota total se utiliza la fórmula de Hsu & Wu (2008):

$$N = \frac{p \left\{ T_B + \left[2 \left(2 \left(\frac{p}{m} \right) h t_p + \left(\frac{t_t}{60} \right) \right) \right] \right\}}{C_v \alpha}$$

Donde:

N : Número de vehículos

p : Pasajeros por hora por sentido

T_B : Tiempo de ida y vuelta en derecho de vía tipo B

m : Número de autobuses y trenes por estación

h: Frecuencia

t_p: Tiempo de alineamiento o ascenso de pasajeros

t_t: Tiempo en la terminal (escala y regreso a la ruta)

C_v: Asientos por vehículo

α : Factor de carga (LRT<3.0 pasajeros por asiento, BRT<1.5 pasajeros por asiento) (Hsu & Wu, 2005)

Para la obtención de las variables se solicitaron a través de la Plataforma de Transparencia, para el caso del factor de carga se decidió utilizar los valores máximos propuestos por los autores, debido a que a ser una megalópolis la Ciudad de México se debe de pensar en trasladar a la gente lo más rápido posible; además, en horas pico se suele saturar los vehículos.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los valores obtenidos y el resultado del promedio de los tres casos.

Tabla 26 Valores de capacidad de los vehículos para BRT y LRT

	Línea 1 del Metrobús	Tren Ligero de la Ciudad de México
	Articulado	Biarticulado
Capacidad por vehículo	160	240
Flota total	180	56
Vehículos privados equivalentes / Vehículo	133	200
Promedio	167	243
Calificación	0.68	1.00
<i>p</i>	23303	4114
TB	3	2.47
<i>m</i>	1	1
<i>h</i>	0.011	0.08
<i>tp</i>	0.0067	0.00833
<i>tt</i>	2	3
<i>C_v</i>	49	48
α	4.9	6.08
Flota calculada	968	191
Flota real	236	24

Calificación	0.2439	0.1257647
Total	0.62	0.47

5.2 Desempeño del Sistema

Su evaluación consistirá en la integración de once componentes (frecuencia del servicio, velocidad de operación, confiabilidad, seguridad, capacidad de la línea, capacidad productiva, productividad, utilización, flexibilidad, densidad y energía), los cuales influyen directamente en la operación de los sistemas de transporte urbano y; por lo tanto, en los costos operativos del sistema. El desempeño del sistema es uno de los atributos más importantes en cualquier sistema de transporte, ya que mide la eficiencia con la que se trasladará a las personas; además, una pequeña variación en cualquier parámetro podría representar incrementos considerables en los costos.

Como se mencionó anteriormente, el valor integrado de estos componentes tendrá un valor de 0.20 de la calificación total; sin embargo, estos once atributos estarán calificados con una diferente ponderación, haciendo énfasis en aquellos que tienen una injerencia directa en la operación del sistema y no los que son relativos a la eficiencia de los vehículos, esto a consideración del autor. La suma de todos estos atributos será 1.00, el cual será afectado posteriormente por la variable α_2 . Lo anterior se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 27 Componentes e indicadores del desempeño de los sistemas de transporte de capacidad media

Característica	Indicador	Componente	Indicador
Desempeño del Sistema	Frecuencia del Servicio	0.1	
	Velocidad de operación	0.1	
	Confiabilidad	0.05	
	Seguridad	0.1	
	Capacidad de la línea	0.1	
	Capacidad productiva	0.3	
	Productividad	0.05	
	Utilización	0.05	
	Flexibilidad	0.05	
	Densidad	0.05	
	Energía	0.05	

El modelo matemático de esta parte de la comparativa quedaría integrado de la siguiente manera:

$$DS = \gamma_1 f + \gamma_2 V_o + \gamma_3 C_o + \gamma_4 S + \gamma_5 C + \gamma_6 P_c + \gamma_7 P + \gamma_8 U + \gamma_9 F_e + \gamma_{10} D + \gamma_{11} E$$

Y con los valores propuestos para esta tesis:

$$1.00 \geq DS = 0.1f + 0.1V_o + 0.05C_o + 0.1S + 0.1C + 0.3P_c + 0.05P + 0.05U + 0.05F_e + 0.05D + 0.05E$$

Donde:

DS : Desempeño del Sistema

f : Frecuencia

V_o : Velocidad de operación

C_o : Confiabilidad

S : Seguridad

C : Capacidad de la línea

P_c : Capacidad productiva

P : Productividad

U : Utilización

F_e : Flexibilidad

D : Densidad

E : Energía

Para la comparativa de los dos modos de transporte se utilizará la información proporcionada por la Plataforma Nacional de Transparencia, a través de los organismos Metrobús y Servicio de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México (STECDMX)

5.2.1 Frecuencia del servicio

La frecuencia es un atributo que influye directamente en la calidad del servicio, en las operaciones y en los costos operativos. Del lado del pasajero, una mayor frecuencia representa un menor tiempo en la estación para abordar el vehículo (debido a que la frecuencia es inversamente proporcional al intervalo de paso, y el tiempo de espera para los pasajeros en la estación para abordar un vehículo es aproximadamente la mitad del intervalo de paso); por lo tanto, los pasajeros preferirán una frecuencia de paso mayor. Por otro lado, los operadores de los sistemas elegirán una frecuencia menor, ya que mientras menos vehículos circulen, menor serán los costos operativos. Del lado de los planificadores también será preferible una frecuencia

alta, ya que así se moverá una mayor cantidad de gente en un menor tiempo. El enfoque de la frecuencia debe ser un equilibrio entre todos los involucrados, moviendo la mayor cantidad de gente lo más rápido posible, sin afectar demasiado los costos operativos y sin saturar los vehículos.

La frecuencia está en función de la demanda, son directamente proporcionales. Los operadores de los sistemas de transporte utilizan dos tipos de demanda: la demanda en hora pico y la demanda en hora valle. La primera es la máxima demanda horaria presentada durante la operación, la segunda son los valores de demanda mínima durante la operación.

Para esta comparativa se tendrá el enfoque de los usuarios; es decir, el valor de frecuencia más alta entre los dos sistemas de transporte de capacidad media representará el valor máximo de la comparativa, el otro será proporcional al máximo valor. Esto no considera las desventajas de una frecuencia alta, ya que esto se verá afectado directamente en la comparativa de los costos operativos.

El caso de la Línea 1 del Metrobús cuenta con una frecuencia muy alta, en hora pico se mandan 90 vehículos por hora; por lo tanto, con un intervalo de paso de 40 segundos entre cada vehículo. En hora valle la frecuencia también es alta, mandando 60 vehículos por hora; por lo tanto, un intervalo de paso de 60 segundos entre cada vehículo. La diferencia entre hora pico y hora valle es tan solo de 20 segundos, lo que quiere decir que la demanda en la línea es muy alta y se mantiene en valores altos a lo largo del día, como consecuencia de la saturación de la línea.

Para el caso del Tren Ligero de la Ciudad de México las frecuencias son mucho más bajas, en hora pico se mandan solo 12 vehículos por hora, con un intervalo de paso de 5 minutos entre cada vehículo. En la hora valle la frecuencia es de solo 10 vehículos por hora, con un intervalo de paso de 6 minutos entre cada vehículo. La diferencia entre hora pico y hora valle es de 60 segundos, tres veces mayor que la diferencia entre horas pico y valle para la Línea 1 del Metrobús.

Tabla 28 Frecuencia e intervalo de paso de los vehículos de la Línea 1 del Metrobús y del Tren Ligero de la Ciudad de México

Sistema de transporte	Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Tren Ligero de la Ciudad de México
Frecuencia en hora pico	90 vehículos/hora	12 vehículos/hora
Frecuencia en hora valle	60 vehículos/hora	10 vehículos/hora
Intervalo de paso en hora pico	40 segundos	300 segundos
Intervalo de paso en hora valle	60 segundos	360 segundos

El valor referencia será la frecuencia en hora pico, ya que es la hora en la que se tiene que atender la mayor cantidad de pasajeros; por lo tanto, el valor referencia de 100% será la frecuencia de la Línea 1 del Metrobús. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 29 Valores de frecuencia para los vehículos de BRT y LRT

Sistema de transporte	Frecuencia (f)
Tren Ligero de la Ciudad de México	0.13
Línea 1 del Metrobús	1.00

5.2.2 Velocidad de operación

La velocidad de operación, al igual que la frecuencia, se calificará tomando como valor base del cien por ciento al máximo valor de ambos modos de transporte. En este caso todos los partícipes del servicio de transporte urbano (operadores, planificadores y usuarios) demandan una velocidad de operación de los vehículos lo más alta posible, ya que de esta manera los pasajeros ahorran tiempo de traslado, los operadores ahorran en costos y los planificadores desean el movimiento masivo de personas en el menor tiempo posible.

La Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México tiene una velocidad de operación de 20 km/h, la cual se ve muy afectada por el número de intersecciones, lo cual podría solucionarse con Sistemas de Transporte Inteligente que le den prioridad de paso a los vehículos.

El Tren Ligero de la Ciudad de México cuenta con trenes capaces de alcanzar velocidades de 70 km/h, por motivos de seguridad y, principalmente, del trazo de la vía su velocidad de operación se reduce a 20.52 km/h.

Los valores de comparativa se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 30 Valores de velocidad de operación de vehículos de BRT y LRT

Sistema de transporte	Velocidad de operación (V_o)	Indicador de Velocidad de operación (V_o)
Tren Ligero de la Ciudad de México	20 km/h	0.97
Línea 1 del Metrobús	20.52 km/h	1.00

5.2.3 Confiabilidad

La confiabilidad está en función de los minutos que llegan los vehículos con anterioridad o retraso conforme a un horario preestablecido.

La confiabilidad está en función de una programación previa de los recorridos; además, está fuertemente influenciada de las condiciones en su vía, mientras si en la vía y en las intersecciones no se presentan interferencias las operaciones no se verán afectadas, y los vehículos podrán llegar en el tiempo establecido. La frecuencia también afecta la confiabilidad en las operaciones, si su valor es muy alto será difícil programar las operaciones. Los carriles de rebase también son

muy importantes, ya que si los vehículos no tienen una gran flexibilidad a cualquier interferencia en la vía las operaciones se afectarán para todos los trenes.

La línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México no cuenta con ningún tipo de programación previa; por lo tanto, es imposible conocer la confiabilidad de los autobuses. Con base en este criterio, para la comparativa se decidió otorgarle una calificación de cero. Este sistema cuenta con unas pantallas en las estaciones las cuales ofrecen a los usuarios información acerca del tiempo de espera para el siguiente tren; sin embargo, no se puede realizar una planeación del viaje debido a que la información se conoce al momento de ingresar a la estación.



Figura 45 Pantallas en las estaciones de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México

El Tren Ligero de la Ciudad de México no cuenta con calendarización o algún horario preestablecido, su valor de confiabilidad no puede ser medido; por lo tanto, para la comparativa se ha decidido otorgarle un valor de cero.

Finalmente, se presentan los valores asignados a la comparativa:

Tabla 31 Valores de confiabilidad para los sistemas BRT y LRT

Sistema de transporte	Velocidad de operación (V_o)	Indicador de Velocidad de operación (V_o)
Tren Ligero de la Ciudad de México	No cuenta con horario	0.00
Línea 1 del Metrobús	No cuenta con horario	0.00

5.2.4 Seguridad

Es uno de los aspectos más importantes en el transporte en México, tanto la seguridad a los accidentes como la seguridad en cuestión de delitos. En la Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte de 2015 la seguridad fue el aspecto peor evaluado, ya que sólo el 40% de la población consideraba seguro el transporte público; en ese año el 13.2% de la población reportó haber sufrido algún accidente en el transporte y un 13.6% de la población reportó haber sufrido algún tipo de delito. La percepción de la población es que el automóvil es la segunda forma de transporte más segura; sin embargo, en el 60% de los accidentes estuvo involucrado el automóvil (Suárez & Delgado, 2015)

Suárez & Delgado (2015) presentaron un cuadro en el que presentan las calificaciones a los medios de transporte por rango, en este cuadro se evalúan 19 medios de transportes; dentro del rango de seguridad el sistema BRT ocupaba el lugar número 6 en cuanto al más seguro, el tren ligero ocupa el séptimo lugar (considerando al tren ligero dentro de la categoría de Tren)

La siguiente gráfica muestra la proporción de seguridad percibida en la Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte (2015) por los pasajeros, considerando al lugar número uno como el cien por ciento de seguridad.

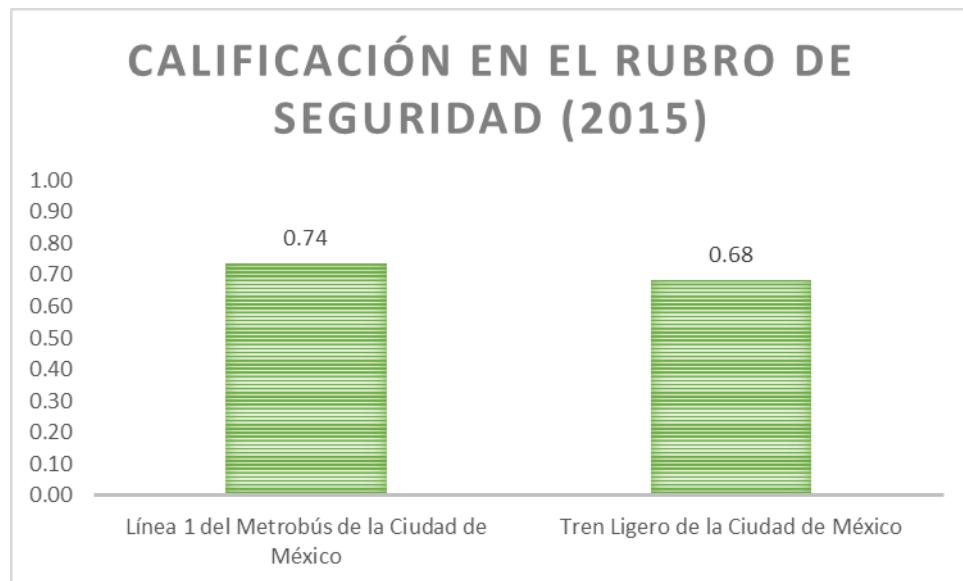


Figura 46 Calificación en el rubro de seguridad en la Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte 2015. Fuente: Elaboración propia; datos obtenidos de Suárez & Delgado (2017)

El 2016 el Tren Ligero de la Ciudad de México tuvo 19 accidentes, y durante el mes de septiembre del 2017 no presentó ningún accidente.

En el año 2016 la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México tuvo 200 accidentes; además, es la línea más accidentada de los BRT de la Ciudad de México, ya que del año 2005 al 2015 hubo

una cantidad de 671 accidentes, lo que representa un total de 52.16% del total de los accidentes presentados en las líneas de Metrobús, esto debido diseño inapropiado de los recorridos, un esquema de tránsito complejo y fallas humanas. Los accidentes más comunes son atropellamientos o empujones a ciclistas o peatones y colisiones entre automóviles particulares y entre los mismos vehículos del sistema (Moreno, 2017) La inseguridad en la línea del Metrobús se debe a la poca segregación de su vía y a la alta frecuencia de los vehículos.

Para evaluar este atributo se decidió tomar en cuenta dos factores: la opinión pública acerca de la seguridad del sistema de transporte y la cantidad de accidentes ocurridos en el último año (2016) La valoración otorgará un mayor peso a la cantidad de accidentes ocurridos en el último año; debido a que, como se mostró en las cifras respecto a la seguridad en automóvil, a pesar de ser considerado el segundo vehículo más seguro, es el vehículo que presenta la mayor cantidad de accidentes. La valoración seguirá la siguiente formula:

$$S = 0.1P_p + 0.9A_{2016}$$

Donde:

P_p : Es la percepción pública acerca de la seguridad del sistema de transporte

A

$_{2016}$: Es la cantidad de Accidentes presentados en el sistema en el año 2016

La Percepción pública tomará como cien por ciento de seguridad el transporte considerado como el más seguro en la Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte (2015), haciendo proporcional su lugar ocupado en esta encuesta a los Sistemas BRT y Tren Ligero.

La cantidad de Accidentes fue solicitada a la Unidad de Transparencia de cada sistema de Transporte, y se tomará como cien por ciento a la menor cantidad de accidentes entre ambos modos de transporte, siendo proporcional la cantidad del otro sistema de transporte.

Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 32 Valores de Seguridad para sistemas BRT y LRT

Sistema	Lugar en la Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte	Calificación de la Percepción	Indicador de Percepción	Valor de Percepción	Accidentes (2016)	Indicador de Accidentes	Valor de Accidentes	Valor total de Seguridad
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	6	0.74	0.1	0.0737	200	0.9	0.0855	0.1592
Tren Ligero de la Ciudad de México	7	0.68	0.1	0.0684	19	0.9	0.9	0.9684

5.2.5 Capacidad de la línea

La capacidad de la línea, como se mencionó en el numeral 3.1.2, se puede dividir en dos categorías: la capacidad ofrecida y la capacidad utilizada; para esta parte de la se utilizará la capacidad productiva que representa la cantidad de pasajeros totales pasando en un punto en una determinada hora, representando así la máxima cantidad de trasladados en una hora por unidad en el sistema.

El cálculo de este atributo se realizará de manera teórica; es decir, con valores obtenidos solicitados de la Plataforma Nacional de Transparencia, ya que no se realizaron aforos en los puntos del sistema para contar las personas en los vehículos.

La metodología de cálculo es la siguiente:

1. Se utilizará la frecuencia en hora pico de los vehículos para determinar la cantidad de vehículos por hora, suponiendo que en cualquier punto de la vía pasaran la misma cantidad de vehículos por hora.
2. Se utilizará la frecuencia en hora pico debido a que ambos sistemas se encuentran saturados; por lo tanto, los vehículos que pasen durante la hora pico estarán al límite de su capacidad.
3. La capacidad de la línea se calculará de la siguiente manera:

$$C = f_{pico} * CV_{máx}$$

Donde:

C: Capacidad de la línea (productiva)

f_{pico} : Frecuencia en hora pico.

$CV_{máx}$: Capacidad máxima del Vehículo.

Tabla 33 Capacidad de la línea de BRT y LRT

Sistema	Frecuencia en hora pico (vehículos/hora/sentido)	Capacidad Máxima del Vehículo (pasajeros/vehículo)		Capacidad de la línea (pasajeros/hora/sentido)	
		Articulado	Biarticulado	Articulado	Biarticulado
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	90	160	240	14400	21600
Tren Ligero de la Ciudad de México	12	292		3504	

La siguiente tabla muestra los resultados de las calificaciones de la capacidad de la línea de los vehículos BRT y LRT, para la calificación se utilizó un promedio ponderado entre vehículos articulados y biarticulados, para la línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México, considerando que casi el 70% de los vehículos que operan en la línea son articulados.

Tabla 34 Valores de Capacidad de la Línea para BRT y LRT

Sistema	Capacidad de la línea (pasajeros/hora/sentido)	Calificación de capacidad de la línea
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	16108	1
Tren Ligero de la Ciudad de México	3504	0.2175

5.2.6 Capacidad productiva

La capacidad productiva es el concepto que realmente dice que tan “masivo” es el sistema de transporte. Como menciona el autor Vibhuti, A. (2008) la capacidad productiva considera a todos los interlocutores del transporte, considerando lo que cada uno busca como masivo en sistema de transporte. Este autor también considera la capacidad de la línea como una medida de desempeño incompleta, ya que no representa verdaderamente la cantidad de pasajeros que se están moviendo de un punto a otro por el sistema de transporte.

La capacidad productiva se calcula con la siguiente expresión:

$$P_C = V_o * C$$

Donde:

V_o : Es la Velocidad de Operación

C : Es la Capacidad de la Línea

P_C : Es la Capacidad Productiva

La capacidad productiva representa que tan rápido se está moviendo a los pasajeros en la línea; es decir, la cantidad de pasajeros que se movieron de un punto a otro, en lugar de la cantidad de viajes realizados; por lo tanto, la mayor capacidad productiva será la que se tomará como base, siendo el cien por ciento de la comparativa, el otro valor será de calificación proporcional.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos, utilizando la ecuación anterior y los valores obtenidos de velocidad de operación y capacidad de la línea para cada sistema.

Tabla 35 Valores de Capacidad Productiva para BRT y LRT

Sistema	Capacidad de la línea (pasajeros/hora/sentido pphpd)	Velocidad de operación (km/h)	Capacidad productiva (pasajeros/km/h/sentido Pkmpph)	Calificación de capacidad de la línea
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	16108	20	322169	1
Tren Ligero de la Ciudad de México	3504	20.52	71902	0.2232

5.2.7 Energía

La energía se medirá como la cantidad de combustible utilizado por kilómetro recorrido. La dificultad radica en la diferencia de unidades de combustible, los trenes ligeros cuentan con motores eléctricos, los cuales se alimentan a través de kilowatts por hora; los autobuses de tránsito rápido cuentan con motores de combustión interna, alimentados por Diesel, es por eso que la cantidad de energía se normalizará con el precio por cada unidad de combustible, quedando de manera indirecta en pesos por cada kilómetro. La fórmula para el cálculo será la siguiente:

$$E = \frac{\text{combustible}}{\text{kilómetro}} * \frac{\$}{\text{combustible}}$$

El consumo de energía eléctrica por parte del tren ligero en el año 2016 se expresa en la siguiente tabla, la cual fue obtenida con datos proporcionados a través de la Plataforma Nacional de Transparencia.

Tabla 36 Consumo eléctrico del Tren Ligero de la Ciudad de México en el 2016

Sistema	Consumo de Energía Eléctrica en kWh (2016)	Kilómetros recorridos (2016)	Consumo de Energía Eléctrica por kilómetro en 2016 (kWh/km)	Facturación en pesos por consumo de Energía Eléctrica (2016)	Pesos de Energía Eléctrica por consumo de Energía Eléctrica en 2016 (\$/kWh)	Pesos de Energía Eléctrica por kilómetro recorrido en 2016 (\$/km)
Tren Ligero de la Ciudad de México	6,384,377	2,105,000	3.302	\$12,166,766.00	\$1.91	\$5.78

La mayoría de los vehículos de la línea 1 del Metrobús funcionan con motores a base de Diésel (aproximadamente solo el 10% de la flota en la línea cuenta con motores eléctricos) El precio del Diésel varió en el 2016 como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 37 Precio del Diésel por litro, en 2016

Combustible	Precio Enero 2016	Precio Diciembre 2016	Precio promedio anual (2016)
Diésel	\$13.77	\$14.63	\$14.20

La siguiente tabla muestra el consumo de combustible de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México, en el año 2016

Tabla 38 Gasto de combustible de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México, en 2016

Sistema	Consumo de Diésel en litros (2016)	Precio promedio del litro del combustible (\$/l)	Kilómetros recorridos (2016)	Consumo de litros de Diésel por kilómetro en 2016 (l/km)	Facturación en pesos por consumo de Diésel (2016)	Pesos de combustible por consumo de litros de Diésel en 2016 (\$/l)	Pesos de consumo de combustible por kilómetro recorrido en 2016 (\$/km)
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	11,331,498	\$14.20	14,730,948	0.77	\$160,907,278.26	14.2	10.92

En la siguiente tabla se presenta los resultados de la comparativa, considerando el costo de combustible por kilómetro, para tener unidades semejantes en la comparativa, además, se añade la calificación obtenida por cada modo de transporte.

Tabla 39 Valores de Energía para BRT y LRT

Sistema	Pesos de consumo de combustible por kilómetro	Calificación de Energía
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	\$10.92	0.5291
Tren Ligero de la Ciudad de México	\$5.78	1.0000

5.2.8 Densidad

La densidad se medirá como la cantidad de vehículos por kilómetro en el total del recorrido de la vía. Una mayor densidad en la vía podría significar complicaciones en las operaciones, ya que al ser una línea cerrada pudiera existir retrasos debido la gran cantidad de vehículos operando, los vehículos tendrán muy poco margen de operación entre ellos; además, si la línea es muy densa la separación entre vehículos será muy pequeña, por lo que podría existir una gran cantidad de accidentes. Para realizar este cálculo se utilizará el intervalo de paso en hora crítica, lo cual representa la hora en la que la línea tiene una mayor densidad, este cálculo supondrá un vehículo que inicia su recorrido cuando inicia la hora pico, y se desplaza con la velocidad de operación hasta llegar al final del recorrido, saliendo vehículos subsecuentes detrás de él; de manera que, tendremos la cantidad total de vehículos en la línea en operación de hora pico, el cálculo de vehículos en toda la línea operando en hora pico será calculado de la siguiente manera:

$$\text{Vehículos en la línea} = \frac{\text{Tiempo de recorrido}}{\text{Intervalo de paso}} [\text{vehículos}]$$

Donde:

Tiempo de recorrido: en un sentido, en segundos

Intervalo de paso: en hora pico, en segundos por cada vehículo

La siguiente tabla resume el cálculo de vehículos en la línea por sentido, para la línea 1 del Metrobús y el Tren Ligero de la Ciudad de México.

Tabla 40 Vehículos en la línea en hora pico de la línea 1 del Metrobús y el Tren Ligero de la Ciudad de México

Sistema	Intervalo de paso (segundos/vehículo)	Tiempo de recorrido de la ruta (segundos)	Vehículos en la línea en operación de hora pico (vehículos)
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	40	5400	135
Tren Ligero de la Ciudad de México	300	4440	15

Para hacer el cálculo de la densidad se dividió la cantidad de los vehículos en la línea entre la longitud total del recorrido por sentido.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos, para la calificación se tomó como cien por ciento la menor densidad de los sistemas, el valor mayor será proporcional valor menor obtenido; es decir, la división del valor menor obtenido entre el valor mayor obtenido.

Tabla 41 Valores de Densidad para BRT y LRT

Sistema	Intervalo de paso (segundos/vehículo)	Tiempo de recorrido de la ruta (segundos)	Vehículos en la línea en operación de hora pico (vehículos)	Kilómetros de la vía, por sentido (km)	Densidad (vehículos/km)	Calificación
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	40	5400	135	30	5	0.2522
Tren Ligero de la Ciudad de México	300	4440	15	13.04	1.13	1.00

5.2.9 Flexibilidad

En esta sección se estudiará los dos tipos de flexibilidad, tomando la adaptación a la demanda tanto espacial como temporalmente; por lo tanto, la calificación obtenida de este atributo estará compuesta de los dos tipos de flexibilidad, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$F_e = 0.5F_{et} + 0.5F_{ee}$$

Donde:

F_{et} : Flexibilidad temporal

F_{ee} : Flexibilidad espacial

Como se aprecia en la ecuación anterior, la flexibilidad espacial y temporal tendrá la misma relevancia.

La Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México cuenta con dos horarios de operación, la operación en hora pico y en hora valle. Las horas pico de la línea son dos, de las 07:00 a 08:00 am y de las 18:00 a las 19:00 horas, en esas horas se alcanza hasta un 30.55% de la demanda total. La variación de la demanda es muy poca, durante la mañana (de 06:00 am a 13:00 pm) hay una variación promedio de $\pm 3.34\%$, y en la tarde (14:00 a 21:00) la variación promedio es de $\pm 2.79\%$, esto se debe a la saturación de la línea, presente durante la mayor parte de las horas de

operación. La variación de vehículos de hora valle a hora pico es de 30 vehículos, lo que representa un incremento en la capacidad de 6000 pasajeros (en promedio) por hora; sin embargo, el cambio de hora valle a hora pico puede representar un incremento de 15,000 pasajeros (en promedio). Por esta razón se le ha decidido dar una calificación de 0.70 a la flexibilidad temporal; aunque presenta un ajuste en las operaciones en el cambio de la demanda en el transcurso del día, llega a ser insuficiente.

El Tren Ligero de la Ciudad de México cuenta con dos horarios de operación con respecto a la demanda, las operaciones en hora pico: de 06:00 a 09:00 am y de 17:01 a 21:00 pm, con una frecuencia de trenes de 12 vehículos/hora; las operaciones en hora valle son de 09:01 am a 17:00 pm, con una frecuencia de 10 vehículos/hora. La máxima demanda en hora pico es de 4,114 pasajeros en el sentido Xochimilco-Tasqueña (entre las 07:00 y 08:00 am), y en la tarde es de 3,740 pasajeros en el sentido Tasqueña-Xochimilco (entre las 19:00 y las 20:00 pm). En hora pico la demanda es, aproximadamente, el 25% de la demanda total. En el cambio entre hora pico y hora valle es de 2 vehículos por hora; es decir; un incremento de 584 pasajeros por hora por sentido, en las tres horas de operación de la mañana se ofrecen 1752 viajes adicionales por sentido, y en las dos horas pico de la mañana se ofrecen 1168 viajes extra por sentido.

Los trenes ligeros, para una mayor adaptación a la demanda temporal puede operar de forma modular, un diseño en el cual se incorporan “módulos” para ampliar o disminuir la demanda.

Expandable capacity to satisfy service demand and passenger comfort

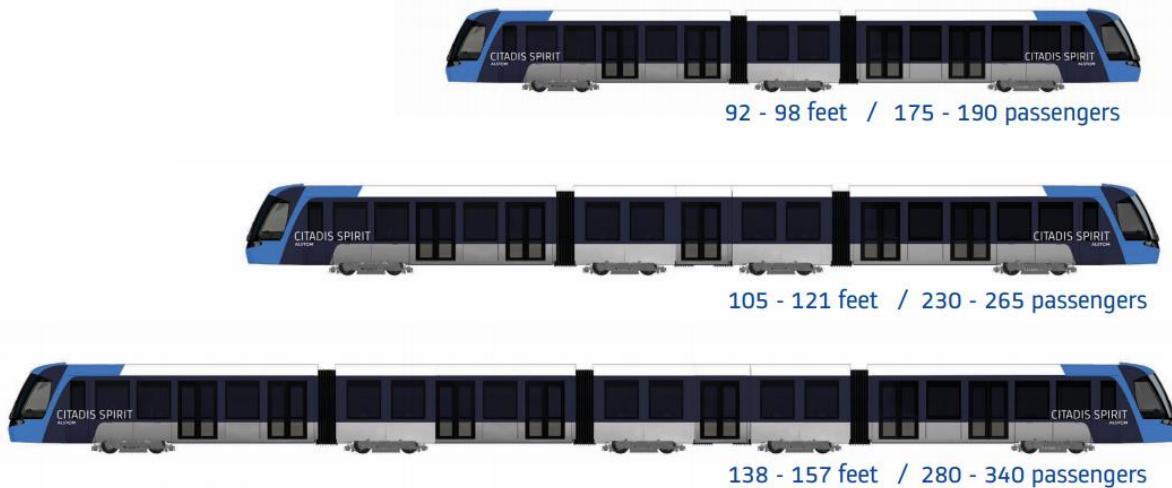


Figura 47 Diseño modular del Citadis Spirit de Alstom, el cual muestra la adición de módulos para incrementar la demanda
(Fuente: ALSTOM, 2013)

El Tren Ligero de la Ciudad de México no opera con un diseño modular, sus trenes están limitados a una capacidad fija de 292 pasajeros por vehículo; por estas razones se le decidió dar una calificación de 0.70 a la flexibilidad temporal.

La Línea 1 del Metrobús cuenta con rutas acortadas, las cuales funcionan para adaptarse a la demanda espacial. En total, la línea cuenta con 4 rutas acortadas, las cuales operan durante todo el día, conectando a las estaciones de mayor afluencia; además, cuenta con una ruta de la línea 2 que comienza en una estación de la Línea 1. La siguiente tabla muestra las rutas que operan en la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México.

Tabla 42 Rutas de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México

Ruta			
Indios Verdes			Insurgentes
Indios Verdes			El Caminero
Indios Verdes			Doctor Gálvez
Buenavista II			El Caminero
Col. del Valle			Tepalcates (Línea 2)

Fuente: <http://data.metrobus.cdmx.gob.mx/rutas.html> (2017)

Por esta razón, se le decidió dar a la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México una calificación de 1.00 para la Flexibilidad espacial.

El Tren Ligero de la Ciudad de México no cuenta con rutas acotadas; sin embargo, cuenta con operaciones espaciales durante eventos en el Estadio Azteca, en el cual se envían trenes vacíos para desalojar a las personas del evento, debido a que es el único sistema de transporte urbano público cercano; además, también amplia las horas de operación. El Tren Ligero también adapta su demanda espacial enviando trenes vacíos a las estaciones que se encuentran saturadas, en las horas pico; los trenes se envían directamente de las terminales a las estaciones saturadas, funcionando como un servicio de paradas limitadas. La flexibilidad espacial del Tren Ligero de la Ciudad de México no está previamente planeada, se va ajustando con la demanda, esto puede generar confusión en los usuarios, aunque le permite una mayor libertad de adaptación en caso de situaciones especiales, es por eso que se le decidió otorgar un valor al Tren Ligero de 1.00.



Figura 48 Estación "Estadio Azteca" del Tren Ligero de la Ciudad de México, señalada en amarillo. Fuente: Google Earth. 2017

La siguiente tabla muestra las calificaciones totales obtenidas en el atributo de flexibilidad

Tabla 43 Valores obtenidos de Flexibilidad para BRT y LRT

Sistema	Indicador de Flexibilidad Temporal	Valor de Flexibilidad Temporal	Calificación de Flexibilidad Temporal	Indicador de Flexibilidad Espacial	Valor de Flexibilidad Temporal	Calificación de Flexibilidad Temporal	Calificación de Flexibilidad
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	0.5	0.70	0.35	0.5	1.00	0.5	0.85
Tren Ligero de la Ciudad de México	0.5	0.70	0.35	0.5	1.00	0.5	0.85

5.2.10 Productividad

La productividad es una relación entre la cantidad de recursos producidos por cada recurso utilizado; en este atributo lo esperado por un sistema de transporte es el generar una gran cantidad de bienes, consumiendo la menor cantidad de recursos.

La forma de medir la productividad para esta comparativa será a través de la relación entre la capacidad ofrecida por cada vehículo por la flota total por cada kilómetro recorrido y el costo operativo anual. La razón para utilizar esta relación es que aquí podremos comparar lo que cada modo de sistema está ofreciendo, en materia de capacidad y recorrido, y lo que cuesta esta producción; de manera que podremos conocer una forma cual modo de transporte está ofreciendo mejores beneficios al menor costo operativo. Como se mencionó con anterioridad, esto no servirá como un criterio único para decidir qué sistema está ofreciendo un mayor beneficio, ya que dentro de este atributo solo se estará contando con la capacidad y la flota, por cada costo operativo; sin embargo, será una manera de conocer la eficiencia de cada sistema de transporte.

La fórmula para el cálculo de la productividad se muestra a continuación:

$$P = \frac{CV * \text{flota total} * \text{kilometros recorridos anuales}}{CO} \left[\frac{\text{pasajeros} * \text{vehículo} * \text{km}}{\$} \right]$$

Donde:

P: Productividad (en pasajeros por vehículo por kilómetro por cada unidad monetaria de operación)

CV: Capacidad de Vehículo (en pasajeros)

CO: Costos Operativos Anuales (en pesos)

La línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México opera a través de empresas concesionadas, las cuales están a cargo de proveer el servicio en la línea. Inicialmente las operaciones de la línea estaban a cargo de dos empresas (CISA y SM1), conforme la demanda fue aumentando fue necesario la compra de más unidades, y eventualmente más empresas operadoras que trabajaran en la línea, llegando a la actualidad a ser 5 empresas operando en la línea, como se mencionó anteriormente, el pago a las empresas prestadoras se hace con base en la recaudación de peaje del sistema, cada empresa recibe un pago por kilómetro recorrido, el cual es determinado según su presencia operativa en la línea.

En la siguiente tabla se muestra las empresas que operan en la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México, el año de incorporación a la línea, los kilómetros recorridos en el año de 2016 y el pago que el sistema Metrobús realiza por la operación

Tabla 44 Empresas Operadoras de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México

Empresa	Año de incorporación a la línea	Kilómetros recorridos (en 2016)	Pago por kilómetro
CISA (Corredor Insurgentes S.A. de C.V.)	2005	8,088,442.09	Articulado \$45.40 Biarticulado \$47.70
VYC (Vanguardia y Cambio S.A. de C.V.)	2012	1,605,015.56	Articulado \$37.10 Biarticulado \$47.77
RECSA (Rey Cuauhtémoc S.A. de C.V.)	2008	2,563,048.65	Articulado \$37.10 Biarticulado \$47.77
SM1 (Sistema de Movilidad 1)	2005	1,426,326.18	No conocido
CE4-17MSA (Corredor Eje 4 Sur 17 de Marzo S.A. de C.V.)	2008	1,048,115.53	No conocido
TOTAL		14,730,948.01 (2016)	\$605,100,000.00 (2016)

La información anterior fue proporcionada por el organismo Metrobús a través de la Plataforma Nacional de Transparencia; sin embargo, no se especificaron los pagos por kilómetros de las empresas SM1 y CE4-17MSA.

El cálculo de la productividad para la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México queda establecido de la siguiente manera:

Tabla 45 Productividad de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México

Sistema	Capacidad de los Vehículos (promedio ponderado)	Flota total	Kilómetros recorridos (2016)	Facturación en pesos por kilómetros recorridos (2016)	Productividad (pasajeros*vehículos*km/\$)
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	179	236	14,730,948	\$605,100,000.00	1028

El Tren Ligero de la Ciudad de México no cuenta con una concesión para la prestación de sus servicios, la operación en la línea se realiza a través del organismo descentralizado Sistema de Transporte Eléctrico de la Ciudad de México (STECDMX). La siguiente tabla muestra la Productividad del Tren Ligero de la Ciudad de México:

Tabla 46 Productividad del Tren Ligero de la Ciudad de México

Sistema	Capacidad de los Vehículos (promedio ponderado)	Flota total	Kilómetros recorridos (2016)	Facturación en pesos por kilómetros recorridos (2016)	Productividad (pasajeros*vehículos*km/\$)
Tren Ligero de la Ciudad de México	292	24	2,105,000	\$12,166,766.00	1212

Por último, para esta parte de la comparativa se eligió la productividad mayor como valor de referencia equivalente al cien por ciento, siendo el valor de menor productividad proporcional a este. En la siguiente tabla se muestra la productividad de ambos sistemas:

Tabla 47 Valores de Productividad para BRT y LRT

Sistema	Calificación de Productividad
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	0.8482
Tren Ligero de la Ciudad de México	1

5.2.11 Utilización

La utilización es también un atributo de eficiencia, que considera producidos por cada recurso utilizado; a diferencia de la productividad, ambas medidas de los recursos deben ser de las mismas unidades. Para medir la utilización como atributo en esta comparativa se utilizará las personas por kilómetro recorrido por cada peso de combustible por kilómetro recorrido (Energía). Se eligió la Energía debido a que se puede homologar las unidades para los diferentes combustibles que utilizan los medios de transportes. A continuación, se muestra la fórmula para el cálculo:

$$U = \frac{\text{personas}}{\text{km recorrido}} / \frac{\text{pesos de combustible}}{\text{km recorrido}}$$

Para obtener los kilómetros recorridos se hará por medio de un cálculo, el cual involucra a la frecuencia en hora pico por sentido de los vehículos, el intervalo de paso en horas y la velocidad de operación. En la siguiente fórmula se enuncia la forma en la que se realizará el cálculo:

$$\text{km totales por cada hora} = \sum_{i=1}^n \text{velocidad operación} * (t - t_i)$$

Donde:

t : Tiempo total para el cálculo de kilómetros, en este caso 1 hora

t_i : El tiempo transcurrido antes de que el vehículo n saliera de la estación

Además:

$$t \geq t_i$$

$$n = f$$

Donde:

f : Frecuencia en hora pico

Este cálculo considera la distancia acumulada por todos los vehículos que salen en hora pico. La metodología consiste en lo siguiente:

1. Se inicia a contabilizar a los vehículos que salen a partir de que comienza la hora pico.
2. Se deja transcurrir un tiempo establecido, en este caso de una hora.
3. Se cuenta el total de vehículos que salieron a la vía en esa hora, que debe ser igual a la frecuencia en hora pico.
4. Se mide la distancia que recorrió cada vehículo.
5. Se suma el total de distancias acumuladas por los vehículos.

El cálculo kilómetros recorridos para la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 48 Kilómetros recorridos por la Línea 1 del Metrobús por hora por sentido

Vehículo	Tiempo	Velocidad de Operación	Distancia recorrida en una hora
1	0.00	20	20.00
2	0.01	20	19.78
3	0.02	20	19.56
4	0.03	20	19.33
5	0.04	20	19.11
6	0.06	20	18.89
7	0.07	20	18.67
...
89	0.98	20	0.44
90	0.99	20	0.22
91	1.00	20	0.00
Total (km)			910

Para el Tren Ligero de la Ciudad de México también se realizó el mismo cálculo, el cual está expresado en la siguiente tabla:

Tabla 49 Kilómetros recorridos por hora por sentido para el Tren Ligero de la Ciudad de México

Vehículo	Tiempo	Velocidad de Operación	Distancia recorrida
1	0	20.52	20.52
2	0.08	20.52	18.81
3	0.17	20.52	17.1
4	0.25	20.52	15.39
5	0.33	20.52	13.68
6	0.42	20.52	11.97
7	0.50	20.52	10.26
8	0.58	20.52	8.55
9	0.67	20.52	6.84
10	0.75	20.52	5.13
11	0.83	20.52	3.42
12	0.92	20.52	1.71
13	1.00	20.52	0
Total			133.38

A igual que la productividad, la mayor utilización representa una mejor utilización de los recursos, una producción de viajes más eficientes por cada recurso monetario utilizado. En la siguiente tabla se muestran los valores de cálculo para la utilización; además, se presenta los resultados de la calificación, tomando en cuenta como cien por ciento del total al valor más alto de utilización, el valor menor será proporcional al mayor.

Tabla 50 Valores de Utilización para BRT y LRT

Sistema	Pasajeros por hora por sentido	Kilómetros recorridos por hora por sentido	Pesos por cada kilómetro recorrido	Utilización	Valor de calificación de Utilización
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	23303	910	10.92	2.3450	0.4394
Tren Ligero de la Ciudad de México	4114	133.38	5.78	5.3364	1.0000

5.3 Impactos

Los impactos son todos aquellos cambios que se generan debido a la introducción de un sistema de transporte en el ambiente que operara. En el Marco Teórico se agruparon en dos grandes categorías, los impactos sociales y los impactos económicos, y estos a su vez pueden ser positivos o negativos. Para la comparativa se incluirá una tercera categoría, las emisiones de cada modo de transporte. Las emisiones son incluidas en los análisis de los sistemas de transporte de diferentes maneras, pudiendo estar incluidas como un costo que se tendrá que mitigar o como una categoría independiente de análisis, en esta categoría se decidió dividir en dos partes, la primera representa la cantidad de contaminantes que producen por los sistemas de transporte, haciendo alusión a un debate reciente en que los sistemas de transportes eléctricos producen una mayor cantidad de contaminantes debido a la generación de energía eléctrica, siendo una producción mayor a la de los vehículos de combustión interna. La segunda parte estará enfocada a los costos, y el costo de mitigación de este impacto, el cual se abordará en el numeral 5.5.3.

Como se mencionó al principio de la comparativa, esta sección de análisis tendrá un peso de 0.20 en la calificación final, este 0.20 estará integrado en su cien por ciento por los tres diferentes componentes, los cuales tienen la siguiente ponderación:

Tabla 51 Componentes e indicadores de los Impactos de los Sistemas de Transporte de Capacidad Media BRT y LRT

Característica	Indicador de la Característica	Componente	Indicador del Componente
Impactos	0.2	Impactos sociales	0.25
		Impactos económicos	0.25
		Emisiones	0.5

Matemáticamente, la expresión para el cálculo de los impactos estará definido de la siguiente manera:

$$I = \partial_1 I_s + \partial_2 I_e + \partial_3 E_s$$

Con los valores propuestos para esta tesis, el modelo matemático quedaría de la siguiente manera:

$$1 \geq I = 0.25I_s + 0.25I_e + 0.50E_s$$

Donde:

I : Impactos

I_s : Impactos Sociales

I_e : Impactos Económicos

E_s : Emisiones

5.3.1 Sociales

Los impactos sociales son aquellos en los cuales los sistemas de transporte interfieren con las relaciones de las personas o grupos, aquellos en los cuales se alteran los acontecimientos y sucesos de la sociedad (Islas & Lelis, 2007)

La línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México, al ser implementado en uno de los corredores de mayor importancia de la ciudad, fue partícipe de varios cambios en la sociedad, traducidos en impactos. A continuación, se presentan algunos de los impactos sociales que se presentaron en la construcción y operación de la línea; sin embargo, no son únicos, ya que a cada ente de la sociedad que interactúa con la línea la impacta de diferente manera, lo que se enuncia aquí son los más representativos. Al final se emitirá una calificación con respecto a la cantidad de impactos positivos y negativos, y sus respectivas medidas de mitigación.

Impactos sociales positivos de la Línea 1 del Metrobús:

1. Reestructuración del transporte urbano concesionado: La implementación del Metrobús en la Ciudad de México no solo fue la creación de un nuevo sistema de transporte en la

ciudad, también fue la creación de un nuevo modelo administrativo del transporte. Anteriormente sobre la línea operaban concesionarios independientes los cuales se asociaron en “Rutas”, la principal “Ruta” que operaba en la línea era la “Ruta 2”, los cuales no estaban regulados en cuanto a operaciones por ninguna institución, lo único que era regulado era el precio por el servicio, lo cual propiciaba un mal servicio con unas malas unidades vehiculares. Al llegar el Metrobús se tuvo que cambiar a un nuevo modelo, un nuevo órgano institucional descentralizado llamado “Metrobús” sería el encargado de programar y regular las operaciones de los concesionarios en la línea, los concesionarios podrían seguir operando en la línea, siempre y cuando se ajustaran a un nuevo modelo administrativo, en el cual se asociaran como una sociedad anónima de capital variable. Financieramente se crearía un fideicomiso independiente del organismo “Metrobús” y de los concesionarios, el cual se encargaría de la repartición monetaria. El modelo que se adoptó para la implementación de los BRT en la Avenida de los Insurgentes sería el siguiente:

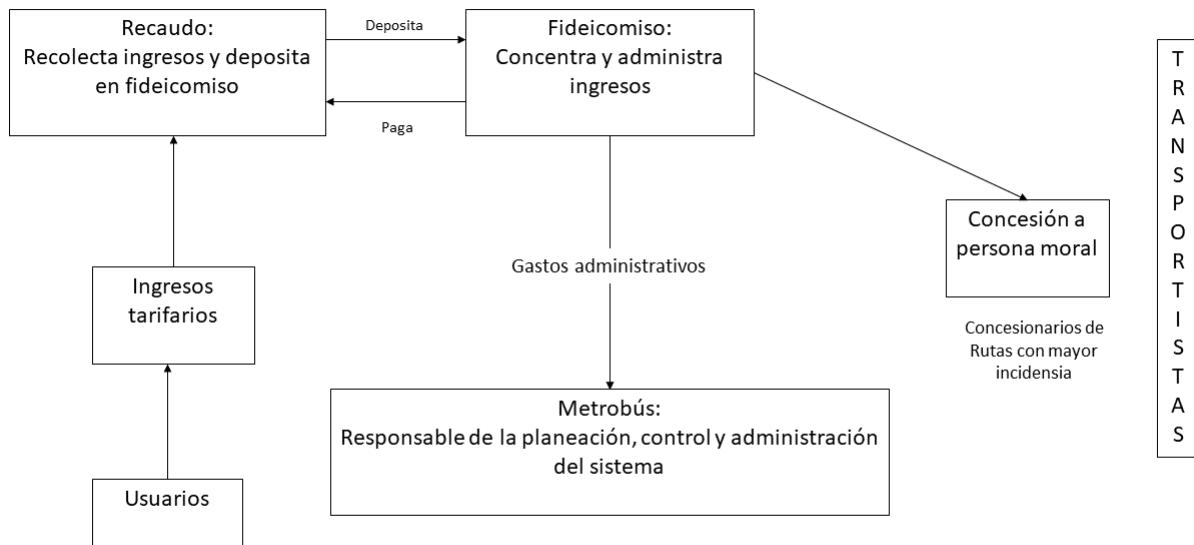


Figura 49 Esquema operativo institucional de la Línea 1 del Metrobús (Fuente: Lámbarry Vilchis, Rivas Tovar & Peña Cruz, 2011)

En la imagen anterior se muestra la forma en la que opera el Metrobús: Los usuarios ingresan al sistema, por medio de una tarifa tienen acceso al servicio, los ingresos tarifarios de todos los usuarios son recaudados por medio de tarjetas inteligentes, este recaudo se transfiere a

un fideicomiso, el cual concentra y distribuye los ingresos a todos los participantes, el Metrobús recibe parte de este dinero con el cual se encarga de planear, controlar y administrar el sistema, otra parte del pago se dirige a los concesionarios, que son previos operadores transportistas de la “Ruta 2” que operaba en la Avenida de los Insurgentes y que cumplieron los requisitos para poder incluirse en el esquema de Sociedad Anónima de Capital Variable. Este nuevo modelo permitió una mayor organización de los concesionarios, además de una regulación y planeación del servicio por medio de un organismo gubernamental descentralizado. Los mayores beneficios fueron el poder regular el servicio de transporte, la inclusión de los previos operadores y el incremento en el nivel de servicio de los pasajeros.

2. Renovación de la flota y mejoramiento del nivel de servicio: Gracias al pago por kilómetro.



Figura 50 Microbuses que ofrecen servicio de transporte en la Ciudad de México (Fuente: Ascensión, A. 2016)

Otra ventaja derivada del nuevo modelo administrativo que repercutió en una mejora del nivel del servicio fue gracias al nuevo esquema de pago; anteriormente el gobierno solo entregaba la concesión, sus ganancias estaban derivadas de la cantidad de pasajeros que se subieran en las unidades, repercutiendo en unidades sobresaturadas y un muy mal servicio debido a la imprudencia de los conductores por tratar de “ganarse el pasaje”. Con el nuevo modelo de pago basado en el pago por kilómetro recorrido de la empresa permitió elevar el nivel de servicio y seguridad del recorrido, ya que las empresas y operadores no ganan por las personas que abordan la unidad sino por la cantidad de kilómetros de ruta que trabajan. Con las diferentes empresas que han entrado al sistema el mismo esquema se ha conservado.

3. Reducción de emisiones: Aunque la cantidad de emisiones generadas se evaluaran por aparte, en esta sección se tomará como un beneficio social debido a que la renovación de la flota generó una disminución del 10% anual de los contaminantes antes generados por los vehículos de antigua tecnología. La disminución de los contaminantes se tradujo en una mejor calidad de vida para los habitantes de la Ciudad de México.
4. Mejoramiento y actualización de los señalamientos en la Avenida de los Insurgentes: Para la construcción de la Línea 1 del Metrobús se modernizaron o se construyeron nuevos semáforos, los cuales les permitían a los usuarios acceder a las estaciones, así como conocer en tiempo real el tiempo que tenían disponible para el cruce, en 54 intersecciones.

Impactos sociales negativos de la línea 1 del Metrobús

1. Modificación de los patrones de circulación en la Avenida de los Insurgentes: El corredor de los Insurgentes sufrió una serie de modificaciones en las normas de tránsito para que el sistema de transporte BRT pudiera operar de manera óptima; sin embargo, este nuevo sistema significó una modificación en los patrones de conducción a los que estaban acostumbradas en la sociedad, implementando una serie de normas, las cuales penalizaban por conductas que antes estaban permitidas en la avenida. Las modificaciones en el tránsito que se implementaron fueron las siguientes (Gobierno del Distrito Federal, 2005):
 - a) La exclusiva circulación de autobuses articulados en los carriles predeterminados.
 - b) La prohibición de vueltas a la izquierda.

La preferencia por el transporte privado generó descontento en la sociedad, ya que la implementación del nuevo sistema de transporte se vio como una reducción en la capacidad de la vía, lo cual generaría una saturación en la avenida. Este descontento se vio expresado en la política, con el acta elaborada por el diputado Efraín Morales López (2013), en la cual solicitaba una flexibilización de los carriles exclusivos del Metrobús para utilizarlo como carril de alta ocupación vehicular, tránsito de taxis con pasajes y tránsito de bicicletas, debido a la saturación en la avenida. Esta medida bajaría de categoría el servicio, por lo cual no es recomendable su aplicación; sin embargo, muestra el descontento generalizado por la reducción de la capacidad de la vía.

La prohibición de las vueltas a la izquierda se creó como una medida de seguridad en las intersecciones entre los vehículos BRT y el tránsito mixto, ya que se podrían generar accidentes por los cruces, y generar una mayor saturación debido a la espera de los coches para realizar el giro. La población estaba acostumbrada a una vía con giros a la izquierda, esta nueva prohibición generó que los vehículos de tránsito mixto tuvieran que pasar por dos veces por la intersección poder ingresar al carril de tránsito de giro. Para

que estas medidas se cumplieran las instituciones gubernamentales crearon una serie de infracciones para multar el incumplimiento de estas nuevas normas de tránsito. Aunque se le dio un periodo de adaptación a la sociedad, la implementación del sistema BRT representó una modificación en los patrones del tránsito mixto en la Avenida de los Insurgentes.

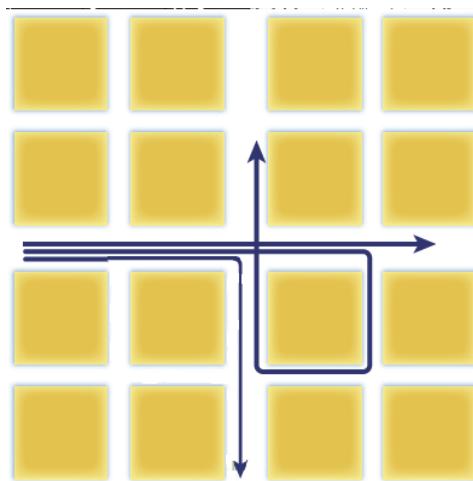


Figura 51 Configuración de maniobras para realizar los giros a la izquierda (Fuente: Guía de Planificación de Sistemas BRT. 2007)

2. Vendedores ambulantes: Antes de la implementación del sistema de tránsito rápido en la avenida de los Insurgentes los vendedores ambulantes se localizaban en la vía pública, en los puntos de mayor saturación en la vía, sin una previa planeación urbana o alguna regulación, lo que generaba una situación de inseguridad; sin embargo, después de la implementación del Metrobús se reorganizó la ubicación de los vendedores en tres principales puntos: Terminal Indios Verdes, La Palma y Glorieta de los Insurgentes. Este fue un impacto social positivo en un principio; sin embargo, con el paso del tiempo los vendedores ambulantes fueron regresando a los puntos de máxima afluencia, además de que solo se reubicó a los ambulantes previamente registrados en las delegaciones, sin permitir la regularización y reubicación de los vendedores ambulantes que no contaban con permiso.
3. Choferes desplazados de *Ruta 2*: La reestructuración de la concesión del transporte en la avenida de los Insurgentes permitió elevar el nivel de servicio y la mejorar la administración y operación del transporte. Esto generó una serie de requisitos para los operadores, de los cuales 210 no cumplieron con los requisitos establecidos para la contratación por parte de los concesionarios. Sus alternativas laborales consistieron en reincorporarse a alguna otra concesionaria o tomar una nueva capacitación con los recursos del gobierno. Aunque este impacto está relacionado con el incremento en el

nivel de servicio en la línea, ya que se cuenta con choferes que cuentan con una capacitación previa, hubo 210 choferes que perdieron su empleo.

4. Reubicación del monumento “Los Indios Verdes”: El monumento conocido como “Los Indios Verdes” influía directamente en la construcción de la Terminal Indios Verdes en el paradero poniente, por lo que se decidió reubicar la escultura en el parque “El Mestizaje” Para la restauración y reubicación de la escultura se contrataron grupos de trabajo del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) y el Instituto Nacional de Bellas Artes (INBA) Para la sociedad representó un cambio de un elemento del paisaje urbano y la afectación de un símbolo de la zona.



Figura 52 Monumento "Indios Verdes" en el parque El Mestizaje (Fuente: Espinosa, V. 2011)

5. Deforestación: Para poder construir el corredor en la avenida de los Insurgentes se tuvieron que talar 1700 árboles, principalmente para la construcción de las estaciones. Se desarrollo una medida de mitigación la cual contemplaba una reforestación en el camellón y las banquetas de la Avenida de los Insurgentes, en el informe del Gobierno del Distrito Federal (2005) se informa que se estaban plantando 7500 árboles.

Para esta investigación se determinaron un total de 4 impactos sociales positivos y 5 impactos sociales negativos, los cuales no están limitados a que existan más. La siguiente tabla resume lo que se presentó anteriormente:

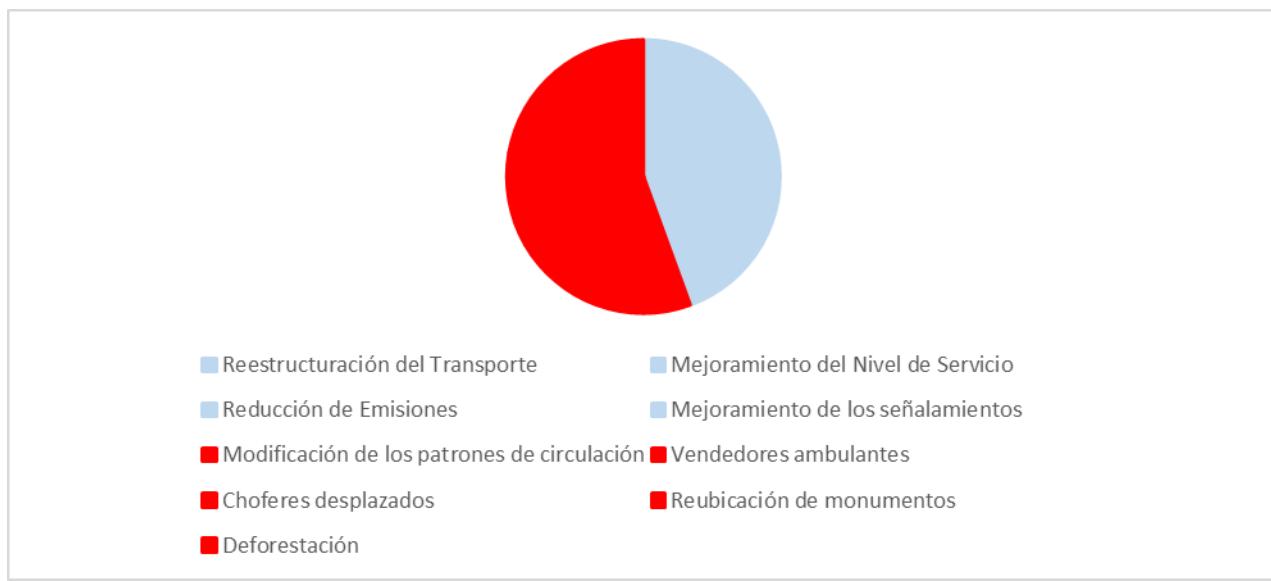


Figura 53 Impactos Sociales de la Línea 1 del Metrobús (Fuente: Elaboración propia. 2017)

En la figura 53 se muestran a los impactos sociales negativos de color rojo, los impactos sociales positivos se muestran de color azul, como se aprecia en la figura se presentó una mayor cantidad de impactos sociales negativos; sin embargo, para todos los impactos sociales negativos se realizó una serie de medidas de mitigación, los cuales representaron impactos económicos, lo cual minorizo los impactos negativos; sin embargo, muchas veces las políticas no fueron bien implementadas o suficientes, en zonas de alta afluencia sigue existiendo ambulantaje, existe una saturación en la avenida de los Insurgentes, las nuevas políticas de tránsito siguen sin ser respetadas y los establecimientos comerciales no están del todo coordinados para tener una mejor operación vehicular, por esta razón se decidió otorgarle una calificación de 0.30.

El Tren Ligero de la Ciudad de México representa un caso de estudio particular para sus impactos, la línea se remonta al siglo XIX con la operación de los tranvías en la Ciudad de México, a la línea Tasqueña-Xochimilco y Xochimilco-Tulyehualco; por lo que podría complicarse el pensar en un impacto en el ambiente en el que se implementó, ya que prácticamente el Tren Ligero se fue desarrollando al mismo ritmo que la sociedad que lo rodeaba, a pesar de ser evolucionado de tranvía a Tren Ligero en los años 90. Para analizar los impactos del tren ligero se hará con base en la publicación de Arndt, et al., (2009) en el cual se hace un análisis de varios casos de estudios de trenes ligeros en ciudades estadounidenses y los impactos que se han presentado.

Impactos sociales del Tren Ligero

1. Incremento en la atracción de pasajeros y reducción de los automóviles: Como mencionan los autores Arndt, et. al., (2009) los sistemas de transporte ferroviarios atraen una mayor cantidad de pasajeros que los autobuses; por lo tanto, son más efectivos reduciendo los automóviles en las calles, que es el fin de los sistemas de transporte urbanos. Los

incrementos para viajes realizados a diario con motivo trabajo-hogar (*commute*, en inglés) fueron ocho veces mayores a los del servicio de autobús; además, entre los años 1970-2000 las pérdidas, en cuanto a la distribución de viajes, de los sistemas de transporte fueron de entre el 20% y 23% en ciudades con desarrollo principal en sistema de transporte urbano ferroviario, comparada con la pérdida de 60% en ciudades con desarrollo principal en sistemas de transporte urbano de autobuses, en Estados Unidos.

2. Seguridad: Los sistemas ferroviarios son más seguros que los sistemas de autobuses. En Estados Unidos las ciudades con pequeños sistemas ferroviarios o ciudades con solamente sistemas de autobuses presentan una mayor cantidad de fatalidades por cada cantidad de pasajeros anuales por millas, estas estadísticas se repiten en países como Canadá y Australia. La Ciudad de México también presentó esta tendencia, ya que la Línea 1 del Metrobús tuvo un 50% más de accidentes que el Tren Ligero de la Ciudad de México, en el año 2016.
3. Impactos en la economía de los usuarios: Las personas gastan menos en pasajes en sistemas ferroviarios, como el tren ligero, que en sistemas de autobuses. En Estados Unidos, en 2003, los residentes de ciudades con grandes sistemas ferroviarios gastaron 2803 USD en transporte (a excepción de Nueva York) mientras que en las ciudades con sistemas de autobuses como modo principal de transporte gastaron 3350 USD (Bureau of Labor Statistics) Situación similar sucede en la Ciudad de México, los autobuses concesionados tienen el precio más alto (entre 6 y 7 pesos) El Metrobús tiene un precio de \$6, mientras que el Tren Ligero de la Ciudad de México cuesta la mitad, solo \$3, lo que puede representar un ahorro substancial en la economía de las familias de bajos recursos.
4. Mejoramiento del espacio urbano: Los sistemas de Tren Ligero han permitido desarrollar comunidades más habitables, al permitir un sistema de transporte para las personas que no manejan, los nuevos sistemas de trenes ligeros permiten el no ser maniobrados, y representan una solución para las sociedades a largo plazo.

Los sistemas de tren ligero representan una alternativa para los usuarios más económica, por lo que los usuarios gastan menos en transporte de sus ingresos, también representa una alternativa accesible a los usuarios de movilidad limitada o que no saben conducir. En cuanto a transporte, los trenes ligeros atraen una gran cantidad de pasajeros, inclusive mayor a los sistemas de autobuses, permitiendo una reducción del congestionamiento en las vías y una mejor movilidad. Debido a la acotación temporal, no es posible determinar los impactos sociales negativos del Tren Ligero de la Ciudad de México, al ser un proyecto que ha estado presente a lo largo de la historia de la ciudad, los impactos sociales negativos suelen ser específicos de cada proyecto. Por esta razón se le decidió otorgar una calificación de 0.70 para impactos sociales para los trenes ligeros.

Por lo tanto, las calificaciones quedarían resumidas en la siguiente tabla:

Tabla 52 Valores de impactos sociales para BRT y LRT

Sistema	Valor de calificación de Impactos Sociales
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	0.30
Tren Ligero de la Ciudad de México	0.70

5.3.2 Económicos

Muchos economistas del transporte afirman que todos los impactos se traducen en impactos económicos, y la mayoría de las veces es la única forma de analizarlos, traduciéndolos a valores monetarios, aun cuando sea muy difícil de valorar algunos parámetros (como el ahorro en tiempo) La mayoría de las veces los impactos sociales negativos se traducen en impactos económicos negativos, debido a que requieren medidas de mitigación. Los sistemas de transporte también tienen la posibilidad de detonar la economía de las localidades en las que se desarrollan, generando impactos positivos. En este apartado se analizarán los impactos económicos positivos y negativos para ambos modos de transporte, con base en lo expuesto se otorgará una calificación basada en el criterio del autor.

Impactos económicos positivos de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México:

1. Reducción en la emisión de contaminantes: La situación de los autobuses concesionados que operaban en la avenida de los Insurgentes era deplorable, no solo prestaban un muy bajo nivel de servicio, la condición de la antigüedad de las unidades generaba una gran cantidad de gases contaminantes, es por esto que el Banco Mundial financió este proyecto como una medida de mitigación para la reducción de emisión de contaminantes en la Ciudad de México a largo plazo.

Se estimaba que en 2009 el costo total debido a la degradación ambiental era de aproximadamente el 9% del total del Producto Interno Bruto, del cual se estimaba que el 90% era debido a contaminación del aire (The World Bank, 2009) Por lo que las reducciones en las emisiones representaban una reducción en los gastos del gobierno central.

Antes y después de la implementación del Metrobús en la Avenida de los Insurgentes, el Instituto de Ecología desarrollo un estudio para poder determinar la cantidad de contaminantes producidos por los diferentes sistemas de transporte.

Tabla 53 Resultados del Estudio de Emisiones antes y después la implementación del Metrobús en la Avenida de los Insurgentes

	Modo de Transporte		
	Microbús	Autobús	Metrobús
Número de ensayos	36	37	68
Monóxido de Carbono (ppm)	15.8	11.4	7.5
PM ₁₀ (μg/m ³)	152	129	99
PM ₂₅ (μg/m ³)	196	202	183
Benceno (ppbv)	10.2	8.9	4.2

(INEGI, 2006)

La implementación del Metrobús representó una clara reducción en la emisión de contaminantes, por lo que representa una medida que ayuda a reducir el gasto debido a la contaminación ambiental.

2. Mejoramiento del paisaje urbano: Se desarollo un estudio por parte del Colegio de México para poder desarrollar una uniformidad en las estaciones y terminales; además de mejorar la imagen urbana en el entorno del corredor. Otro proyecto especial fue el desarrollo de la zona de la Palma, el cual consistía en mejorar la zona de la Palma, en San Ángel. Todas estas acciones potencializaron de manera indirecta la economía de las zonas aledañas al corredor Insurgentes.
3. Nueva oportunidad comercial: La línea 1 del Metrobús

Impactos económicos negativos de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México

1. Medidas de mitigación: El principal impacto económico de la Línea 1 del Metrobús fue la mitigación de los impactos económicos sociales generados por el proyecto. En total se contaba con cinco actividades que se tenían que mitigar, las cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 54 Actividades de mitigación y costos de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México

Actividad	Medida de Mitigación	Costo
Reorganización de ambulantes	Terminal Norte Oriente	\$14'872,540.00
	Terminal Norte Poniente	\$5'000,000.00
Desplazados Ruta 2	Capacitación	\$630,000.00
Protección a Monumentos	Rehabilitación de la escultura de Indios Verdes	\$13'000,000.00
	Reforestación general	\$10'285,449.00
Reforestación del corredor	Áreas verdes (camellones y banquetas)	\$3'000,000.00
	Estudio	\$2'000,000.00
Paisaje urbano	Plataforma de estaciones	\$67'227,771.00
	Estructura metálica y acabados	\$8'000,000.00

Estas actividades fueron presentadas como impactos sociales negativos o impactos económicos positivos; a pesar de ser actividades que tenían como objetivo mitigar una actividad negativa o generar un impacto positivo, el poder concretar estas actividades requirió de un gasto el cual no hubiera sido necesario si no se hubiera implementado el Metrobús en el corredor.

2. Zonas comerciales: Debido a la introducción del Metrobús en la avenida de los Insurgentes fue necesario la adecuación de un carril para el uso exclusivo del sistema, por lo que la capacidad de la vía para el tránsito mixto se vio afectada y limitada. Uno de los principales puntos a atender fue la adecuación de las zonas comerciales, ya que era necesario reajustar las zonas de carga y descargar, así como los estacionamientos y valet-parking, para que no generaran congestión en el corredor. Para poder cumplir este objetivo se tuvieron que construir 14 bahías, adecuar los valet-parking de los establecimientos en calles adyacentes y crear nuevos estacionamientos a lo largo del corredor. Para estas obras se requirió una inversión de \$1'440,000.00. Esta medida no fue resuelta completamente, la Avenida de los Insurgentes sigue sufriendo de interrupciones debido al ascenso y descenso de mercancías y productos en los comercios.

Con base en lo expuesto anteriormente se decidió otorgar una calificación de 0.60 para los impactos económicos de la Línea 1 del Metrobús, debido a que los costos económicos fueron para mitigar los impactos sociales; sin embargo, medidas como la reorganización de los ambulantes, los choferes desplazados de la Ruta 2 y las adecuaciones para las zonas comerciales no fueron inversiones que realmente solucionaran el problema, además de que medidas como la renovación de la flota y la reducción de emisiones por parte del Metrobús se vio mermada por la congestión debido a la segregación por parte del sistema; por lo tanto, se le ha decidido otorgar una calificación de 0.60.

Impactos económicos del Tren Ligero

Debido a la evolución histórica por parte del Tren Ligero se acota esta tesis para hacer referencia al estudio por parte de Arndt, et. al., (2009) haciendo una reflexión a los observado en la actualidad, ya que el origen del Tren Ligero se remonta a la evolución del tranvía creado en el siglo XIX.

1. Reducción de la energía consumida: La cantidad de energía consumida por los sistemas de trenes ligeros es considerablemente menor que los demás sistemas de transporte.

Los sistemas de trenes ligeros requieren una cantidad mucho menor de combustible para poder realizar el servicio que la mayoría de los sistemas de transporte (a excepción del metro) en relación con la cantidad de pasajeros transportados por unidad de longitud. En muchos países se ha confirmado esta aseveración, como lo muestra en la publicación de Arndt, et. al., (2009)

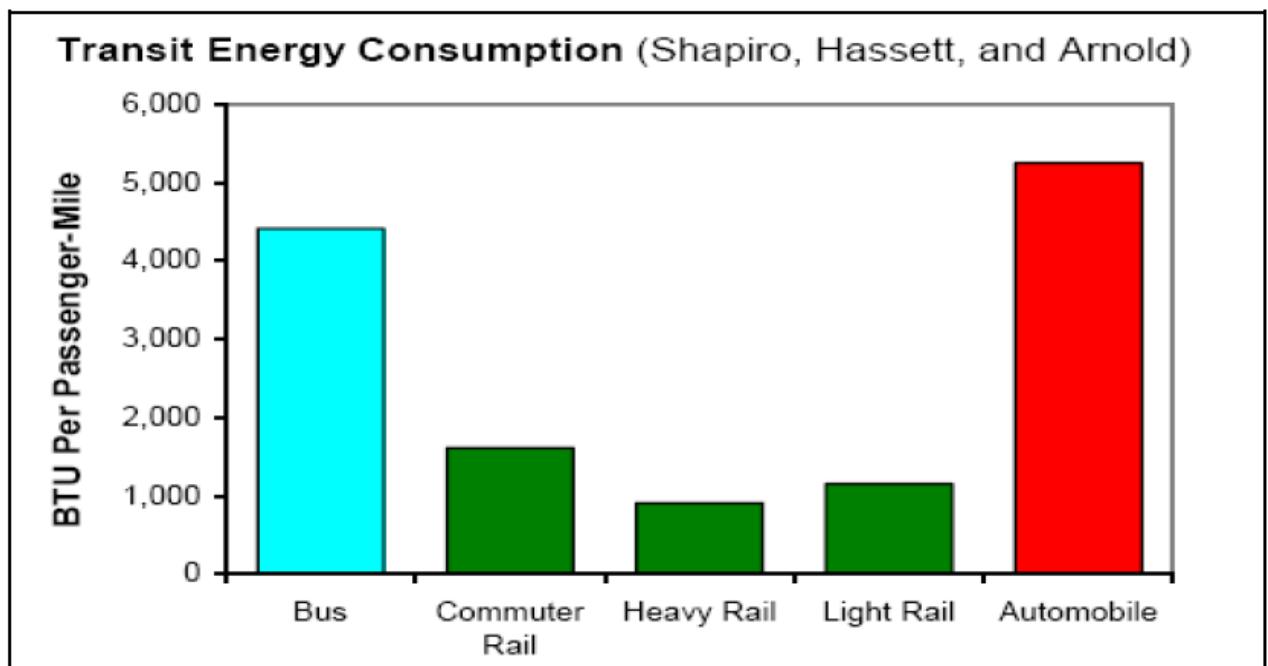


Figura 54 Comparativa de British Thermal Units por cada pasajero por milla de los autores Shapiro, Hassett & Arnold para los diferentes modos de transporte (Fuente: Arndt, et. al. 2009)

En la imagen se muestra como es mucho menor la cantidad de energía consumida por el tren ligero en comparación de los autobuses y el automóvil, esta situación también es similar en México, donde el tren ligero consume casi la mitad en pesos por kilómetro recorrido que el Metrobús de la Ciudad de México.

El Tren Ligero representa una inversión que a largo plazo generara un impacto económico mucho menor por la cantidad de combustible consumido.

2. Incremento en la plusvalía de las zonas: Los sistemas de transporte ferroviario generalmente incrementan el valor de las propiedades alrededor de la línea sobre la que transitan (Arndt, et. al., 2009) Las propiedades incrementan su valor debido a la conectividad que se generan, al tener un modo de transporte público cercano que te conecte a la red de transporte público; además, muchos comercios se desarrollan alrededor de las estaciones, debido a la cantidad de personas que diariamente transitan por la línea, por lo que no solo la conectividad se mejora, sino también cuentan con una gran cantidad de servicios.
3. Reurbanización de las zonas: Se ha descubierto que los sistemas de trenes ligeros funcionan como catalizadores de las zonas urbanas próximas a las que se desarrollan, como consecuencia de mejorar la conectividad en la zona (debido a que las zonas donde se desarrollan los trenes ligeros se logran integrar fácilmente a la red de transporte público) se incrementan la plusvalía (como se mencionó en el punto anterior), los servicios se incrementan en las zonas, y más gente se mueve a vivir a las zonas donde se desarrolla el sistema de tren ligero, gracias a esto la zona va generando plusvalía, y poco a poco se van mejorando la habitabilidad de la zona. Esto poco a poco va generando un ciclo de desarrollo urbano (Arndt, et. al., 2009)

Un claro ejemplo de esto es el desarrollo que se vivió en la Ciudad de México gracias a los tranvías. Las estaciones de tranvías fueron claves en el desarrollo de la ciudad, especialmente en zonas como Tacubaya y Buenavista, que hasta la fecha siguen siendo puntos importantes de conectividad de la ciudad. Situación similar sucedió en el sur de la ciudad, gracias al tranvía Tasqueña-Xochimilco, que después se convertiría en el tren ligero, transformando el sur de la Ciudad de México, y desarrollando una de las zonas más turísticas de la ciudad, Xochimilco.

Por lo anterior, se decidió otorgarle al Tren Ligero de la Ciudad de México una calificación de 0.80, debido a la capacidad que tiene de generar impactos positivos económicos en las zonas en las que se desarrolla, generando plusvalía, incrementando los comercios y incrementando la habitabilidad.

Por lo tanto, a manera de resumen se presenta la siguiente tabla, la cual presenta los valores otorgados a la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México y al Tren Ligero de la Ciudad de México.

Tabla 55 Valores de impactos económicos para BRT y LRT

Sistema	Valor de calificación de Impactos Económicos
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	0.60
Tren Ligero de la Ciudad de México	0.80

5.3.3 Emisiones

Las emisiones que se generan por parte de los sistemas BRT y LRT son móviles, ya que son vehículos móviles a través de la vía pública. Estas emisiones son generadas debido a los diversos procesos que realizan los sistemas de transporte para poder generar su función. Las emisiones más comunes, en los vehículos de combustión interna, son las emisiones del escape, las cuales son resultado del uso del combustible y se emiten a través del escape. Las emisiones que se considerarán serán las emisiones evaporativas en circulación, las cuales son las emisiones de fugas de combustible en fase líquida o de vapor que se presentan cuando el vehículo está en movimiento (SEMARNAT, 2010)

Los vehículos de trenes ligeros, al ser eléctricos, no generan emisiones; sin embargo, el proceso de generación de energía eléctrica si genera emisiones de contaminantes, que es donde los promotores de vehículos BRT generan debate, al afirmar que el proceso de generación de energía eléctrica genera más emisiones contaminantes que los vehículos BRT, por lo que son mucho más “ecológicos”. Para poder generar una comparativa entre ambos se utilizará el método propuesto por el autor Puchalsky, C. M. (2009), en el cual desarrolla una fórmula para calcular las emisiones en la región de desarrollo (*Central Business District*) que incluye, para el tren ligero, la generación de energía eléctrica en las plantas, la perdida de energía en las líneas y el uso de energía eléctrica del vehículo.

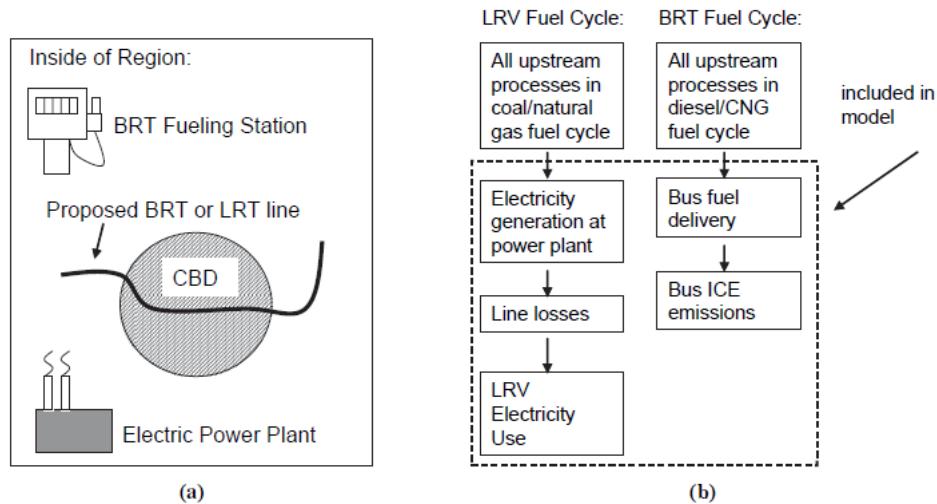


Figura 55 Representación gráfica de la región en la que se basa el Modelo de Puchalsky (Fuente: Puchalsky, 2009)

Para el caso de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México se utilizará la información proporcionada por el órgano descentralizado Metrobús, el cual informó a través de la Plataforma Nacional de Transparencia la cantidad de contaminantes que tenía previsto emitir en el 2017.

Para la comparativa se utilizarán los siguientes contaminantes 2, de los cuales se tomará como el cien por ciento del total (la calificación mayor) a la menor cantidad de contaminate, la otra cantidad obtendrá una calificación proporcional a esta, al final se obtendrá una calificación promedio de todos los contaminantes.

De acuerdo con la información proporcionada por el organismo descentralizado Metrobús, las emisiones emitidas para el año 2017 del Metrobús fueron las siguientes:

Tabla 56 Emisiones estimadas para 2017 de la Línea 1 Del Metrobús

Contaminante	Cantidad (en toneladas)
Dióxido de Carbono Equivalente (CO2EQ)	34,094
Monóxido de Carbono (CO)	42.9
Óxidos de Nitrógeno (NOX)	57.2
Material Particulado (PM)	0.64

Para el cálculo de las emisiones se utilizará la ecuación de Puchalsky, C.M. (2009), la cual está definida de la siguiente manera:

$$Emisiones = \frac{EF * ETC}{FPL} \left[\frac{(g/kWh)(kWh)}{\left(\frac{kWh}{kWh} \right)} \right]$$

Donde:

EF: Factor de Emisiones (masa/kWh)

ETC: Consumo Total de Energía (kilowatt-hora anual)

FPL: Factor de Pérdida de Línea

El Factor de Emisiones es un factor diseñado por la US *EPA (United States Environmental Protection Agency*, en inglés), el cual es un factor medido por región en los Estados Unidos, el cual considera la cantidad de contaminante (en unidad de masa, al ser Estados Unidos en libras) por cada kilowatt-hora producido de energía eléctrica; para esta investigación se utilizó el máximo valor por región, considerando que la peor situación de generación de energía eléctrica en los Estados Unidos, es el promedio de situación en México.

El Consumo Total de Energía fue lo registrado en kilowatts por el sistema Tren Ligero de la Ciudad de México en 2016.

El autor propone un Factor de Pérdida de 3%, debido a que de la energía eléctrica en las plantas baja de corriente para transmisión y distribución. El Factor de Pérdida de Línea es el Factor de Pérdida más 100%. Para esta tesis se utilizará el Factor de Pérdida propuesta por el autor; por lo tanto, el Factor de Pérdida de Línea es de 103%:

La siguiente tabla resume el cálculo para obtener las Emisiones producidas por el Tren Ligero:

Tabla 57 Emisiones calculadas para el Tren Ligero, debido a la generación de energía eléctrica

Contaminante	Factor de Emisión (lb/MWh)	(Ton/kWh)	Consumo de Energía (kWh)	Factor de Pérdida de Línea	Emisión (Ton)
Dióxido de Carbono (CO ₂)	3.87	0.0018	6384377	1.03	10880.6724
Dióxido de Azufre (SO ₂)	0.016584	0.0000	6384377	1.03	48.0254
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	0.006	0.0000027	6384377	1.03	17.3753
Mercurio (Hg)	9.65E-08	4.38E-11	6384377	1.03	0.0003

Como se puede apreciar en las tablas 56 y 57, los únicos contaminantes que comparten, y por lo tanto que se pueden comparar, son el Dióxido de Carbono (CO₂) y los Óxidos de Nitrógeno (NO_x) los cuales se muestran en las siguientes gráficas:

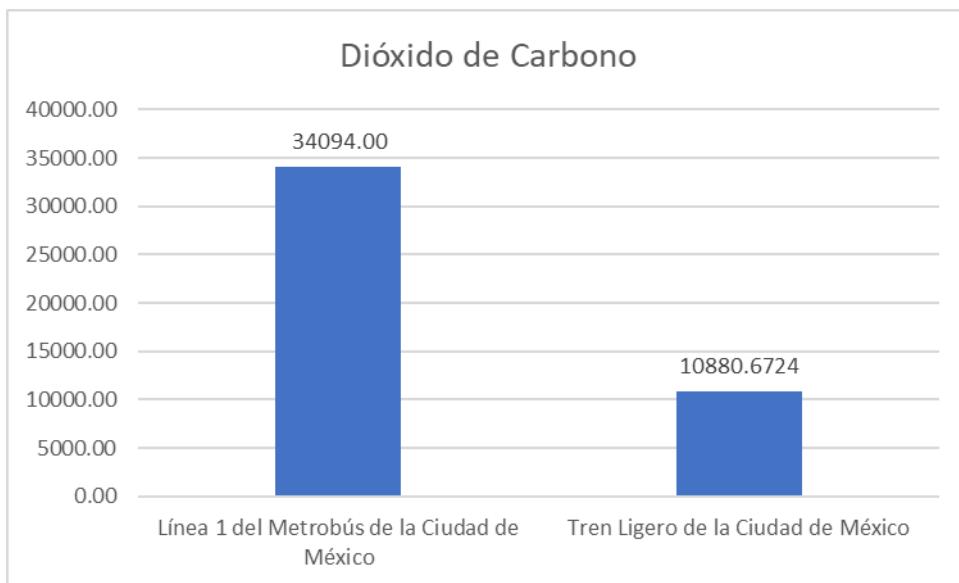


Figura 56 Comparativa de Emisiones de Dióxido de Carbono, en toneladas, anuales entre la Línea 1 del Metrobús y el Tren Ligero de la Ciudad de México

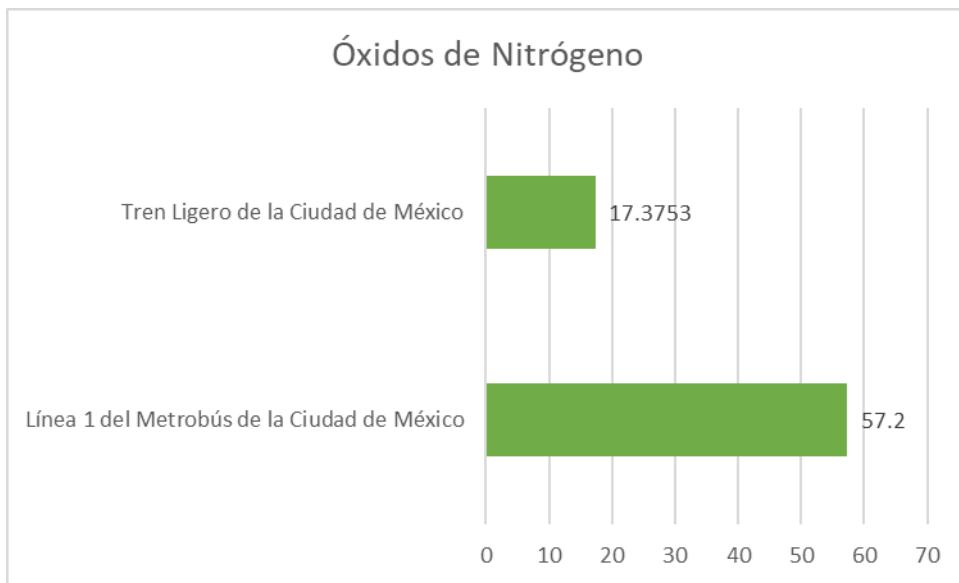


Figura 57 Comparativa de Óxidos de Nitrógeno, en toneladas, anuales entre la Línea 1 del Metrobús y el Tren Ligero de la Ciudad de México

Como se aprecia en los gráficos, las emisiones anuales del Tren Ligero son claramente menores que las de la Línea 1 del Metrobús; por lo tanto, la calificación de 100% será para el Tren Ligero, mientras que el Metrobús recibirá una calificación proporcional. La información de la calificación se presenta en la siguiente tabla, para obtener la calificación final del Metrobús se utilizó un promedio entre la proporción de ambos contaminantes, ya que en ambos es mucho mayor la producción del Metrobús.

Tabla 58 Valores de Emisiones para BRT y LRT

Contaminante (Toneladas)	Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Tren Ligero de la Ciudad de México	Calificación línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación del Tren Ligero de la Ciudad de México
Dióxido de Carbono	34094.00	10880.6724	0.3191	1
Óxidos de Nitrógeno	57.2	17.3753	0.3038	1
Promedio			0.3115	1

5.4 Nivel de Servicio

El Nivel de Servicio es un parámetro de suma importancia en una comparativa entre varios sistemas de transporte, ya que representa el punto de vista de los usuarios, la experiencia y comodidad con la que se desarrollan en el sistema de transporte.

EL Nivel de Servicio nunca debe ser menospreciado por los planificadores de transporte, ya que los usuarios son los que conviven diariamente con los sistemas de transporte, a ellos es a los que se destina la planeación; además, un mejor nivel de servicio puede influir directamente en todos los demás parámetros, ya que, si hay un mejor nivel de servicio, la captación de pasajeros será mucho mayor. Es necesario recalcar que, en la mayoría de los casos, un mayor nivel de servicio implica una mayor cantidad monetaria en los costos.

El Nivel de Servicio, debido a su importancia, la cuarta característica de la comparativa, la cual representa el 20% de la calificación final, esta característica está integrada por dos componentes: el la calidad y el precio del servicio, cada componente con la misma ponderación; es decir, cada componente equivaldrá al 50% de la calificación de la característica. Lo anterior se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 59 Ponderación del Nivel de Servicio para la comparativa

Nivel de Servicio	0.2	Calidad del Servicio	0.5
		Precio	0.5

Matemáticamente estará expresado de la siguiente forma:

$$NS = \varepsilon_1 Calidad + \varepsilon_2 Precio$$

Con los valores propuestos para esta tesis:

$$1 \geq NS = 0.5Calidad + 0.5Precio$$

Donde:

NS: Nivel de Servicio

5.4.1 Calidad del Servicio

La calidad del servicio representa el parámetro en el cual el pasajero evaluara el confort y la satisfacción del servicio de transporte, es un parámetro difícil de evaluar, ya que su naturaleza es cuantitativa, y depende de una serie de muchas características, no todos los pasajeros estarán conformes con la misma calidad del servicio.

Para poder evaluar la calidad de servicio se utilizará lo presentado por los autores Suárez & Delgado (2015) los cuales presentaron los resultados obtenidos en la Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte 2014 para obtener las calificaciones de los medios de transporte. Los resultados se generaron a partir de la pregunta 17 de la encuesta:

PERCEPCIÓN DEL TRANSPORTE Y MEDIO AMBIENTE

16. En su opinión, ¿cuál considera que es el mejor medio de transporte en su localidad o ciudad? (Mostrar tabla 3)

NS	(98)	NC	(99)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
----	------	----	------	--------------------------	--------------------------

17. Usted, ¿cómo considera el transporte público en su localidad o ciudad? (Leer opciones)

Eficiente	(1)	ó	Ineficiente	(2)	
Rápido	(1)	ó	Lento	(2)	
Barato	(1)	ó	Caro	(2)	
Seguro	(1)	ó	Inseguro	(2)	
Cómodo	(1)	ó	Incómodo	(2)	

Figura 58 Pregunta 16 y 17 de la Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte (Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones Jurídicas)

Los resultados consideraban ocho parámetros: rapidez, seguridad, comodidad, tiempo de espera, cobertura, costo, condiciones de la unidad y limpieza. Los resultados, para BRT y LRT, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 60 Calificaciones a modos de transporte por rango

Modo de Transporte	Rapidez	Seguridad	Comodidad	Tiempo de espera	Cobertura	Costo	Condiciones de la unidad	Limpieza	Calificación global
BRT	8	6	9	2	2	4	3	3	8
Tren Urbano	13	14	15	7	7	6	7	8	15

*BRT: Incluye Metrobús, Macrobús, Optibús, RUTA

**Tren Urbano: Incluye metro, suburbano y tren ligero

La evaluación consideraba un total de 19 modos de transporte evaluados, de los cuales el primer lugar en la calificación global fue para el automóvil privado, y el último lugar el transporte eléctrico (tranvía y tren ligero)

El BRT presenta valores bien calificados para limpieza, condiciones de la unidad, cobertura y tiempo de espera, siendo el mejor evaluado para los sistemas de transporte urbano público (está solo detrás del transporte escolar/de personal y avión)

El tren urbano presenta una muy mala evaluación, estando en los peores evaluados en comodidad. Este valor debe ser considerado con cuidado, ya que la categoría de tren urbano incluye otros dos modos de transporte con similitudes, pero también con grandes diferencias en sus parámetros de desempeño.

La valoración de este parámetro se obtendrá conforme al lugar que obtuvieron en la evaluación general de todos los modos de transporte; es decir, ninguno de los dos obtuvo el 100% de la calificación, ya que no obtuvieron el primer lugar de los votos, sino la proporcionalidad debido a la calificación que obtuvieron en el ranking.

Tabla 61 Calificación de Calidad del Servicio para BRT y LRT

Sistema	Lugar en la Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte	Valor total de Calidad del Servicio
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	8	0.6316
Tren Ligero de la Ciudad de México	15	0.2632

5.4.2 Precio

El Precio es uno de los parámetros más sensibles para los usuarios, más en países en vías de desarrollo como México. En México se gasta hasta el 19% de los ingresos totales en los servicios de transporte, lo que reduce el gasto en otros rubros, como la educación (donde solo se gasta el 1.5%) o ropa y calzado (Redacción Animal Político, 2015)

En la Ciudad de México, todos los servicios de transporte urbano público (no concesionados) se rigen por medio de una tarifa plana; es decir, no importa la distancia de que se viaje, el cobro por el servicio de transporte es el mismo; sin embargo, el nuevo Reglamento de Movilidad, en su artículo 196 ya incluye el término de tarifa diferencial, el cual es una variación del cobro conforme a la distancia o tipo de servicio que se utilice en un recorrido. Actualmente el Gobierno de la Ciudad de México está planteando la posibilidad de cambiar el esquema de pago para el servicio de transporte público (López, 2017)

El Metrobús de la Ciudad de México cuenta con una tarifa plana, y el cobro se realiza antes del ingreso de las estaciones, por medio de una tarjeta inteligente de prepago, compatible con otros sistemas de transporte. La tarifa a la fecha por el servicio es de \$6.00 MXN. La tarjeta inteligente tiene un costo adicional (Metrobús, 2018)

El Tren Ligero de la Ciudad de México cuenta, también, con una tarifa plana, la cual es de \$3.00 MXN. Para acceder a las estaciones se requiere adquirir una tarjeta inteligente de prepago, la cual es compatible con otros sistemas de transporte en la ciudad (Ciudad de México, 2018)

Para evaluar el precio se tomará como referencia el que tiene un menor costo, ya que de esta forma es la que mayormente se beneficia la economía de los usuarios, el cual representará el cien por ciento de la calificación, el sistema de transporte que tiene un mayor precio obtendrá una calificación proporcional a la menor. Lo siguiente se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 62 Valores de Precio para BRT y LRT

Sistema	Precio del Servicio	Valor total de Precio
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	\$6.00	0.5000
Tren Ligero de la Ciudad de México	\$3.00	1.0000

5.5 Costos

El costo suele ser uno de los parámetros decisivos al momento de seleccionar qué modo de transporte implementar en alguna ciudad, muchas veces llega a ser el único parámetro considerado, muchas veces no se suele considerar el costo total en el análisis, sino que el costo de inversión es el único parámetro que se suele tomar en cuenta al momento de comparar varios modos de transporte, como fue el caso de la Ciudad de México al momento de seleccionar el

Metrobús para el corredor Insurgentes. Aunque en muchas ocasiones sea el único parámetro a evaluar en la selección de un modo de transporte, en este análisis se considerara como un 20% de la calificación total de la evaluación de los modos de transporte; además, considerando los costos no solo en el corto plazo, sino con variación respecto al tiempo y a la demanda.

La evaluación del apartado de los costos estará integrada por dos parámetros, el costo total anualizado y el análisis de sensibilidad. El costo total, es la suma de tres costos anualizados Este costo se calculará anualizado, para el cual considera tres grandes grupos: inversión, operación y ambiente (emisiones) Lo cual se representa en la siguiente ecuación:

$$\text{Costo total (anualizado)} = \text{Costos de Inversión} + \text{Costos de Operación} + \text{Costos Ambientales}$$

Las unidades son [\\$ MXN/año]

El análisis de sensibilidad constará en una variación de los costos debido a variaciones en sus parámetros operativos, para ver la variación del costo con respecto a la demanda.

Ambos componentes tendrán la misma importancia en el análisis; es decir, se componente será el mismo. Matemáticamente el modelo estará integrado de la siguiente manera:

$$Co = \theta_1 \text{Costos totales} + \theta_2 \text{Análisis de Sensibilidad}$$

Con los valores propuestos para esta tesis en los indicadores:

$$1 \geq Co = 0.50 \text{ Costos totales} + 0.50 \text{ Análisis de Sensibilidad}$$

5.5.1 Costos de inversión

El Costo de inversión representa el costo por la implementación del sistema; es decir, el costo por la construcción e infraestructura del modo de transporte.

El costo de inversión incluye los gastos por los vehículos, de las estaciones, de la vía y todo lo necesario para que el sistema de transporte pueda iniciar operaciones.

El cálculo del costo de inversión se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Costo total de inversión (anualizado)}$$

$$= A * \text{Costo total de inversión} + CI * \text{Costo total de inversión} + \text{Costo total de inversión}$$

Donde:

A: Amortización

CI: Costos Indirectos

La amortización representa un porcentaje del costo total de inversión, y se debe a un costo que se cargará debido a la pérdida de valor que presentará el sistema a lo largo del tiempo, para su cálculo se utilizará la siguiente ecuación:

$$A = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}}$$

Donde:

i : Tasa de interés

n : Tiempo de vida del sistema

Para el cálculo de la Amortización se utilizará, como tasa de interés, la tasa de interés objetivo promedio establecida por el Banco de México en el último año (2017), la cual es de 6.7%. El tiempo de vida que se utilizará para este estudio es de 30 años, antes de tener que hacer un cambio de significativo en alguna remodelación del sistema; con lo cual, la amortización queda calculada de la siguiente manera:

$$A = \frac{0.067}{1 - (1 + 0.067)^{-30}}$$

$$A = 0.078$$

Los Costos Indirectos representan los costos que no serán posibles determinar y que se van presentando durante la creación del sistema de transporte; por lo tanto, no se pueden cuantificar, solo hasta el término de la construcción. Estos costos representan un porcentaje del costo total de la construcción del sistema, y debido a que en esta tesis ya se tiene el costo total del sistema, no se incluirá en este cálculo; es decir, ya están incluidos en el costo presentado.

La línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México presentó el siguiente ejercicio económico, entre los años 2007 y 2008, referentes a los costos de inversión:

Tabla 63 Costo de Inversión por concepto de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México

Concepto	Costo (\$ MXN)
Primera Etapa de la Línea 1 del Metrobús (vía, estaciones e intersecciones)*	\$ 132,827,654.73
Segunda Etapa de la Línea 1 del Metrobús (vía, estaciones e intersecciones)*	\$ 203,679,228.23
Supervisión técnica en la segunda etapa de la Línea 1 del Metrobús*	\$ 8,145,631.44
Flota	\$ 132,000,000.00
TOTAL	\$ 476,652,514.40

*Datos obtenidos de la Secretaría de Obras y Servicios; a través de la Plataforma Nacional de Transparencia

Todos los datos, a excepción del cálculo de la flota, se obtuvieron de la Plataforma Nacional de Transparencia, por medio de la Secretaría de Obras y Servicios. Para el cálculo del precio de la flota se utilizaron los siguientes datos:

1. El precio de enganche por autobús fue de \$100,000.00, lo que representaba el 20% del costo total del autobús; por lo tanto, el costo total por autobús fue de \$500,000.00.
2. Se determinó ese como precio base de autobús articulado, despreciando la variación en precios y modelos.
3. Para el cálculo del precio por autobús articulado se le consideró de un costo de 50% más caro que el autobús articulado; por lo tanto, el precio por autobús biarticulado se consideró de \$750,000.00, sin importar el modelo o el año de adquisición.
4. Se multiplicó la respectiva flota total (al 2017) por el precio de cada tipo de autobús.

El cálculo del costo de inversión anualizado de la Línea 1 del Metrobús queda definido de la siguiente manera:

$$\text{Costo total de inversión (anualizado L1MB)} = 0.078 * \$476,652,514.40 + \$476,652,514.40$$

$$\text{Costo total de inversión (anualizado L1MB)} = \$ 513,831,410.52$$

El Tren Ligero de la Ciudad de México presenta los siguientes valores para el costo de inversión, lo cual representa su valor en registros contables al 31 de diciembre del 2016.

Tabla 64 Costos de Inversión por concepto del Tren Ligero de la Ciudad de México

Concepto	Costo (\$ MXN)
Vía del Tren Ligero	\$ 4,796,677,847.80
Línea Elevada del Tren Ligero	\$ 415,988,238.74
Estaciones	\$ 45,402,224.16
Equipo Rodante	\$ 45,402,224.16
TOTAL	\$ 5,303,470,534.86

*Datos proporcionados por la Dirección de Administración y Finanzas del Servicio de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México, a través de la Plataforma Nacional de Transparencia.

Por lo tanto, el costo total de inversión anualizado del Tren Ligero de la Ciudad de México queda de la siguiente manera:

$$\text{Costo total de inversión (anualizado TL)} = 0.078 * \$5,303,470,534.86 + \$5,303,470,534.86$$

$$\text{Costo total de inversión (anualizado TL)} = \$ 5,717,141,236.58$$

Muchos estudios económicos se quedan solo en este paso, asumiendo que el costo de inversión es el factor decisivo, donde claramente se ve que el Autobús de Tránsito Rápido es una opción más económica que el Tren Ligero; sin embargo, solo representa el costo inicial, no el costo a lo largo del tiempo.

5.5.2 Costos de operación

Estos costos representan los gastos necesarios que se tienen que cubrir para que el sistema de transporte pueda operar y ofrecer su servicio, estos costos son fijos y se mantendrán siempre que opere el sistema de transporte, a diferencia del costo de inversión, que solo se tiene que cubrir una vez.

Estos costos incluyen conceptos como la operación de los vehículos, mantenimiento en las vías, mantenimiento de los neumáticos, operación de los sistemas de transporte inteligente, el pago a los operadores, los costos de oficina, entre otros.

Existen múltiples formas de calcularlos, para este estudio no será necesario ningún modelo matemático, ya que se utilizará los datos proporcionados por los sistemas de transporte, los cuales son valores obtenidos reales.

Tabla 65 Costos operativos de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México, por concepto, en el año 2016

Concepto	Costo (\$ MXN)
Financiamiento	\$ 56,500,000.00
Recaudo	\$ 56,900,000.00
Conexos	\$ 48,300,000.00
Kilometraje	\$ 605,100,000.00
TOTAL	\$ 766,800,000.00

*Valores obtenidos a través de la Plataforma Nacional de Transparencia

Tabla 66 Costos operativos por concepto para el Tren Ligero de la Ciudad de México, en el 2016

Concepto	Costo (\$ MXN)
Operación	\$ 71,308,047.47
Mantenimiento	\$ 73,902,172.16
TOTAL	\$ 145,210,219.63

*Datos obtenidos de la Dirección de Administración y Finanzas del Servicios de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México

Como se aprecia en las tablas, el costo de operación del Metrobús de la Ciudad de México es mucho más caro que el del Tren Ligero de la Ciudad de México, siendo cinco veces más barato.

5.5.3 Costos ambientales

Los costos ambientales son la representación de la mitigación de los daños debido a la afectación a la población por las emisiones contaminantes de los sistemas de transporte.

La estimación de los costos ambientales es parte de la ingeniería de medio ambiente, y muchas veces es ponerles un costo asociado a las emisiones, para esta investigación se utilizarán los valores propuestos por Matthews & Hendrickson (2001)

Tabla 67 Valores en dólares para los costos sociales asociados a las emisiones de los Sistemas de Transporte

Contaminante	Costo Social (USD/ton) Promedio
Monóxido de Carbono (CO)	\$520.00
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	\$2,800.00
Dióxido de Azufre (SO ₂)	\$2,000.00
Material Particulado (PM)	\$4,300.00
Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC)	\$1,600.00
Potencial de Calentamiento Global (CO ₂ eq)	\$13.00

El siguiente paso es obtener el costo social debido a los contaminantes para la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México y para el Tren Ligero, para esto se utilizó el precio promedio del dólar del 2017, que resultó de \$18.86, ya que las emisiones se calcularon para ese año; además, así ya se afecta por un valor inflacionario los valores propuestos por los autores. La información se presenta en las siguientes tablas.

Tabla 68 Costos sociales por emisiones de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México

Contaminante	Toneladas	Costo USD	Costo \$ MXN
Dióxido de Carbono Equivalente (CO ₂ EQ)	34,094	\$443,222.00	\$8,359,166.92
Monóxido de Carbono (CO)	42.9	\$22,308.00	\$420,728.88
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	57.2	\$160,160.00	\$3,020,617.60
Material Particulado (PM)	0.64	\$2,752.00	\$51,902.72
TOTAL		\$628,442.00	\$11,852,416.12

Tabla 69 Costos sociales por emisiones del Tren Ligero de la Ciudad de México

Contaminante	Toneladas	Costo USD	Costo \$ MXN
Dióxido de Carbono (CO2)	10880.6724	\$141,448.74	\$2,667,723.27
Dióxido de Azufre (SO2)	48.0254	\$96,050.87	\$1,811,519.31
Óxidos de Nitrógeno (NOX)	17.3753	\$48,650.94	\$917,556.82
TOTAL		\$286,150.55	\$5,396,799.40

Como se aprecia en las tablas, el costo asociado a las emisiones también es mucho menor para el Tren Ligero de la Ciudad de México, siendo dos veces más barato y ahorrando casi 6.5 millones de pesos al año.

El análisis financiero es una parte muy importante en la comparativa de sistemas de transporte, ya que es una cantidad monetaria que se utilizara para mitigar los daños causados a la sociedad, y que en muchos estudios se está dejando de lado.

5.5.4 Costos totales

En esta parte del estudio se analizarán los costos totales anuales para cada sistema de transporte, la Línea 1 del Metrobús y el Tren Ligero de la Ciudad de México, lo cual integra los costos antes mencionados, formulados en la siguiente ecuación:

$$\text{Costo total (anualizado)} = \text{Costos de Inversión} + \text{Costos de Operación} + \text{Costos Ambientales}$$

El análisis constará de dos partes, la primera será integrar todos los costos, en un costo final total. La segunda parte constará en hacer un análisis a futuro, simulando los mismos costos para un ejercicio de 10, 20, 30 y 35 años. Todos los valores permanecerán iguales, el único valor que se modificará serán los costos operativos, considerando un aumento del 7% anual debido a inflación.

La calificación de este componente estará integrada por el costo total después del ejercicio considerado a 40 años, siendo la calificación de 100% el menor costo, y la otra calificación proporcional al menor valor obtenido.

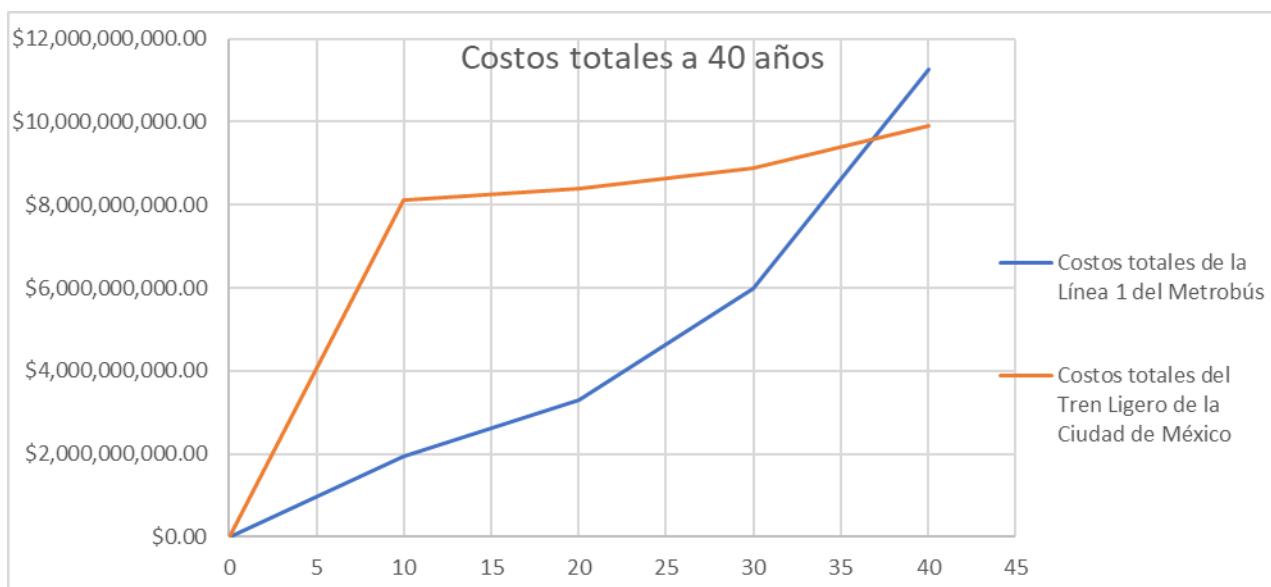


Figura 59 Gráfica de costos totales de la Línea 1 del Metrobús y del Tren Ligero de la Ciudad de México a treinta y cinco años

Como se muestra en la gráfica, la Línea 1 del Metrobús tiene un incremento considerable en los costos operativos, al punto que después de 30 años el costo total entre un sistema de transporte de BRT y LRT es casi el mismo, y después de 35 años el sistema de LRT es más barato, en total, que un sistema de BRT. Pensar en una edad de 35 años no es tan lejano, considerando la vida útil de los sistemas de transporte, considerando, por ejemplo, que el Metro de la Ciudad de México cumplirá 49 años en septiembre; además, en la mayoría de los estudios de costos se establece un periodo de análisis entre los 20 y los 60 años. Los costos totales se resumen en la siguiente tabla:

Tiempo (años)	Costos totales de la Línea 1 del Metrobús	Costos totales del Tren Ligero de la Ciudad de México
10	\$ 1,935,414,350.73	\$ 5,989,501,101.99
20	\$ 3,298,837,140.51	\$ 6,247,694,793.64
30	\$ 5,980,896,131.98	\$ 6,755,600,864.60
35	\$ 8,176,901,286.83	\$ 7,171,462,094.18

Los análisis a lo largo del tiempo son de suma importancia para una comparativa, ya que representa el sistema de transporte que será más barato en el tiempo, no en el futuro inmediato. La calificación de Costos Totales se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 70 Calificación para Costos Totales de BRT y LRT

Sistema	Costo total a 40 años	Valor total de Precio
Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	\$ 11,256,912,117.39	0.8788
Tren Ligero de la Ciudad de México	\$ 9,892,992,362.70	1.0000

5.5.4 Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad consistirá en ver cómo se comportan los costos con variaciones en los parámetros, las principales variaciones que se pueden hacer en un estudio es variaciones en la demanda y variaciones en los parámetros operativos (velocidad de operación, intervalo de paso, entre otros), para este estudio se considerará variaciones en la demanda de los pasajeros.

Para este análisis se utilizará un costo unitario, dividiendo la demanda total en la demanda máxima diaria de los sistemas, después se consideraron cuatro escenarios, considerando un 1% de la demanda actual (demanda muy baja), el siguiente escenario considera un 50% de la demanda total, el tercer escenario un 75% de la demanda total y finalmente un escenario con las características actuales. Además, se consideró un escenario en el cual antes del 50% de la demanda actual los costos operativos del sistema BRT son más baratos de los actuales, reduciendo los costos un 20% en el primer escenario y un 10% en el segundo escenario.

La siguiente tabla presenta un resumen del cálculo de los diferentes escenarios para ambos sistemas:

Tabla 71 Escenarios de los costos para los diferentes tipos de demanda

Pasajeros al año	Demanda muy baja	Demanda media	Demanda alta	Demanda muy alta
Costos operativos BRT	\$ 15,383,417.12	\$ 81,441,620.05	\$ 180,981,377.89	\$ 361,962,755.79
Costos operativos LRT	\$ 17,648,300.88	\$ 88,241,504.39	\$ 176,483,008.79	\$ 352,966,017.57

Para los primeros escenarios los costos operativos del Metrobús son menores que los de LRT, aunque no en gran medida, para escenarios de alta demanda los costos operativos de LRT son menores que los de BRT, en este estudio se considerara la variación que tienen los dos sistemas con respecto a la demanda; es decir, la resiliencia que tienen con respecto a la variación en la

demandas. La variación se consideró haciendo la diferencia entre la demanda muy alta y la muy baja entre el total de la demanda muy alta. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 72 Variación en los costos operativos de BRT y LRT

Sistema de transporte	Variación en los costos operativos
Variación de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	104%
Variación del Tren Ligero de la Ciudad de México	105%

Los incrementos en la demanda no son muy diferentes entre sí, siendo de menor impacto en los costos operativos, variando tan solo en un 1%. Para calificar este parámetro se considerará la menor variación como base para el cien por ciento, el valor mayor obtendrá una calificación proporcional como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 73 Valores de Sensibilidad para BRT y LRT

Sistema de transporte	Valor de Sensibilidad
Variación de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	0.99
Variación del Tren Ligero de la Ciudad de México	1.00

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA COMPARATIVA ENTRE LOS DOS SISTEMAS DE TRANSPORTE DE CAPACIDAD MEDIA

En este capítulo se conjuntará, a manera de resumen, los resultados obtenidos en la comparativa, presentando los valores obtenidos por componente y por característica. Finalmente se presentará los valores finales obtenidos para cada Sistema de Transporte, después de hacer la sumatoria de los valores obtenidos en cada característica.

6.1 Características de los Sistemas de Transporte de Capacidad Media

Los valores obtenidos por atributo para cada sistema de transporte se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 74 Valores obtenidos por atributo de las características de los sistemas de transporte de capacidad media de BRT y LRT

Característica	Componente	Calificación por indicador de componente Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación por indicador de componente del Tren Ligero de la Ciudad de México	Calificación del componente Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación del componente del Tren Ligero la Ciudad de México
Características de los sistemas de transporte de capacidad media	Derecho de vía	0.3200	0.4000	0.8	1
	Capacidad de los vehículos	0.3720	0.2820	0.62	0.47

Los valores obtenidos del componente se presentan en la siguiente tabla, para cada sistema de transporte:

Tabla 75 Valores obtenidos por componente para los sistemas BRT y LRT

Característica	Indicador de característica	Componente	Indicador de componente	Calificación por indicador de la característica de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación por indicador de la característica del Tren Ligero de la Ciudad de México
Características de los sistemas de transporte de capacidad media	0.2	Derecho de vía	0.4	0.1384	0.1364
		Capacidad de los vehículos	0.6		

6.2 Desempeño del Sistema

Los valores obtenidos por atributo para cada sistema de transporte se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 76 Valores obtenidos por cada componente para el desempeño del sistema para BRT y LRT

Característica	Indicador de característica	Componente	Calificación por indicador de component e Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación por indicador de component e del Tren Ligero de la Ciudad de México	Calificación del component e Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación del component e del Tren Ligero la Ciudad de México
Desempeño del Sistema	0.2	Frecuencia del Servicio	0.1000	0.0130	1	0.13
		Velocidad de operación	0.0970	0.1000	0.97	1
		Confiabilidad	0	0	0	0
		Seguridad	0.0680	0.0970	0.68	0.97
		Capacidad de la línea	0.1000	0.0220	1	0.22
		Capacidad productiva	0.3	0.06696	1	0.22
		Productividad	0.0425	0.0500	0.85	1
		Utilización	0.0220	0.0500	0.44	1
		Flexibilidad	0.0425	0.0425	0.85	0.85
		Densidad	0.01261	0.0500	0.25	1
		Energía	0.0265	0.0500	0.53	1

Los valores obtenidos del componente se presentan en la siguiente tabla, para cada sistema de transporte:

Tabla 77 Valores obtenidos para la característica de desempeño de sistema para BRT y LRT

Característica	Indicador de característica	Componente	Indicador de componente	Calificación por indicador de la característica de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación por indicador de la característica del Tren Ligero de la Ciudad de México
Desempeño del Sistema	0.2	Frecuencia del Servicio	0.1		
		Velocidad de operación	0.1		
		Confiabilidad	0.05		
		Seguridad	0.1		
		Capacidad de la línea	0.1		
		Capacidad productiva	0.3	0.1622	0.1083
		Productividad	0.05		
		Utilización	0.05		
		Flexibilidad	0.05		
		Densidad	0.05		
		Energía	0.05		

6.3 Impactos

Los valores obtenidos por atributo para cada sistema de transporte se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 78 Valores obtenidos por cada atributo de los impactos para los sistemas BRT y LRT

Característica	Indicador de característica	Componente	Indicador de componente	Calificación por indicador de componente Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación por indicador de componente del Tren Ligero de la Ciudad de México	Calificación del componente Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación del componente del Tren Ligero la Ciudad de México
Impactos	0.2	Impactos sociales	0.25	0.0750	0.1750	0.3	0.7
		Impactos económicos	0.25	0.1500	0.2000	0.6	0.8
		Emisiones	0.5	0.15575	0.5000	0.3115	1

Los valores obtenidos del componente se presentan en la siguiente tabla, para cada sistema de transporte:

Tabla 79 Valores obtenidos en la característica de Impactos para BRT y LRT

Característica	Indicador de característica	Componente	Indicador de componente	Calificación por indicador de la característica de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación por indicador de la característica del Tren Ligero de la Ciudad de México
Impactos	0.2	Impactos sociales	0.25		
		Impactos económicos	0.25	0.0762	0.1750
		Emisiones	0.5		

6.4 Nivel de Servicio

Los valores obtenidos por atributo para cada sistema de transporte se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 80 Valores obtenidos por componente de Nivel de Servicio para BRT y LRT

Característica	Indicador de característica	Componente	Indicador de componente	Calificación por indicador de la característica de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación por indicador de la característica del Tren Ligero de la Ciudad de México	Calificación del componente Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación del componente del Tren Ligero la Ciudad de México
Nivel de Servicio	0.2	Calidad del Servicio	0.5	0.3158	0.1316	0.6316	0.2632
		Precio	0.5	0.2500	0.5000	0.5	1

Los valores obtenidos del componente se presentan en la siguiente tabla, para cada sistema de transporte:

Tabla 81 Valores obtenidos para las características del Nivel de Servicio para BRT y LRT

Característica	Indicador de característica	Componente	Indicador de componente	Calificación por indicador de la característica de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación por indicador de la característica del Tren Ligero de la Ciudad de México
Nivel de Servicio	0.2	Calidad del Servicio	0.5	0.1132	0.1263
		Precio	0.5		

6.5 Costos

Los valores obtenidos por atributo para cada sistema de transporte se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 82 Valores obtenidos por componente de costos para BRT y LRT

Característica	Indicador de característica	Componente	Indicador de componente	Calificación por indicador de la característica de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación por indicador de la característica del Tren Ligero de la Ciudad de México	Calificación del componente Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación del componente del Tren Ligero la Ciudad de México
Costos	0.2	Costos de Inversión	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		Costos de Operación	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		Costos de Emisiones	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		Costos Totales Anuales	0.5	0.4385	0.5	0.88	1
		Análisis de Sensibilidad	0.5	0.4950	0.5	0.99	1

Los valores obtenidos del componente se presentan en la siguiente tabla, para cada sistema de transporte:

Tabla 83 Valores obtenidos en la característica de Costos para BRT y LRT

Característica	Indicador de característica	Componente	Indicador de componente	Calificación por indicador de la característica de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación por indicador de la característica del Tren Ligero de la Ciudad de México
Costos	0.2	Costos de Inversión	N/A		
		Costos de Operación	N/A		
		Costos de Emisiones	N/A	0.1867	0.20
		Costos Totales Anuales	0.5		
		Análisis de Sensibilidad	0.5		

6.6 Calificación general

Este apartado integra la calificación total obtenida por característica para cada sistema de transporte, lo cual conforman su calificación global.

Tabla 84 Calificación global de la comparativa entre BRT y LRT

Característica	Indicador de característica	Calificación por indicador de la característica de la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México	Calificación por indicador de la característica del Tren Ligero de la Ciudad de México
Características de los sistemas de transporte de capacidad media	0.2	0.1384	0.1364
Desempeño del Sistema	0.2	0.0762	0.1083
Impactos	0.2	0.1622	0.1750
Nivel de Servicio	0.2	0.1132	0.1263
Costos	0.2	0.1867	0.2000
Total	1	0.6766	0.7460

7. CONCLUSIONES

Las variaciones en las características y en los valores operativos son los que presentan un desempeño entre ambos modos de transporte, lo que repercute en mayor (o menor) calificación a la hora de valuar cada una de sus características y atributos. En esta comparativa se decidió realizar una valoración de cada atributo y al final representar, de acuerdo con las características operativas actuales, una calificación del desempeño de ambos modos de transporte. Aunque en algunos proyectos pudiera existir alguna característica que tuviera una mayor relevancia sobre otra, es siempre recomendable considerar las características como un todo, y no dejarse llevar por una característica específica para poder elegir un sistema de transporte sobre otro.

Aunque pudiera existir el caso en donde un sistema de transporte sea totalmente superior en todas las características, la mayoría de los casos los sistemas de transporte presentaran ventajas, lo cual nos podrá dar una idea de cuales son los mejores escenarios sobre los cuales se desempeña cada medio de transporte.

En esta comparativa se presentan casos de estudio con mucho tiempo de existencia, por lo que sus escenarios de desempeño ya están determinados, aunque aun pudieran presentar cambios.

7.1 Ventajas y desventajas del sistema de Autobuses de Tránsito Rápido

La línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México tiene una clara ventaja en cuanto a la capacidad que puede ofrecer el sistema, esto debido al tamaño de la flota y al bajo intervalo de paso de las unidades, aunque aun así el sistema se encuentre saturado; esta flota podría significar la reducción de 20963 vehículos de las calles, con toda su flota, una reducción casi 3.6 veces mayor que la del Tren Ligero de la Ciudad de México.

La segregación en derecho de vía en el Metrobús no es lo suficientemente fuerte, ya que su carril es invadido con facilidad debido a la poca cultura vial.

Aunque los parámetros operativos son buenos, en cuanto a intervalo de paso y tamaño de la flota, la Línea 1 del Metrobús presenta una saturación la línea, traducida en una sobredemanda en la mayoría de las horas en la que presta servicio, disminuyendo de sobre manera el nivel de servicio, teniendo apenas un 24% de la flota total requerida para tener un buen desempeño. Este incremento significativo de unidades se traduciría en un costo excesivo, ya que sería necesario contar con una flota de 968 unidades. Los parámetros de velocidad de operación y tiempo de recorrido, que están íntimamente relacionados, están muy bajos. La velocidad es demasiado lenta, y el tiempo total de recorrido es demasiado alto, lo cual repercute en la saturación de la

línea, es necesario modificar los patrones de operación en el corredor para poder mejorar el manejo de la demanda, ya que, aun contando con una flota total estimada de 968 unidades, sería demasiado complicado ajustar el intervalo de paso en la línea.

Es necesario mejorar la confiabilidad de las unidades, y ayudar a una mejor planeación de los viajes de los usuarios, porque, aunque ya existen sistemas de transporte que permitan identificar el tiempo en que llegan la siguiente unidad a la estación, es imposible planificar tu viaje con antelación.

La seguridad tiene que mejorar en el sistema, aunque no está tan mal calificada entre los usuarios, la cantidad de accidentes que sufre la línea es demasiado alta.

La capacidad de la línea y la capacidad productiva son de valores altos, debido a la alta frecuencia de las unidades; aunque esto repercute en otros parámetros, como el consumo de combustible y energía.

El consumo de energía de la línea es demasiado alto, ya que en promedio se gasta el doble por combustible que, con otros sistemas de transporte y otras alternativas de energía, por lo cual debe ser mayor la inclusión de vehículos que sean híbridos.

La gran cantidad de vehículos, ocasionada por la alta frecuencia de paso, genera que la vía tenga una densidad muy alta, aunque en principio esto se debe a que se prioriza el mayor flujo de pasajeros en la línea, en casos como el de la Línea 1 del Metrobús puede resultar contraproducente, debido a que la separación entre vehículos llega a ser demasiado corta (en promedio 0.20 km entre vehículos) y en casos como el de la Avenida de los Insurgentes, donde en promedio se cuenta con una intersección cada 0.43 kilómetros, puede llegar a haber 2 o más vehículos en la vía entre intersecciones, generando retrasos entre los mismos vehículos, debido a que tienen que esperar al vehículo que va enfrente de ellos para cruzar la intersección o para ingresar a la estación, lo que repercute en una mala operación de la línea.

Una de las mayores ventajas de los sistemas de autobuses de tránsito rápido es la flexibilidad con la que opera, ya que al no requerir de una infraestructura especial de rodamiento se puede ajustar a cualquier patrón de demanda, inclusive ser muy ventajoso en caso de que existan problemas o accidentes en la línea, sin necesidad de alterar la operación entre unidades.

Los impactos sociales y económicos de la Línea 1 del Metrobús fueron altos, esto debido a la importancia histórica, cultural, social y económica del corredor en el cual se desarrolla, por lo que la implementación del sistema en esta avenida no sería fácil. Debido a un buen ejercicio de planeación y a la correcta intervención de la sociedad, la mayoría de los impactos pudieron ser mitigados.

Aunque el sistema cuenta con los vehículos más avanzados en cuanto a regulación de emisiones, la cantidad de contaminantes que emite sigue siendo demasiado alta, siendo tres veces mayor las emisiones, aun considerando la cantidad de contaminantes emitidos en la producción y

traslado de la fuente al sistema de energía eléctrica. Al momento, los vehículos eléctricos siguen siendo una opción más amigable con el medio ambiente.

El nivel ofrecido por el sistema es alto, ya que la percepción que tienen los usuarios del sistema no es mala. El precio es alto, comparado con otras opciones de transporte en la Ciudad de México, lo cual puede representar un valor decisivo en una ciudad donde en promedio los ciudadanos pueden gastar hasta el 19% de las ganancias totales.

El costo en el plazo inmediato es mucho menor que el del tren ligero, siendo una opción más económica de transporte para una ciudad; sin embargo, el sistema es muy sensible a dos parámetros: la operación y las emisiones. Si la cantidad de demanda es muy alta incrementan demasiado los costos operativos, debido a que, las operaciones son mucho más altas en los autobuses de transito rápido que en el tren ligero; además, con una mayor demanda la cantidad de unidades que transitan en la línea incrementan, por lo que los costos de mitigación de emisiones son cada vez mayores.

Los autobuses de transito rápido son una buena opción de transporte en ambientes en los cuales la demanda no tenga una gran variación en el tiempo, además de ser muy factibles en ambientes en los cuales el derecho de vía y su tránsito sea demasiado complicada, esto debido a la gran flexibilidad con la que cuenta el sistema. Se considera que el sistema funciona bien para una demanda baja o media-moderada, que no presenta gran variación a lo largo de los años.

7.2 Ventajas y desventajas del sistema de Tren Ligero

El Tren Ligero de la Ciudad de México presenta una segregación de vía tipo B con una separación física de gran nivel, ya que las bardas impiden que el transito mixto pueda ingresar a sus vías, mejorando las operaciones y reduciendo el riesgo de accidentes.

La capacidad de los vehículos es mayor, por vehículo, que la del sistema de autobuses de tránsito rápido, inclusive la mayor capacidad de un autobús sigue siendo menor a la de un tren, esto sin considerar que los trenes ligeros pueden incrementar su capacidad con diseños modulares, llegando a tener capacidades por trenes de hasta 500 pasajeros. Sin embargo, el factor que afecta la capacidad es lo reducido de la flota del tren ligero, llegando a contar con una flota de 12% de lo necesario para poder cumplir con la demanda establecida, considerando la capacidad de los trenes actuales. Al igual que la línea 1 del Metrobús, sus parámetros operativos son muy malos, considerando un tiempo de viaje demasiado alto, y una velocidad de operación demasiado baja, la velocidad de operación se ve afectada por unos trazos en las vías, los cuales reducen la velocidad de operación por cuestiones de seguridad, ya que opera a la mitad de su velocidad máxima.

La confiabilidad en el sistema es nula, ya que no cuenta con ninguna información acerca del aproximamiento de trenes a la estación, mucho menos con una planeación previa acerca de los viajes, estableciendo un horario fijo para las operaciones.

Debido a la mayor segregación en su vía, resulta ser un sistema mucho mas seguro que la Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México, contando con una cantidad menor en accidentes anuales (contando con 1.5 menos accidentes en el 2016) aunque la percepción de la población no es mejor que la del Metrobús, estando un lugar abajo en la encuesta realizada a los ciudadanos.

La capacidad de la línea y la capacidad productiva resulta mucho menor que la del Metrobús, esto debido a que depende de la frecuencia de paso de las unidades, en donde es mucho menor. En cuestión de densidad opera mejor que los BRT, debido a que la cantidad de vehículos en la vía es tal que no se llega a entorpecer entre vehículos; además de que la cantidad de vehículos por intersección llega a ser de tan solo 1.70, por lo que es mucho menos probable que dos vehículos se encuentren entre estaciones, y que se entorpezcan entre ellos en las operaciones.

La energía es una gran ventaja en el sistema, ya que cuesta tan solo la mitad su combustible por kilómetro, siendo más eficientes las operaciones y la asignación de recursos; además de que los contaminantes emitidos son tan solo la mitad que los de los autobuses de transito rápido, por lo que resulta una opción mucho más amigable con el medio ambiente.

Los impactos sociales y ambientales fueron mucho menores en el tren ligero, debido al tiempo que tiene de existencia la línea, la cual se fue desarrollando al mismo tiempo que la población a su alrededor; sin embargo, debido a que sus vehículos y vías llegan a ocupar una mayor cantidad de espacio, los impactos pueden ser mayores en otros proyectos.

La calidad del servicio, como lo percibe el usuario, es menor que la calidad que ofrece la línea 1 del Metrobús, esto se podría explicar debido a que el sistema es más nuevo, por lo que las instalaciones tienen una mayor calidad y repercute en una mejor experiencia de viaje para los usuarios. El precio es de la mitad que el del BRT, por lo que es una opción más eficiente para los usuarios de bajos recursos.

Los costos son mucho mayores a los de un sistema BRT, en el corto e inmediato plazo es una opción mucho mas cara; sin embargo, se considera que los proyectos de transporte tienen una vida útil de al menos 30 años, por lo que en toda su vida útil si es una opción mas económica, esto se debe a que es mucho menos sensible a los cambios en la demanda; además de que sus operaciones son mucho mas baratas, por lo que el sistema se va recuperando por si solo a lo largo del tiempo.

Los trenes ligeros son una buena opción de transporte con demanda media-moderada a alta, y en zonas donde se espera un mayor desarrollo, que repercutirá en un incremento en su demanda a lo largo del tiempo, con lo cual representara una opción más económicamente viable a lo largo del tiempo, considerando; además, que con las tecnologías existentes es un sistema de

transporte mas eficiente, la cantidad de dinero invertida en combustible es menor, emitiendo una menor cantidad de gases contaminantes.

La Línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México sufre ahora de una sobredemanda, debido a que no se analizó las características operativas a lo largo del tiempo, lo que repercute ahora en una opción que ya ha alcanzado su capacidad, con un gran costo debido a su operación. Todo esto debido a la falta de planeación, además de realizar estudios de comparación entre diferentes opciones de transporte y diferentes escenarios.

8. BIBLIOGRAFIA

ALSTOM. (2013). CITADIS SPIRIT. The Spirit that moves your city. Nueva York, New Jersey, USA.

Retrieved Diciembre 08, 2017, from

<http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure2014/Citadis%20Spirit%20-%20Brochure%20-%20EN.pdf?epslanguage=en-GB>

Archivo Cuartoscuro. (2016, Diciembre 27). Costo de gasolina se incrementará hasta un 20% en enero. *Excelsior*. Retrieved Diciembre 06, 2017, from

<http://www.excelsior.com.mx/nacional/2016/12/27/1136468>

Arndt, J. C., Morgan, C., Overman, J. H., Clower, T. L., Weinstein, B. L., & Seman, M. (2009).

Transportation, Social and Economic Impacts of Light and Commuter Rail. Austin : Texas Department of Transportation.

Bloch, R. (Julio de 2012). Características de los diversos modos de transporte de mercaderías. (R. Leslie Ramsay, Ed.) *Desafío de Exportar*(83), 18-20. Recuperado el 2 de Noviembre de 2017

Bruun, E. (2014). Bus Rapid Transit and Light Rail. Comparing Operating Costs with a Parametric Cost Model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1927, 11-21.

Cano, Z. (2002, Enero). ¿Cómo escribir una tesis? Pequeño manual de reglas básicas. (C. Carrillo, Ed.) *Ciencias*, 65, 68-75.

Casello, J. M., McD. Lewis, G., Yeung, K., & Santiago-Rodríguez, D. (2014). A Transit Technology Selection Model. (J. Volinski, Ed.) *Journal of Public Transportation*, 17(4), 50-75.

Ciudad de México. (21 de Enero de 2018). *Servicio de Transportes Eléctricos*. Obtenido de Tren Ligero: <http://www.ste.cdmx.gob.mx/tren-ligero>

de Rus, G., Campos, J., & Nombela, G. (2003). *Economía del transporte*. Barcelona, España: Antoni Bosch.

ERRAC & UITP. (2009). *Metro, light rail and tram systems in Europe*. Brussels, Bélgica: The European Rail Research and Council.

ERRAC. (2004). *Light Rail and Metro Systems in Europe. Current Market, perspectives and research compilation*. Brussels, Bélgica: The European Rail Research and Council.

Federal Transit Administration. (2017, Enero 6). *Federal Transit Administration*. Retrieved Octubre 31, 2017, from U.S. Department of Transportation:
<https://www.transit.dot.gov/research-innovation/bus-rapid-transit>

Gobierno del Distrito Federal. (2005). *Metrobús Insurgentes. Programa de Mitigación y Recuperación Urbana*. Ciudad de México: The World Bank.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la Investigación* (4ta ed.). Distrito Federal, México: McGraw-Hill Interamericana.

Hsu, L. R. (2005). *Capacity-Based Cost Modeling for Light Rail and Bus Rapid Transit*. Miami: Florida International University.

Hsu, L. R., & Wu, J.-W. (2008). Fleet-Size Model for Light Rail and Bus Rapid Transit Systems. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*(2063), 34-42.
doi:10.3141/2063-05

Institute for Transportation Development Policy. (2010). *Guía de Planificación de Sistemas BRT. Autobuses de Tránsito Rápido*. (L. Wright, & W. Hook, Eds.) New York, New Jersey, Estados Unidos: ITDP.

Institute of Urban Transport (India). (2013). *Modern Trams (Light Rail Transit)-For Cities in India*. New Delhi: FICCI.

Islas, V., & Lelis, M. (2007). *Análisis de los Sistemas de Transporte. Vol 1: Conceptos Básicos*. Sanfadilla, Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte.

Islas, V., Rivera, C., & Torres, G. (2002). *Estudio de la demanda del Transporte*. Sanfadilla: Instituto Mexicano del Transporte.

Kittelson & Associates, Inc.; Herbert S. Levinson Transportation Consultants; DMJM+Harris. (2007). *Bus Rapid Transit Practitioner's Guide*. Washington, D.C.: Transit Cooperative Research Program. doi:10.17226/23172

Lámbarry Vilchis, F., Rivas Tovar, L. A., & Peña Cruz, M. P. (2011). Planeación de los sistemas BRT y concensos alcanzados entre transportistas afectados y autoridades de gobierno durante su implementación: el caso del Metrobús en la ciudad de México y Mexibús del Estado de México. *Administración & Desarrollo*, 39(54), 133-150.

Laurent, D., & Mircea, S. (2015). *Light Rail in Figures. Statistics Brief*. Brussels: UITP.

León, M. (2000). *Diccionario del tren. Vocabulario de términos ferroviarios definidos en español con traducción al alemán, inglés, italiano y portugués*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.

Leonardo Academy, Inc. (2008). *Emission Factors and Energy Prices for the Cleaner and Greener Environmental Program*. Madison: Leonardo Academy.

Levinson, H., Zimmerman, S., Clinger, J., Rutherford, S., Smith, L., R., & Cracknell, J. S. (2003). *Bus Rapid Transit. Volume 1: Case Studies in Bus Rapid Transit*. Washington, D.C.: Transit Cooperative Research Program.

López, J. (2017, Febrero 25). Falta 35% de flota a la Línea 1 del Metrobús. *Excelsior*. Retrieved Diciembre 07, 2017, from
<http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2017/02/25/1148448>

López, J. (2017, Septiembre 18). Metro y Metrobús perfilan tarifa por distancia. *Excelsior*. Retrieved from <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2017/09/18/1189051>

Matthews, S., & Hendrickson, C. (2001). External Costs of Air Emissions from Transportation. *Journal of Infrastructure Systems*, 7(1).

Metrobús. (2018, Enero 21). *Tarifa y Pago*. Retrieved from Metrobús:
http://data.metrobus.cdmx.gob.mx/tarifa_pago.html

Moreno, T. (2017, Febrero 02). Línea 1 del Metrobús, la mas accidentada. *El Universal*. Retrieved Diciembre 01, 2017, from
<http://www.eluniversal.com.mx/articulo/metropoli/cdmx/2017/02/5/linea-1-del-metrobus-la-mas-accidentada>

- Morrison, A. (2003, Febrero 20). *The Tramways of Mexico*. Retrieved 09 29, 2017, from <http://www.tramz.com/mx/tto.html>
- National Institute of Open Schooling. (2012). *Business Studies (2015) National Institute of Open Schooling*. Recuperado el 2 de Noviembre de 2017, de National Institute of Open Schooling: <http://old.nios.ac.in/Secbuscour/cc10.pdf>
- Neff, J. (2015). *Public Transportation Fact Book*. Washington, Estados Unidos: American Public Transportation Association.
- Novales, M., Orro, A., Conles, E., & Anta, J. (2014). Medium-capacity trasit systems: some reflections about making the right choice. In W. Series on Transport Systems and Traffic Engineering, & A. Pratelli (Ed.), *Public Mobility Systems* (Vol. 78, pp. 85-96). Southampton, Massachusetts, Estados Unidos: WIT Press.
- ONU-Hábitat. (2015). *Reporte Nacional de Movilidad Urbana en México 2014-2015*. Ciudad de México: ONU-Hábitat.
- Patiño, D. (2016, Enero 27). Precios de Magna y Diésel, sin aumento en febrero: Hacienda. *El Financiero*. Retrieved Diciembre 06, 2017, from <http://www.elfinanciero.com.mx/economia/magna-y-diesel-mantienen-precios-de-enero-en-febrero-premium-baja.html>
- Pinheiro, C. (2005, Octubre). Curitiba una experiencia continua en soluciones de transporte. *The European Journal of Planning*.
- Pizarro, A. (2005). *BRT VS LRT. Comparación de tecnologías para ejes de transporte público masivo*. Quito: Banco Mundial.
- Puchalsky, M. C. (2005). Comparison of Emissions from Light Rail Transit and Bus Rapid Transit. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(1927), 31-37.
- Redacción de Animal Político. (15 de Septiembre de 2015). Mexicanos, los que más gastan en transporte, según estudio de la Unión Europea. *Animal Político*. Recuperado el 1 de Enero de 2018, de <http://www.animalpolitico.com/2015/09/mexicanos-los-que-mas-gastan-en-transporte-segun-estudio-de-la-union-europea/>
- Remes, R. (2010, Abril 20). Trenes urbanos y suburbanos para México. Una inversión necesaria y urgente. *La Infraestructura Pública en México (Regulación y Financiamiento)*(156), 312.

Retrieved 09 29, 2017, from

<https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/6/2816/14.pdf>

Rodriguez, D. A., & Vergel, E. (2013, Enero). Sistemas de transporte público masivo tipo BRT (Bus Rapid Transit) y desarrollo urbano en América Latina. *Land Lines*, 16-24.

Secretaría de Transportes y Vialidad. (1996). *Plan Maestro del Metro y Trenes Ligeros. Área Metropolitana de la Ciudad de México*. Distrito Federal: Departamento del Distrito Federal.

SEMARNAT. (2010). *Compendio de Estadísticas Ambientales 2010*. Obtenido de
http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServlete5c8.html

Suárez, M., & Delgado, G. J. (2015). *Entre mi casa y mi destino. Movilidad y transporte en México. Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte* (Primera ed.). Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Taplin, M. (12 de Septiembre de 2017). *Light Rail Transit Association*. Obtenido de
<http://www.lrlta.org/index.html>

Taylor, M. A., Bonsall, P. W., & Young, W. (2000). *Understanding traffic systems: data, analysis and presentation*. Farnham, Surrey, Inglaterra: Ashgate Publishing Limited.

The World Bank. (2009). *Implementation Completion and Results Reports (TF-51612) on a Grant from the Global Environmental Facility in the amount of \$5.8 million equivalent to the Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C. and the United Mexican States*. Ciudad de México: The World Bank.

Universidad Nacional Autónoma de México. (21 de Enero de 2018). *Biblioteca. Los mexicanos vistos por los sí mismos. Los grandes temas nacionales. Entre mi casa y mi destino. Movilidad y Transporte en México*. Obtenido de Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte:
http://www.losmexicanos.unam.mx/movilidadytransporte/encuesta_nacional/cuestionario/Encuesta_Nacional_de_Movilidad_y_Transporte.pdf

Vibhuti, A. (2008). Concept of "Mass" in Mass Public Transit Systems. *Transportation Planning and Implementation Methodologies for Developing Countries*, págs. 1-10.

Vuchic, V. R. (2005). Light Rail and BRT: Competitive or Complementary? *Public Transport International*, 10-13.

Vuchic, V. R. (2007). *Urban Transit Systems and Technology*. Hoboken, New Jersey, Estados Unidos : John Wiley & Sons, Inc.

Zamudio, D., & Alvarado, V. (2015). *Ranking Nacional de los Sistemas BRT. Evaluación técnica desde el punto de vista de los usuarios*. Ciudad de México: El Poder del Consumidor.