



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propuesta para reducir los tiempos
de viaje del modo de transporte
público Metrobús mediante el uso del
sistema de priorización de semáforos**

T E S I S

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Emilio Rello Rincón

DIRECTOR DE TESIS

M. en I. Francisco Javier Granados Villafuerte



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

Quiero dedicar este trabajo a mi familia, porque este logro también es de ellos.

A mi mamá y a mi papá, quienes siempre me enseñaron a ver el lado positivo de la vida, por dejarme volar solo pero por siempre estar junto a mí. Me han apoyado, me han aconsejado y me han escuchado. ¡Gracias!

A mi hermano Andrés, por todo lo vivido juntos, por su cariño y por siempre tener una respuesta acertada cuando lo necesitaba.

A mi abuelo Fer, quien me enseñó el significado de la responsabilidad.

A mi abuela Nonita, por abrirme las puertas de su casa lo que me permitió entender un poquito mejor su manera tan maravillosa y simple de vivir la vida.

A la familia extendida tanto mexicana como colombiana por siempre estar presentes.

A Itzel, Marifer y Vico por su amor y por acompañarme en muchos de mis logros en los últimos años.

A Carlos, Jessica, Charbel, Jaziel, Enrique, Raúl, Karla y Jorge por la gran amistad y apoyo que encontré en ellos a lo largo de la universidad. ¡Que bonitos recuerdos y vivencias juntos!

Reconocimientos

Siempre estaré agradecido con la Universidad Nacional Autónoma de México y con su Facultad de Ingeniería por la educación de tan alto nivel que me dio durante cinco años. No solamente en el área de ingeniería sino también en la cultural, los idiomas, el arte y los deportes.

Agradezco al M. en I. Francisco Granados por permitirme adentrarme y profundizar mis conocimientos en un área de la Ingeniería Civil que casi no había explorado. Por sus consejos y recomendaciones a lo largo del trabajo y sobre todo por su gran interés en el tema.

Al Dr. Luis Antonio García Villanueva por escuchar acerca de mis metas y temores; y a través de su experiencia aconsejarme. Fue en una de esas visitas a su cubículo que me contactó con el Ing. Abel Lozada, quién con gran amabilidad me recibió y me ayudó a conseguir la licencia del software VISSIM, sin la cual, este trabajo no hubiera sido posible. Muchas gracias a los dos.

Agradezco también a la empresa alemana PTV Group por otorgarme la licencia de investigación de su programa VISSIM 11 con el único fin de desarrollar la simulación del presente trabajo.

A todos mis maestros y maestras que me formaron a lo largo de la carrera.

Y principalmente a mi familia, por su admirable trabajo y dedicación. Que orgulloso me siento de ustedes.

Índice de contenidos

Introducción	10
Problemática.....	11
Justificación de la investigación.....	12
Objetivos	13
Hipótesis.....	13
Contenido de la tesis	14
CAPITULO I: Conceptos básicos de Ingeniería de Transporte.....	15
1.1 Ingeniería de Transporte.....	15
1.1.1 Ingeniería de Tránsito	15
1.2 Conceptos del transporte	15
1.2.1 ¿Qué es transporte?.....	15
1.2.2 ¿Qué es sistema?	16
1.2.3 ¿Qué es sistema de transporte?	16
1.2.3.1 Atributos de los sistemas de transporte	17
1.2.4 ¿Qué es flujo vehicular?.....	18
1.2.5 ¿Qué es demanda vehicular y oferta vial?.....	19
1.2.6 ¿Qué es Nivel de Servicio?	19
CAPITULO II: Intersecciones y semáforos	21
2.1 Concepto de intersección	21
2.1.1 Puntos de conflicto	21
2.2 Clasificación de intersecciones	22
2.2.1 Intersección a nivel	22
2.2.2 Intersección a desnivel.....	23
2.3 Dispositivos para el control del tránsito	23
2.4 Concepto de semáforo.....	24
2.4.1 Clasificación de los semáforos	24

2.4.2	Atributos de los semáforos	25
2.4.3	Tipos de operación de control semafórico	27
2.4.3.1	De tiempo fijo	27
2.4.3.2	Actuado	27
2.4.3.3	Responsivo	27
2.4.3.4	Adaptativo.....	27
2.5	Intersección semaforizada	27
CAPITULO III: Situación actual del transporte urbano en la Ciudad de México		29
3.1	Historia del transporte en México	30
3.2	Diagnóstico de la red de transporte	32
3.3	Transporte urbano	34
3.3.1	Transporte público	34
3.4	Transporte público de pasajeros en la Ciudad de México	36
3.4.1	Modos de transporte operados por el gobierno.	38
3.4.1.1	STC-Metro	38
3.4.1.2	Tren ligero	39
3.4.1.3	Trolebús	39
3.4.1.4	Red de Transporte de Pasajeros – RTP	40
3.4.1.5	Metrobús.....	41
3.4.2	Modos de transporte concesionados	42
3.4.2.1	Camiones y microbuses	42
3.4.2.2	Taxis	43
3.5	Tiempos de viaje	44
CAPITULO IV: Sistemas de transporte tipo BRT		47
4.1	Definición del sistema	47
4.1.1	Razones para su implementación	48
4.2	Estaciones y vehículos BRT	50
4.3	Barreras del sistema.....	51
4.4	Sistemas BRT en México	52
4.4.1	Sistemas BRT existentes en el país.....	52

4.4.2	Evaluación de los sistemas BRT.....	52
4.5	Los estándares BRT	55
4.5.1	Características de clasificación de BRT Standard.....	56
4.5.2	Sistema de prioridad semafórica dentro de los estándares BRT	57
CAPITULO V: Sistemas Inteligentes de Transporte		58
5.1	¿Qué es ITS?.....	58
5.1.1	¿Cuáles son sus objetivos?.....	58
5.1.2	Aplicaciones de los ITS.	58
5.1.2.1	Seguridad en el transporte	58
5.1.2.2	Contaminación del sector transporte	60
5.1.2.3	Infraestructura y espacios limitados.....	62
5.1.2.4	Tiempos de viaje	63
5.1.3	Taxonomía de los Sistemas Inteligentes de Transporte	65
5.1.3.1	Sistema de prioridad semafórica para el transporte público dentro de los ITS	65
CAPITULO VI: Sistema TSP		66
6.1	Definición del sistema.....	66
6.1.1	¿Prioridad o derecho preferente?	67
6.1.2	Sistema de detección de vehículos.....	68
6.1.3	Su funcionamiento	70
6.2	Objetivos.....	71
6.3	Estrategias de control de prioridad	72
6.3.1	Prioridad pasiva (Passive Priority).....	72
6.3.2	Prioridad activa (Active Priority)	72
6.3.2.1	<i>Early Green</i> (Luz verde adelantada).....	72
6.3.2.2	<i>Green Extension</i> (Extensión de verde)	72
6.3.2.3	<i>Actuated Transit Phase</i> (Fase activada)	72
6.3.2.4	<i>Phase Insertion</i> (Inserción de fase)	73
6.3.2.5	<i>Phase Rotation</i> (Rotación de fase).....	73
6.3.3	Adaptive/real-time Control (Adaptativa o control en tiempo real).....	73
6.4	Recuperación del ciclo del semáforo	73

6.5	Implementación del sistema TSP como proyecto de ingeniería.....	74
6.5.1	Planeación.....	74
6.5.2	Diseño	75
6.5.3	Implementación	75
6.5.4	Operación y mantenimiento	76
6.5.5	Evaluación	76
6.6	Evaluación de las estrategias de control de prioridad.....	76
6.6.1	Evaluación del desempeño del tránsito.....	76
6.6.2	Evaluación económica.....	77
6.6.3	Calidad en el servicio.....	77
6.7	Consideraciones para implementar un sistema TSP.....	77
6.7.1	Coordinación semafórica	77
6.7.2	Volúmenes vehiculares	78
6.7.3	Volúmenes y rutas de autobuses.....	78
6.7.4	Ubicación de las estaciones	78
6.7.5	Consideraciones de los peatones.....	79
6.8	Simulación de un sistema TSP.....	79
6.9	Casos de estudio exitosos	81
6.9.1	Caso International Drive in Orlando, Florida.	81
6.9.2	Caso West Valley City, Utah	84
6.9.3	Caso Jinan, China.....	88
CAPITULO VII: Concepto de Operaciones de un sistema TSP		92
7.1	Definición de Concepto de Operaciones	93
7.2	Documento de ConOps.....	93
7.3	Desarrollo del documento de ConOps.....	95
CAPITULO VIII: Evaluación del TSP en los tramos Dr. Gálvez – Insurgentes e Insurgentes – Dr. Gálvez		96
8.1	Concepto de operaciones: Dr. Gálvez – Insurgentes e Insurgentes – Dr. Gálvez	96
8.1.1	Introducción.....	96
8.1.1.1	Alcance del ConOps.....	96

8.1.1.2	Documentos de referencia.....	96
8.1.1.3	Justificación de la elección del tramo	97
8.1.2	Descripción del sistema actual.....	98
8.1.2.1	Condiciones de operación.....	98
8.1.2.2	Descripción operativa del sistema de semáforos actual	108
8.1.2.3	Equipo de operación	109
8.1.2.3.1	Equipo a bordo del vehículo	109
8.1.2.3.2	Equipo en las estaciones.....	109
8.1.2.3.3	Equipo en el CITI	109
8.1.3	Necesidades operativas	109
8.1.4	Sistema de prioridad semafórico en intersecciones (TSP).....	109
8.1.4.1	Objetivos	110
8.1.4.2	Estrategias de prioridad	110
8.1.4.3	Arquitectura TSP	110
8.1.5	Escenarios de operación	111
8.2	Estudio de simulación	111
8.2.1	Formulación del problema.....	111
8.2.2	Fijación de objetivos y plan general del proyecto	111
8.2.3	Recopilación de datos	112
8.2.4	Modelo de traducción.....	112
8.2.5	Verificación y validación y calibración	114
8.2.6	Experimentación	121
8.2.7	Interpretación	125
8.2.8	Documentación.....	136
CAPITULO IX: Conclusiones y comentarios		137
Referencias.....		139
Anexos		142

Introducción

En la historia de la humanidad, la acción de mover personas y bienes de un lugar a otro con un fin en específico ha sido de vital importancia para la supervivencia y el desarrollo de la especie. Cuando las comunidades nómadas, obligadas a moverse, pasaron a ser comunidades sedentarias, establecidas en un lugar, surgieron nuevas necesidades, dentro de las cuales el transporte marcó la pauta para la comunicación y el comercio.

La necesidad de transportarse siempre ha existido y seguirá existiendo, pero va cambiando con el tiempo y el desarrollo tecnológico. Actualmente, toda ciudad debe buscar contar con un transporte seguro, eficiente, integrado y ambientalmente sostenible de bienes y personas. Es claro que el desarrollo del transporte en cada país no ha sido el mismo. Países con gran capacidad económica, organización y cultura ciudadana cuentan con tecnologías que los países subdesarrollados no. Es por ello que en gran parte de estos países, como lo es México, las medidas austeras y el ingenio deben permitir alcanzar la efectividad requerida.

Hoy en día, las necesidades de movilidad de una ciudad, la alta demanda de diferentes productos y servicios y el gran crecimiento poblacional, han obligado a que el desarrollo del transporte, además de satisfacer todas estas necesidades, sea eficiente; es decir, que tenga una mayor capacidad, a un menor costo y que reduzca sus tiempos de trayecto. Gran parte de esto se ha logrado gracias al desarrollo tecnológico.

Dentro de los transportes terrestres, los sistemas inteligentes de transportes, o conocidos internacionalmente con el acrónimo ITS, juegan un papel crucial. Hoy en día, los usuarios tienen acceso inmediato a información en tiempo real mediante el uso del Internet, Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), celulares y una gestión masiva de datos. Pero aún más importante, existe una comunicación e intercambio de información entre las diferentes partes del sistema: pasajeros, conductores, operadores e ingenieros de tránsito. Finalmente las herramientas computacionales y los softwares nos permiten conocer con gran exactitud las características del sistema.

En los sistemas de transporte público, a comparación del privado, los usuarios comparten el modo de transporte y se adaptan a los horarios y rutas ofrecidas. Principalmente son los países europeos que cuentan con una gran planeación y organización comparada con países latinoamericanos, en donde el transporte público se caracteriza constantemente por sus condiciones caóticas e inseguras, por mayores niveles de congestión y contaminación. Esto, en gran medida, se debe a la falta de implementación y desarrollo del ITS.

Finalmente, dentro de los ITS se tiene el sistema de priorización semafórica (TSP – Transit Signal Priority), el cual tiene como objetivo general ayudar a que el servicio de transporte público sea más confiable, más rápido, más rentable y sea más competitivo que el automóvil.

Problemática

Dentro de la introducción de esta investigación se habla sobre un transporte eficiente; es decir, aquel con mayor capacidad, a un menor costo y con menores tiempos de trayecto. Dentro del *Plan Estratégico de Movilidad 2019* de la Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México se define al sistema de transporte de la ciudad como “un sistema de movilidad que se encuentra en un estado de profunda crisis estructural que se puede resumir en tres aspectos fundamentales: fragmentación institucional y de los distintos sistemas de movilidad; severas ineficiencias y abandono de la infraestructura y servicios de transporte público, no motorizado y carga, e inequidad en los tiempos de traslado y condiciones de viaje.” Se puede concluir entonces que el sistema de transporte con el que cuenta la ciudad no es eficiente y se debe mejorar.

El problema del tiempo de viaje, es un tema que en los últimos años, con el crecimiento desmedido de las grandes ciudades y el gran aumento de la flota vehicular, ha acaparado la atención debido al impacto negativo que diariamente tiene en los usuarios del sistema. Los tiempos excesivos de viaje provocan, entre otras cosas, estrés y cansancio para el usuario, una pérdida económica de horas-hombre importante para la sociedad y finalmente un sistema de transporte ineficiente y caótico. Como bien se sabe, la Ciudad de México cuenta aproximadamente con 8.9 millones de habitantes (INEGI, EOD 2017) mientras que la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se aproxima a los 22 millones de habitantes. Dentro de dichas poblaciones, los vehículos motorizados registrados en circulación en el 2017 por parte del INEGI fueron de 5,471,904 automóviles privados y de 12,743,834 automóviles privados respectivamente. En las últimas dos décadas, la facilidad de adquirir un automóvil y la prioridad que se le dio a destinar recursos a la construcción de vialidades para transporte privado y no para transporte público y peatón, automáticamente empeoraron la movilidad de la ciudad y por ende, aumentaron en gran proporción los tiempos de traslado dentro de la misma.

Finalmente, la poca eficiencia del automóvil en cuanto a la relación espacio ocupado y contaminación generada por persona atendida, obliga a los tomadores de decisiones a controlar y limitar su proliferación con medidas enfocadas a priorizar al usuario que ocupa el transporte público, bicicleta o que camina y mejorar su operación y mantenimiento.

Justificación de la investigación

Teniendo en cuenta la problemática anteriormente descrita y el cambio que se empieza a gestar para disminuir el uso de transporte privado y mejorar la infraestructura de la red de transporte público, para que este pueda competir en tiempos y en confort con el automóvil, empiezan a aparecer soluciones para disminuir los tiempos de viaje del transporte público. La meta es que los usuarios con automóvil propio empiecen a mudar de modo de transporte, por cuenta propia, al transporte público, lo que mejorará las condiciones caóticas de movilidad de la ciudad.

Si se logran reducir los tiempos de viaje de ciertas unidades de un modo de transporte público en un porcentaje considerable dentro de la Ciudad de México, se mitigarán los aspectos negativos anteriormente mencionados donde se agregan algunos otros descritos a continuación. El estrés y el cansancio del usuario disminuyen considerablemente pues se destina una menor cantidad de tiempo en trasladarse, y ese “tiempo ganado” se puede invertir en diversas actividades de su interés; la pérdida económica medida en horas-hombre disminuye; se contribuye con el cuidado al medio ambiente disminuyendo el número de unidades de la flota de transporte y reduciendo la cantidad de combustible quemado, lo cual reduce la cantidad de gases contaminantes emitidos al ambiente y, finalmente, se empieza a construir un sistema de transporte eficiente y funcional.

Objetivos

Objetivo general

Plantear una solución a los elevados tiempos de traslado del sistema de transporte público de la CDMX mediante el uso del sistema de priorización semafórica (TSP) en corredores del tipo BRT.

Objetivo particular

Realizar una microsimulación para calcular el ahorro del tiempo de viaje a partir de la implementación del sistema TSP en el tramo Dr. Gálvez – Insurgentes de la línea 1 del Metrobús con el uso del software VISSIM 11.

Hipótesis

Los beneficios para los usuarios del transporte público Metrobús serán importantes; los tiempos de viaje de los autobuses de la línea 1 del Metrobús en el tramo Dr. Gálvez – Insurgentes se verán reducidos. Además, se disminuirá el número de paradas en intersecciones semaforizadas por la luz roja en los mismos trayectos.

Contenido de la tesis

Durante nueve capítulos se definen conceptos necesarios para tener un mayor entendimiento de la rama de Ingeniería de Transporte denominada Ingeniería de Tránsito. Se explica el funcionamiento del sistema TSP y algunos casos de estudios, para poder entender y analizar los resultados de la simulación del sistema Metrobús.

En el primer capítulo, para llevar la lectura con un mayor entendimiento del tema, se presentan los conceptos básicos de la ingeniería de transporte.

En el segundo capítulo se abarca el tema de las intersecciones y los semáforos para entender el funcionamiento de una intersección semaforizada en cuanto a sus ciclos y sus fases.

En el tercer capítulo se exponen los sistemas inteligentes de transporte, sus objetivos y sus aplicaciones en el sector transportes.

En el cuarto capítulo se presenta de forma general la situación actual de la infraestructura de transporte público en la Ciudad de México.

El quinto capítulo se enfoca específicamente a un modo de transporte público de pasajeros: Bus Rapid Transit (BRT) o Autobús de Rápido Tránsito. Se exponen los beneficios y las barreras de la red de BRT existente en la actualidad en el país.

En el sexto capítulo se explica el tema principal del trabajo: El sistema de priorización de semáforos en intersecciones o TSP. Se habla de sus objetivos, beneficios, operación y se exponen 3 casos exitosos de estudio en Estados Unidos y China.

En el séptimo capítulo se expone la teoría de un Concepto de Operaciones aplicable a un proyecto de Ingeniería de Transporte.

En el octavo capítulo se presenta la evaluación del TSP en los tramos de estudio. La primer parte consiste en el desarrollo del Concepto de Operaciones de la línea 1 del Metrobús de la CDMX, donde se hace referencia a su funcionamiento, su operación actual y los objetivos del proyecto. La segunda parte expone el desarrollo de la simulación realizada con el programa VISSIM 11 y un análisis de sus resultados.

Por último, en el noveno capítulo, se exponen las conclusiones respecto al trabajo de investigación y se exponen un par de comentarios relacionados al tema.

CAPÍTULO I

Conceptos básicos de Ingeniería de Transporte

El primer capítulo expone un marco de referencia de la Ingeniería de Transporte con algunos de sus conceptos más relevantes con el fin de facilitar el entendimiento de los siguientes capítulos.

1.1 Ingeniería de Transporte

La Ingeniería de Transporte se ocupa de la aplicación de los principios tecnológicos y científicos a la planificación, el diseño, la operación y la administración de las diversas partes de cualquier modo de transporte, con el fin de proporcionar a las personas y mercancías una movilidad segura, rápida, confortable, conveniente, económica y compatible con el medio ambiente (ITE, 2009).

1.1.1 Ingeniería de Tránsito

La Ingeniería de Tránsito es una rama de la Ingeniería de Transporte donde se estudia la planeación, el proyecto geométrico y la operación del tránsito por calles y carreteras, sus redes, terminales, tierras adyacentes y su relación con otros modos de transporte (ITE, 2009).

También se le atribuye, el estudio de los elementos del transporte público: conductor, peatón, vehículo, vía, señalización y dispositivos de control del tráfico, y la caracterización y estudio del comportamiento de las llamadas variables macroscópicas del tránsito: volumen vehicular, velocidad y densidad, así como la relación existente entre elementos y variables.

1.2 Conceptos del transporte

1.2.1 ¿Qué es transporte?

Transporte es el conjunto de procesos que tienen como finalidad la satisfacción de las necesidades de desplazamiento y comunicación, tanto de personas como de mercancías (Zárate, 2003).

Después de haber definido el concepto de transporte, se debe aclarar la diferencia entre dos palabras que se confunden con mucha facilidad y están directamente asociadas al transporte; su confusión lleva al error de creer que simplemente con el hecho de aumentar la infraestructura es posible resolver un problema de transporte, o también, que una cantidad muy grande de vehículos representa un gran tráfico. Estas palabras son tráfico y tránsito y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) en su libro *Análisis de los Sistemas de Transporte Voll: Conceptos básicos*, las definen así:

Tráfico: Aquella acción (que puede involucrar movimiento o no), de comerciar con bienes, y por lo tanto no es aplicable en la actualidad a las personas.

Tránsito: Es el fenómeno físico de pasar por un punto o lugar específico (calle, estación, puerto, pasillo, etc.).

1.2.2 ¿Qué es sistema?

Se denomina sistema al conjunto de elementos dinámicamente relacionados entre sí que realizan una actividad para alcanzar un objetivo en común y que interactúan con el entorno que los rodea. Un sistema opera a partir de entradas (datos, energía o materia) y entrega salidas (información, energía o materia).

1.2.3 ¿Qué es sistema de transporte?

El IMT define a un sistema de transporte como el conjunto de instituciones, personas, recursos y servicios que participan de manera directa en la prestación de un servicio que consiste en trasladar personas y bienes con el fin de satisfacer necesidades humanas de movilidad.

La prestación del servicio de transporte se puede dividir según su ámbito geográfico como:

- Transporte urbano: el que ocurre dentro de las ciudades.
- Transporte suburbano: el que se realiza entre las ciudades y sus suburbios, esto es, las zonas que, por razones político-administrativas o geográficas, no pertenecen directamente a la ciudad, pero están íntimamente ligadas a su vida económica y social.
- Transporte interurbano: el que tiene como origen y destino de los viajes a las ciudades.
- Transporte rural: el que se realiza entre zonas no urbanas, aunque el destino final sea alguna ciudad.
- Transporte internacional: el que posibilita la comunicación entre los países.

Ahora bien, la diferencia entre los tipos de transporte mencionados se basa en la tecnología empleada, el tipo de contenido (personas o mercancía) y la forma de transporte (medio y modo). Hablando únicamente de la forma o tipo de transporte, se hace necesario introducir las definiciones de medio y modo.

El medio de transporte se refiere específicamente a la parte física en la que las entidades de flujo se van a desplazar. Se cuenta con tres medios principales: terrestre, acuático y aéreo aunque una clasificación más amplia abarca lo siguiente: terrestre carretero, terrestre ferroviario, marítimo, fluvial, aéreo y multimodal. Por otra parte, el modo de transporte es aquel elemento dentro de algún medio que facilita el traslado de las entidades de flujo; por ejemplo dentro del medio terrestre se cuenta con automóviles o bicicletas, dentro del medio acuático, barcos y finalmente aviones para el medio aéreo.

1.2.3.1 Atributos de los sistemas de transporte

Los atributos de un sistema de transporte pueden ser muy vastos dependiendo del autor, el momento histórico y la región de estudio, pero tener una lista de los más importantes es de gran ayuda para conocer las diferentes características del sistema de transporte y su interrelación y así, enfocando esfuerzos en ciertos atributos, poder garantizar un servicio de calidad. Es de recalcar que no siempre se pueden mejorar todos los atributos a la vez. La siguiente lista muestra los atributos más importantes según el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) en su libro *Análisis de los Sistemas de Transporte Voll: Conceptos Análisis de los Sistemas de Transporte básicos*.

- Velocidad: Relación de la distancia que hay que recorrer para ir de un punto a otro, y el tiempo empleado para ello.
- Capacidad: Cantidad de usuarios beneficiados por el sistema.
- Seguridad: Toma en cuenta la probabilidad de ocurrencia de daños o pérdidas en bienes o accidentes en personas tanto dentro como fuera del sistema por la operación del mismo.
- Responsabilidad: Una vez ocurrido los daños o pérdidas, existe una variación en la forma en que el sistema responde por tales acontecimientos.
- Frecuencia de servicio: Cantidad de vehículos que circulan por un punto o tramo específico en un intervalo de tiempo específico.
- Regularidad: Se le relaciona con el grado en que son respetados los intervalos de paso, así como los horarios de arribo a las estaciones.
- Facilidad de acceso: Conjunto de actividades o trámites, físicos como administrativos, previos a la realización del viaje. No se debe confundir con accesibilidad.
- Simplicidad: Indica en qué medida es posible la prestación del servicio con una cantidad mínima de transbordos o paradas.
- Cobertura: Zonas de impacto que se benefician por el sistema de transporte.
- Flexibilidad: Medida en la que el sistema de transporte es capaz de adaptarse a cambios sujetos a su funcionamiento.
- Eficiencia: Relación entre los costos totales (directos más indirectos) del transporte y su productividad.

1.2.4 ¿Qué es flujo vehicular?

Al analizar los elementos del flujo vehicular se busca entender las características y el comportamiento del tránsito. Dicho análisis describe la forma en que circulan los vehículos en cierta vialidad, lo que permite determinar parte de la eficiencia de operación de un sistema de transporte. Para estudiar el flujo vehicular, se tiene que estudiar sus tres componentes principales: velocidad, volumen y densidad.

Velocidad

Como ya se definió dentro de los atributos de un sistema de transporte, la velocidad es la relación que existe entre la distancia que hay que recorrer para ir de un punto a otro, y el tiempo empleado para ello. Sin embargo, existen otros tipos básicos de medida de la velocidad de viaje:

- Velocidad de punto o instantánea: Es la velocidad de un vehículo a su paso por un determinado punto de una carretera o una calle.
- Velocidad media temporal: Es la media aritmética de las velocidades de punto de todos los vehículos, o parte de ellos, que pasan por un punto específico de una carretera o calle durante un intervalo de tiempo seleccionado
- Velocidad de recorrido: Aquella velocidad que corresponde al tiempo total del viaje tomando en cuenta los tiempos de espera en las estaciones y los tiempos de demoras.
- Velocidad en marcha: Aquella velocidad que corresponde únicamente al tiempo en el que el vehículo se encontraba en movimiento.

Volumen

Se define volumen de tránsito, como el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal dados, de un carril o de una calzada, durante un periodo determinado.

Se debe diferenciar entre el concepto de volumen y el de tasa de flujo. El volumen es el número actual de vehículos observados o asignados que pasan por un punto durante un intervalo de tiempo. El valor del flujo representa el número de vehículos que pasan por un punto durante un intervalo de tiempo menor que una hora, pero expresada como un valor horario equivalente.

Densidad

La densidad está definida como el número de vehículos que ocupan una longitud específica de una vialidad en un momento dado. Generalmente se expresa en vehículos por kilómetro (veh/km), ya sea referido a un carril o a todos los carriles de una calzada.

Finalmente, existen dos tipos de flujos. El flujo continuo o también conocido como ininterrumpido se presenta en infraestructuras que no tienen elementos fijos, como semáforos,

que sean externos al flujo y que puedan interrumpirlo. Por otro lado, la infraestructura en el flujo interrumpido tiene elementos fijos que provocan interrupciones periódicas independientemente de la magnitud del tránsito. Estos elementos incluyen intersecciones de prioridad con señales de alto, intersecciones semaforizadas, ceda el paso y paraderos de autobuses.

1.2.5 ¿Qué es demanda vehicular y oferta vial?

Se definen los conceptos de demanda vehicular y oferta vial de la 8ª edición del libro *Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones*.

La demanda vehicular es la cantidad de vehículos que requieren desplazarse por un determinado sistema vial. Se entiende que dentro de la demanda vehicular se encuentran aquellos vehículos que están circulando, los que se encuentran en cola y los que deciden tomar rutas alternas (para evitar la congestión, si existe). Una medida que permite determinar la eficiencia con la que un sistema vial presta servicio a esta demanda vehicular es su oferta.

La oferta vial o capacidad, que representa el espacio físico (calles y carreteras), se puede indicar en términos de la sección transversal de la infraestructura; por tanto, segmentos o puntos con diferentes características tendrán diferentes capacidades. De esta manera, el Manual de Capacidad de Carreteras define la Capacidad de una infraestructura vial como el número máximo de vehículos que razonablemente pueden pasar por un punto o sección uniforme de un carril o calzada durante un intervalo de tiempo dado, bajo las condiciones prevalecientes de la infraestructura vial, del tránsito y de los dispositivos de control (HCM, 2000). El intervalo de tiempo utilizado en la mayoría de los análisis de Capacidad es de 15 minutos, debido a que se considera que éste es el intervalo más corto durante el cual puede presentarse un flujo estable.

Al interactuar la oferta con la demanda se tendrán condiciones que definen la calidad del flujo; esto es, el nivel de servicio. Las evaluaciones de la capacidad y el nivel de servicio (NS) son necesarios para la toma de decisiones y acciones en la ingeniería de tránsito y planteamiento de transporte.

1.2.6 ¿Qué es Nivel de Servicio?

El Nivel de Servicio es una medida cualitativa que describe las condiciones de operación de un flujo de vehículos y/o personas, y de su percepción por los conductores o pasajeros. Estas condiciones se describen en términos de factores tales como la velocidad y el tiempo de recorrido, la libertad de realizar maniobras, la comodidad, la conveniencia y la seguridad vial.

De los factores que afectan el Nivel de Servicio, se distinguen los internos y los externos. Los internos son aquellos que correspondan a variaciones en la velocidad, en el volumen, en la composición del tránsito, en el porcentaje de movimientos de entrecruzamientos o direccionales, etc. Entre los externos están las características físicas, tales como la anchura de los carriles, la distancia libre lateral, la anchura de acotamientos, las pendientes, etc.

El Manual de Capacidad Vial HCM 2000 del TRB ha establecido seis Niveles de Servicio para cada tipo de infraestructura, para los cuales se disponen de procedimientos de análisis. Se les otorga una letra desde la A hasta la F siendo el nivel de servicio (NS) A el que representa las mejores condiciones operativas, y el NS F, las peores.

NS A: Representa una circulación a flujo libre. Los usuarios, considerados en forma individual, están virtualmente exentos de los efectos de la presencia de otros en la circulación. Poseen una altísima libertad para seleccionar sus velocidades deseadas y maniobrar dentro del tránsito. El nivel general de comodidad y conveniencia proporcionado por la circulación al motorista, pasajero o peatón, es excelente.

NS B: Está dentro del rango del flujo estable, aunque se empiezan a observar otros vehículos integrantes de la circulación. La libertad de selección de las velocidades deseadas, sigue relativamente inafectada, aunque disminuye un poco la libertad de maniobra. El nivel de comodidad y conveniencia disminuye porque la presencia de otros comienza a influir en el comportamiento individual de cada uno.

NS C: Pertenece al rango del flujo estable, pero marca el comienzo del dominio en el que la operación de los usuarios individuales se ve afectada de forma significativa por las interacciones con los otros usuarios. La selección de velocidad se ve afectada por la presencia de otros, y la libertad de maniobra comienza a ser restringida. El nivel de comodidad y conveniencia desciende notablemente.

NS D: Representa una circulación de densidad elevada, aunque estable. La velocidad y libertad de maniobra quedan seriamente restringidas, y el conductor o peatón experimenta un nivel general de comodidad y conveniencia bajo. Los pequeños incrementos del flujo generalmente ocasionan problemas de funcionamiento.

NS E: El funcionamiento está en él, o cerca del, límite de su capacidad. La velocidad de todos se ve reducida a un valor bajo, bastante uniforme. La libertad de maniobra para circular es extremadamente difícil, y se consigue forzando a un vehículo o peatón a “ceder el paso”. Los niveles de comodidad y conveniencia son enormemente bajos, siendo muy elevada la frustración de los conductores o peatones. La circulación es normalmente inestable, debido a que los pequeños aumentos del flujo o ligeras perturbaciones del tránsito producen colapsos.

NS F: Representa condiciones de flujo forzado. Esta situación se produce cuando la cantidad de tránsito que se acerca a un punto o calzada, excede la cantidad que puede pasar por él. En estos lugares se forman colas, donde la operación se caracteriza por la existencia de ondas de parada y arranque, extremadamente inestables.

CAPÍTULO II

Intersecciones y semáforos

Cuando la infraestructura vial empieza a crecer y las vialidades principales y/o secundarias se cruzan entre sí, aparecen puntos de conflicto. Los estudios de tránsito buscan mitigar el problema y poder determinar principalmente el tipo de intersección y los ciclos ideales de cada semáforo para liberar el congestionamiento vehicular y disminuir la probabilidad de un accidente.

Las características de operación de una intersección dependen directamente del número de usuarios que van a transitar por ella. Es por ello, que un diseño mal elaborado de la infraestructura vial y la existencia de controladores de señal obsoletos e ineficientes, son las principales causas que varias ciudades en el mundo presenten problemas serios de transporte.

2.1 Concepto de intersección

Una intersección se define como la unión o cruce de diferentes movimientos direccionales vehiculares en un mismo nivel (AASHTO, 2001).

De acuerdo con la normativa de la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO, por sus siglas en inglés), en su libro verde, el objetivo principal del diseño de una intersección es reducir la gravedad de los posibles conflictos entre los modos de transporte y los peatones, al tiempo que se procura la comodidad y facilidad de las personas que las atraviesan (AASHTO, 2011).

2.1.1 Puntos de conflicto

Los puntos de conflicto son puntos potenciales de accidentes dada su relación con la intensidad de tránsito en una intersección. Se presentan cuando los flujos vehiculares que se mueven en diferentes direcciones interfieren entre sí. Los tres tipos de conflictos son incorporación, salida y cruce. El número de posibles puntos de conflicto en una intersección depende del número de accesos, de los movimientos para girar y del tipo de control de tráfico en la misma.

En la Figura 2.1, se pueden observar los posibles puntos de conflicto dentro de una intersección con geometría tipo cruz.

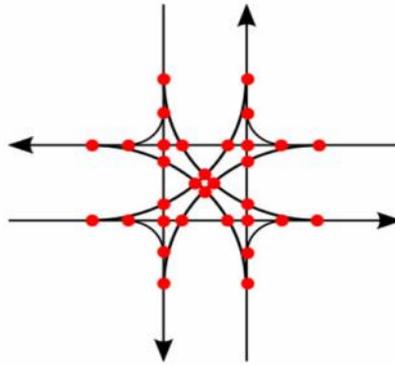


Figura 2.1: Puntos de conflicto en una intersección con geometría tipo cruz.
Fuente: Álvarez, 2014.

2.2 Clasificación de intersecciones

Se dividen en tres tipos generales: a nivel, a desnivel y pasos a desnivel sin ramales de conexión.

2.2.1 Intersección a nivel

Las intersecciones a nivel distribuyen al flujo vehicular en solo un nivel y por tanto, se presentan conflictos entre los flujos vehiculares que se cruzan. Las intersecciones a nivel requieren algún tipo de control para que puedan operar de forma segura, ya sea mediante señalamientos o semáforos. Este tipo de intersección se denomina también “intersección controlada”.

Las intersecciones a nivel pueden ser de tres ramales, denominadas tipo “T” y tipo “Y”, de cuatro ramales “+” (cruz), multi-ramas o circulares (glorietas), como lo muestra la Figura 2.2.



Figura 2.2: Tipología de intersecciones a nivel con ejemplo en cruz.
Fuente: Ingeniería de Tránsito y Carreteras (J. Garber & A. Hoel, 2005).

2.2.2 Intersección a desnivel

Las intersecciones a desnivel son las de mayor capacidad, ya que reducen el número de conflictos de manera directa. El objetivo es separar los flujos en diferentes niveles por medio de vías inferiores o superiores, usando estructuras tales como puentes, túneles, viaductos, etc. Un ejemplo muy común de este tipo de intersección se ilustra en la Figura 2.3.



Figura 2.3: Intersección a desnivel.
Fuente: Dimitri Zaninovich (22/12/2017).

2.3 Dispositivos para el control del tránsito

Se denominan dispositivos para el control del tránsito a las señales, marcas, semáforos y cualquier otro dispositivo, que se colocan sobre o adyacente a las calles y carreteras por una autoridad pública, para prevenir, regular y guiar a los usuarios de las mismas.

Los dispositivos de control indican a los usuarios las precauciones que deben tener en cuenta, las limitaciones que gobiernan el tramo en circulación y las informaciones estrictamente necesarias, dadas las condiciones específicas de la calle o carretera. Se clasifican en:

- Señales verticales
- Señales horizontales
- Dispositivos para protección en obras
- Semáforos

Cualquier dispositivo ya mencionado debe cumplir, mediante cuatro consideraciones básicas (diseño, ubicación, uniformidad y conservación), los siguientes requisitos fundamentales: (1) satisfacer una necesidad, (2) llamar la atención, (3) transmitir un mensaje simple y claro, (4) imponer respeto a los usuarios de las calles y carreteras y (5) estar en el lugar apropiado con el fin de dar tiempo para reaccionar

2.4 Concepto de semáforo

Tomando en cuenta únicamente la cuarta clasificación de los dispositivos de control de tránsito, se procede a definir el concepto de semáforo.

Los semáforos son dispositivos eléctricos de señalización mediante los cuales se regula la circulación de vehículos y peatones en las vías, asignando el derecho de paso de vehículos y peatones secuencialmente, por las indicaciones de luces de color rojo, ámbar y verde, operadas por un aparato electrónico de control de tráfico (SEDESOL, 2008).

Según la SEDESOL y el *Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad* de la SCT, las principales funciones que un semáforo debe desempeñar son las siguientes:

- Interrumpir periódicamente el tránsito de una corriente vehicular o peatonal para permitir el paso de otra corriente vehicular.
- Regular la velocidad de los vehículos para mantener la circulación continua a una velocidad constante.
- Controlar la circulación por carriles.
- Eliminar o reducir el número y gravedad de algunos tipos de accidentes, principalmente los que implican colisiones perpendiculares.
- Proporcionar un ordenamiento del tránsito.

2.4.1 Clasificación de los semáforos

Los semáforos que regulan el tráfico son los siguientes:

- a) Semáforos para el control del tránsito vehicular
 - Semáforos de tiempos fijos o predeterminados (dependientes del tiempo).
 - Semáforos accionados o activados por el tráfico (dependientes del tráfico):
 - Totalmente accionados (totalmente dependientes del tráfico).
 - Parcialmente accionados (semi-dependientes del tráfico).
- b) Semáforos para peatones
 - Áreas de alto volumen peatonal.
 - Áreas escolares.
- c) Semáforos especiales
 - De destello.
 - Para el control del uso de carriles.
 - Para puentes levadizos.
 - Para maniobras de vehículos de emergencia (bomberos, ambulancias).
 - Para el cruce de vías del ferrocarril.

La red de semáforos de la CDMX se compone aproximadamente de 3,500 semáforos que operan dentro de alguna de las tres clasificaciones anteriores. Toda la red es operada por la Secretaría de Seguridad Pública (SSP) y son tres empresas privadas, como lo muestra la Figura 2.4, quienes se encargan de su mantenimiento: EYSSA en el subsistema 1, SEMEX en el subsistema 2 e INMER en el subsistema 3.



Figura 2.4: Red de semáforos de la CDMX.
Fuente: Plática Ing. Rodolfo Jesús Moreno Galán, 2019.

2.4.2 Atributos de los semáforos

- Indicación de señal: Es el encendido de una luz del semáforo o la combinación de varias de ellas. Los colores de las luces de los semáforos deberán ser como sigue:

→ Rojo fijo: Los vehículos se detendrán antes de la raya de parada. Los peatones no cruzarán la calle, a menos que algún semáforo les dé la indicación de paso.

→ Amarillo fijo: Advierte a los conductores de los vehículos, que está a punto de aparecer la luz roja y que el flujo vehicular que regula la luz verde debe detenerse. De la misma manera avisa a los peatones que no disponen del tiempo suficiente para cruzar. Otorga el tiempo necesario para despejar las intersecciones.

→ Verde fijo: Los conductores de los vehículos podrán seguir de frente o girar, a menos que una señal prohíba dichos giros. Los peatones podrán cruzar por los cruces peatonales.

→ Rojo intermitente: Cuando se ilumine una lente roja con destellos intermitentes, los conductores de los vehículos harán alto obligatorio y se detendrán antes de la raya de parada. Se empleará en el acceso a una vía principal.

- Amarillo intermitente: Los conductores realizarán el cruce con precaución. Se empleará en la vía que tenga la preferencia.
- Verde intermitente: Advierte a los conductores y a los peatones el final del tiempo de luz verde.
- Ciclo: Tiempo necesario para que el disco indicador del semáforo cumpla una secuencia completa de todas sus indicaciones.
- Intervalo: Cualquier división del ciclo, durante la cual no cambian las indicaciones de señal del semáforo.
- Movimiento: Maniobra o conjunto de maniobras de un mismo acceso que tienen el derecho de paso simultáneamente y forman una misma fila.
- Fase: Combinación de indicaciones que permiten uno o varios movimientos simultáneos a través de una intersección. Una fase puede significar un solo movimiento vehicular, un solo movimiento peatonal, o una combinación de movimientos vehiculares y peatonales. Una fase comienza con la pérdida del derecho de paso, final del verde, de los movimientos que entran en conflicto con los que ganan el derecho. Esto es, la fase comienza con el ámbar que previene para detener los movimientos de los que pierden el derecho de paso y termina con el final del verde de los que lo tenían. Por lo tanto una fase consta de un intervalo ámbar, uno todo rojo y uno verde.
- Secuencia de fases: Orden predeterminado en que ocurren las fases del ciclo en función de las necesidades de la intersección.
- Reparto de ciclo: Distribución de la longitud del ciclo entre cada una de las diversas fases.
- Intervalo de despeje: Tiempo de exposición de la indicación ámbar del semáforo que sigue al intervalo verde. Es un aviso de precaución para pasar de una fase a la siguiente.
- Intervalo todo rojo: Tiempo de exposición de una indicación roja para todo el tránsito que se prepara a circular. Es utilizado en la fase que recibe el derecho de paso después del ámbar de la fase que lo pierde, con el fin de dar un tiempo adicional que permita a los vehículos, que pierden el derecho de paso, despejar la intersección antes de que los vehículos, que lo ganan, reciban el verde.

2.4.3 Tipos de operación de control semafórico

2.4.3.1 De tiempo fijo

Los semáforos de tiempo fijo se utilizan en intersecciones donde los patrones de tránsito son relativamente estables, o en las que las variaciones de intensidad de la circulación se pueden adaptar a un programa previsto, sin ocasionar demoras o congestionamientos excesivos. No hay necesidad de contar con detectores y se adaptan especialmente a intersecciones en las que se desea sincronizar el funcionamiento de los semáforos con los de otras instalaciones próximas.

2.4.3.2 Actuado

La instalación de los detectores se presenta en los semáforos de las calles secundarias mientras que la variación de las fases varía de acuerdo a la demanda de tránsito. Siguen utilizando planes horarios fijos y se implementan en cruces de calles residenciales o en cruces con tren como es el caso del tren ligero en la CDMX.

2.4.3.3 Responsivo

Las cámaras de detección se encuentran sobre el corredor principal. Los planes horarios son dinámicos en función de la demanda de tráfico y se utilizan en intersecciones con grandes volúmenes vehiculares.

2.4.3.4 Adaptativo

Es lo último en desarrollo tecnológico de semáforos. Utiliza detectores invasivos en todos los accesos de la intersección. La duración de ciclos y fases varía de acuerdo a la demanda de tráfico, omite el paso de un acceso si este no presenta demanda y opera con un software central desde el puesto de mando; es útil para intersecciones complejas con alta demanda. Como su nombre lo indica, se adapta a las condiciones de tráfico en tiempo real y existe comunicación entre los controladores para no perder la coordinación de la vía.

2.5 Intersección semaforizada

Las intersecciones semaforizadas separan con respecto al tiempo las fases o los movimientos de cruce por medio de ciclos de espera para la luz verde (Ding, 2010). Para obtener un mínimo de demoras, cada fase debe incluir el mayor número posible de movimientos simultáneos. Así se logrará admitir un mayor volumen de vehículos en la intersección.

Las demoras y las colas, resultado del congestionamiento, son un fenómeno de espera comúnmente asociado a muchos problemas de tránsito. La intersección con semáforos es uno de los ejemplos más típicos de un fenómeno de espera, puesto que por la presencia de la luz roja siempre existirá la formación de colas de vehículos. Dicho fenómeno bajo condiciones no

II. INTERSECCIONES Y SEMÁFOROS

saturadas del tránsito, esto es, para cada ciclo, las llegadas son menores que la capacidad del acceso. La capacidad de un acceso a una intersección con semáforos se expresa en términos del flujo de saturación (s). Cuando el semáforo cambia a verde, el paso de los vehículos a través de la línea de alto se incrementa rápidamente a una tasa equivalente al flujo de saturación, la cual se mantiene constante hasta que la cola se disipa o hasta que termina el verde. El flujo de saturación es la tasa máxima de salidas que puede ser obtenida cuando existen colas.

En la Figura 2.5 se observan, en forma esquemática, los conceptos de longitud de ciclo, intervalos y fases de una intersección de cuatro accesos operada con un semáforo de dos fases.

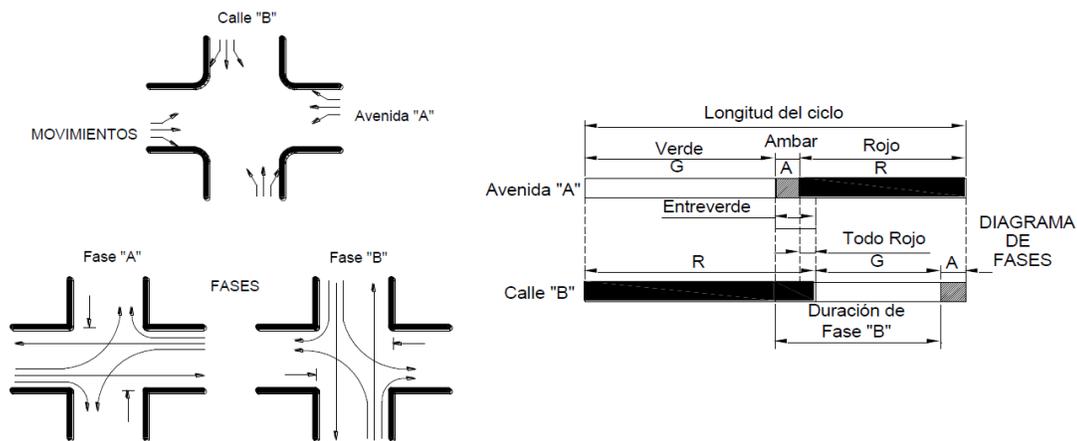


Figura 2.5: Fases y diagrama de fases en una intersección con semáforo.
Fuente: Ingeniería de Tránsito (Cal y Mayor R. & Cárdenas G., 2010).

La distribución de los tiempos en cada fase debe estar en relación directa con los volúmenes vehiculares de los movimientos correspondientes. En otras palabras, la duración de cada fase y del ciclo dependerá de la demanda.

CAPÍTULO III

Situación actual del transporte urbano en la Ciudad de México

En los últimos 25 años, la Ciudad de México enfrentó un fuerte proceso de urbanización caracterizado por patrones insostenibles de ordenamiento territorial y urbanismo que resultaron en una duplicación de su población urbana y en un crecimiento siete veces mayor de su mancha urbana. Esta tendencia afecta la forma y el funcionamiento de las ciudades del país, así como los patrones de movimiento de la población. Una consecuencia directa de ello ha sido la formación evolutiva del sistema de transporte y no el resultado de un plan maestro basado en una planeación bien hecha. Desde el crecimiento de las principales urbes del país, el sistema de transporte se ha tenido que ir adaptando y modificando según las necesidades de la ciudad y de su población; es por eso que en muchos casos, la Ciudad de México no cuenta con un sistema de transporte bien planificado. El sistema con el que se cuenta actualmente es el producto de muchas decisiones individuales de construir o mejorar sus diferentes partes.

La infraestructura de los sistemas de transporte es uno de los patrimonios más valiosos con el que cuenta cualquier país, por lo que su magnitud y calidad representa uno de los indicadores del grado de desarrollo del mismo (Cal y Mayor, 2007). A pesar de ello, en México no se le ha dado la suficiente importancia a la formación de profesionistas enfocados al estudio de la problemática del transporte y sus alternativas de solución. Es posible encontrar situaciones incongruentes, como la falta de coordinación entre los modos de transporte o el diseño de estaciones contrarias a la necesidad del usuario. Un componente fundamental de la planeación es el pensar a futuro, y generalmente, cuando la ciudad cuenta con un desarrollo evolutivo no planificado como lo es en muchas ciudades de la República Mexicana, las posibilidades de implementación de un sistema funcional multimodal son bajas.

Además de la falta de planeación, el importante crecimiento demográfico y del parque vehicular así como el creciente éxodo rural imposibilitan el buen funcionamiento del transporte y pone en clara evidencia la insuficiente oferta de transporte en las grandes ciudades del país. A pesar de lo ya mencionado, el sistema de transporte en México ofrece varias alternativas para la movilidad de los usuarios y es de esperarse, que los especialistas se estén enfocando en resolver los problemas para mejorar su movilidad y ayudar a la solución de los problemas de vialidad desde una perspectiva de sustentabilidad y mayor eficiencia de los diferentes modos de transporte para mejorar así la calidad de vida de los ciudadanos y alcanzar una mejor equidad social en el uso de espacios públicos y económicos para reducir la pérdida de productividad ocasionada por trayectos largos y lentos.

3.1 Historia del transporte en México

El sistema de transporte de Tenochtitlán permitía movilizar a las personas y mercancías a través de canales y calles. Los modos de transporte por los canales eran las canoas y balsas. Con la conquista española hacia 1522, se dio inicio a un nuevo trazo urbanístico; el transporte en el Virreinato se realizaba principalmente en caballos, mulas y carretas. Pronto, el caballo cobró fuerza sobre la canoa, debido a su rapidez, mientras que los burros y mulas sirvieron para el transporte de carga. Poco tiempo después surgieron los carruajes tirados por caballos.

Con una población creciente, 160 mil habitantes para principios del siglo XIX, circulaban gran cantidad de vehículos. La necesidad de conectar al país llegó a tal grado que se construyó la primera vía férrea entre la Ciudad de México y el Puerto de Veracruz (Figura 3.1).

En el año 1859, se introdujo a la Ciudad de México el primer vehículo impulsado por energía eléctrica: el tranvía (Figura 3.2), el cual viajaba a una velocidad de 10 km/h. Hacia 1885 la Ciudad contaba con 300 mil habitantes y el desarrollo de vías públicas sumaba 270 kilómetros. El primer automóvil de combustible llegó a México en 1897, procedente de Tolón, Francia.



Figura 3.1: Primer línea de ferrocarril en México.
Fuente: De: H.C.R. Becher en www.ferropedia.es



Figura 3.2: Sistema de transporte tranvía en México.
Fuente: Pilar Juárez, 2017. Milenio

Es a partir de la aparición de los camiones en 1917 que se gesta una fuerte competencia entre los camioneros y la empresa de tranvías, hecho que ocurre simultáneamente con la Revolución Mexicana. Dicha disputa culmina en 1946 con la nacionalización de los tranvías.

Por su parte, las clases media y alta siguen adquiriendo automóviles, lo que incrementa la flota vehicular en más de un 350% en 1967 invadiendo las vialidades y provocando la competencia por el espacio vial entre los diferentes modos de transporte. Cuando diariamente se realizaban 8 millones de viajes para las actividades cotidianas (económicas, sociales, educativas, ideológicas, políticas, culturales, entre otras), se decide implementar la columna vertebral del transporte de la metrópoli: el Sistema de Transporte Colectivo (STC) Metro de la Ciudad de México. Se concibe con el objetivo de desplazar la exagerada presencia del automóvil particular y de construir, operar y explotar un tren rápido, de servicio regular y con capacidad de servicio con recorrido subterráneo y superficial. En 1969 se inauguró la línea 1 del Metro en su tramo Zaragoza-Chapultepec, con 16 estaciones y 12.6 kilómetros de longitud.

Para los camioneros, la inauguración del metro, lejos de afectarlos negativamente, mejoró las condiciones de desempeño y los benefició, ya que los pasajeros concentrados en las terminales del metro llenaban los autotransportes, las longitudes de las rutas se vieron reducidas, con lo que aumentaron los ingresos y bajaron los costos. Mientras que los autobuses transportaban 50 o 60 pasajeros en promedio, los automóviles particulares transportaban en promedio 1.8 personas por viaje y ocupaban el 70% de la vialidad para circular y estacionarse, consumiendo el 33% de la producción de gasolina nacional.

En 1986 se emitió un decreto presidencial para la protección y mejoramiento del medio ambiente y en el sur de la ciudad se inició la operación del Tren Ligero. En el 2000 se creó la Red de Transporte de Pasajeros (RTP) para brindarle servicio a zonas periféricas de escasos recursos mediante rutas que conectan a zonas de alta población de la ciudad con el STC Metro. La Figura 3.3 ilustra los tres modos de transporte anteriormente mencionados.



Figura 3.3: Inicio de los modos de transporte: Metro, Trolebús y RTP.
Fuente: Pilar Juárez, 2017. Milenio

La transición al nuevo milenio va acompañada por el aumento significativo de la motorización individual, 160,000 vehículos adicionales por año, que se incrementan de 250,000 a 300,000 en los primeros años del nuevo milenio. Este aumento ocasiona incrementos significativos de la congestión, de la ineficiencia vial y de los impactos ambientales. Se sigue dedicando el presupuesto de infraestructura vial al transporte privado en donde destaca la construcción de los segundos pisos del periférico.

En el 2005 se gestó la creación de un nuevo modo de transporte: la primera línea de BRT, bajo el nombre de Metrobús, ejecutada en el principal corredor norte-sur de la urbe, con 19,7 km de longitud y 33 estaciones. Esta línea posibilita el desplazamiento de 250 microbuses y el ahorro de 30,000 toneladas anuales de GEI.

Hoy en día la Ciudad de México cuenta con un amplio sistema de transporte que se encuentra dividido, por cómo se administra, en transporte gubernamental, concesionado y privado. Dentro del primero se encuentran el STC-Metro; el Servicio de Transportes Eléctricos (STE) con el tren ligero y el trolebús; la Red de Transporte de Pasajeros – RTP y el Metrobús. El concesionado está compuesto por los camiones y microbuses y los taxis. Finalmente el transporte privado se

compone de diferentes tipos de vehículos que son propiedad de una persona o de una empresa privada.

3.2 Diagnóstico de la red de transporte

Es de nuestro conocimiento que dentro de la Ciudad de México, muchas calles, ejes viales o avenidas, dependiendo la hora del día, experimentan diferentes niveles de servicio; desde el NS A hasta el NS F. Gran parte de nuestra infraestructura vial presenta, en horas de máxima demanda, niveles de servicio D, E o F, lo cual lleva a grandes congestiones y caos vial. Dicho esto, el transporte público se ve afectado también por los congestionamientos viales, presentando bajos niveles de servicio.

En el 2019, la empresa TomTom realizó su conocido índice de tráfico, el cual colocó a la CDMX como la décimo tercera ciudad de mayor congestión vehicular en el mundo con un nivel de congestionamiento de 52%. Esto quiere decir que en un día promedio en la CDMX, como se lee en la Figura 3.4, se emplea un 52% más de tiempo en un viaje debido a la congestión. Para las horas pico el valor aumenta: en la mañana se alcanza un porcentaje del 82% lo que representa un aumento de 25 minutos por cada 30 minutos de viaje y para la hora pico de la tarde el congestionamiento es de 87% y el aumento de 26 minutos por cada 30 minutos de viaje. El estudio consiste en un ranking que mide 416 ciudades en 57 países para proporcionar datos a los conductores, la industria y los responsables de formular políticas sobre los niveles de congestión del tráfico en las zonas urbanas.

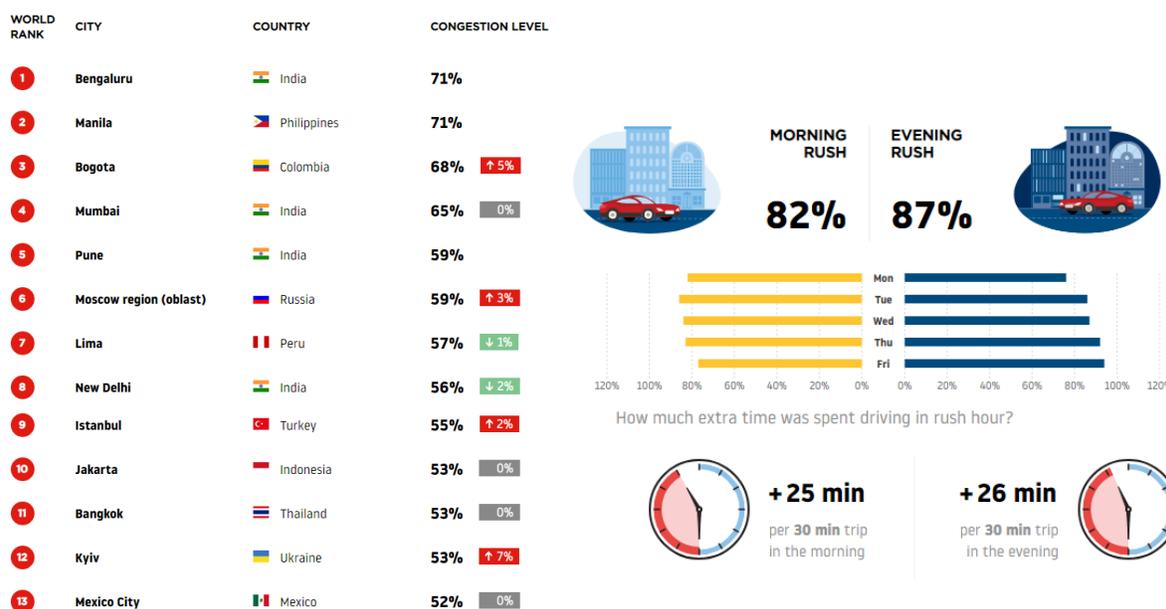


Figura 3.4: Niveles de congestión en el mundo.

Fuente: TomTom Traffic Index 2018.

La velocidad de circulación dentro de la CDMX se ha reducido de manera sostenida, estimándose en 11 km/h en promedio en zonas centrales de la ciudad (BID, 2018b). Este aumento de la motorización incrementa los tiempos de traslado, presiona a un incremento en el gasto para la expansión de la infraestructura vial y agudiza los problemas ambientales asociados al transporte urbano.

Y peor aún, como ha venido marcando la tendencia en el sector del transporte, en las próximas décadas las ciudades se enfrentarán a serios problemas ocasionados por el incremento en la demografía a nivel mundial, la urbanización, la presión a nivel internacional por la necesidad de reducir las emisiones de GEI, las grandes congestiones viales y la vejez y el deterioro a los que la infraestructura vial y el equipamiento de transporte se ve sometido. Para ello, toda solución debe basarse en tres elementos que, trabajando simultáneamente, permiten un tránsito seguro y eficiente en que se apoye la misma. Estos tres elementos son: la ingeniería de tránsito, la educación vial y la legislación y vigilancia policíaca.

Se ha comentado mucho sobre el diseño que se les debería dar a las nuevas redes viales urbanas, en las que junto a la función de transporte, deben recuperar las funciones sociales, ecológicas y económicas anteriormente perdidas, desempeñando un papel determinante en materia de estructura urbana. A partir de esto, podemos decir que la Ciudad de México sólo será competitiva en la medida que sea capaz de movilizar a su población, transportar bienes y mercancías e intercambiar ideas e información de manera sustentable, ágil y eficientemente.

Tres de los objetivos más importantes son:

- Mejorar las condiciones de movilidad y conectividad que permita a los usuarios reducir los tiempos de traslado.
- Aumentar la capacidad y mejorar los niveles de servicio de las vialidades.
- Incrementar la competitividad de la ciudad para alcanzar un desarrollo sustentable, incluyente y equitativo.

Los primeros dos puntos van de la mano y se analizarán más a detalle en los siguientes capítulos del trabajo, especialmente la reducción de los tiempos de traslado en el modo de transporte público Metrobús.

Finalmente, para enfrentar los problemas derivados de la fragmentación, ineficiencia e inequidades del sistema de infraestructura vial actual de la CDMX, la SEMOVI propone en su Plan Estratégico de movilidad de la Ciudad de México 2019 una estrategia transversal basada en la redistribución de tres componentes estructurales de la movilidad urbana (SEMOVI, 2019):

1. Redistribución de los modos, favoreciendo la caminata, el uso de la bicicleta y el transporte público, que en conjunto suman el 77% de los viajes en la ciudad y el 80% de los traslados en la metrópolis.

2. Redistribución del espacio vial, priorizando la circulación rápida y segura de los servicios de transporte público y modos de transporte no motorizado, al tiempo que generamos políticas que tengan como prioridad a las personas en mayor situación de vulnerabilidad.
3. Redistribución de los recursos, redirigiendo inversiones hacia infraestructura que privilegia el transporte público y no motorizado, hacia políticas públicas que contribuyan a generar una ciudad incluyente, accesible, equitativa y garantizando a su vez tarifas accesibles a la ciudadanía.

3.3 Transporte urbano

Según el INEGI en su conjunto de datos “vehículos de motor registrados en circulación”, la flota vehicular de la Ciudad que está integrada por las unidades registradas como transporte individual, además de colectivo y escolar, suma en total 5,940,847 unidades y 200,477 bicicletas, lo que representa el 99% de la flota vehicular. Un hecho preocupante en cuanto a la ocupación del transporte público y de la bicicleta es que existe muy baja prioridad para su uso; el 1,6% de las vías son usadas por autobuses mientras la bicicleta alcanza apenas el 0,05% de las vías. Diariamente se registran 48,804,197 viajes de los cuales 34,558,217 se realizan con algún modo de transporte. De los 48,804,197 viajes, el 24,1% se efectúa en transporte individual (automóvil, motocicleta, taxi y bicicleta) y poco más de la mitad del total (51,5%), en transporte público, mientras que los viajes a pie (24,4%) representan algo más que los viajes en transporte individual (EOD, 2017).

El transporte urbano se puede subdividir en tres categorías principales: transporte público, privado y de carga. Se puede considerar una cuarta categoría que involucra a las tres anteriores pero desde un enfoque del medio ambiente; y es el transporte sustentable. Por cuestiones de este trabajo, se explica únicamente el transporte público.

3.3.1 Transporte público

El transporte público permite la movilización masiva de gente en una ciudad con el fin de satisfacer su demanda diaria. El transporte público o también conocido como transporte masivo o semi-masivo incluye aquellos modos de transporte que están disponibles para ser utilizados por toda persona que pague la tarifa establecida y que deben ser operados siguiendo un plan operacional ya establecido como rutas y horarios fijos.

El sistema de transporte público se puede dividir en tres diferentes modos de tránsito que están definidos a partir de su derecho de paso (ROW – Right-Of-Way), su tecnología y sus modos de operación. Las tres categorías de derecho de paso se ejemplifican en la Figura 3.5 y son:

1. Categoría A: Vías exclusivas para el uso de un modo de transporte. Alcanza el mejor rendimiento del modo de transporte para transporte urbano debido a que no existe

interacción alguna entre los modos de transporte. Como claros ejemplos están el metro o sistemas de trenes.

2. Categoría B: Vías y/o carriles parcialmente separados. Demanda mayor inversión con un mejor rendimiento que se ve afectado cuando existe interacción entre los modos de transporte en ciertos tramos del recorrido. Claros ejemplos son Light Rail Transit (LRT) y autobuses semi-rápidos como el caso del Metrobús.
3. Categoría C: Calles públicas con tráfico mixto. Los modos de transporte más comunes incluyen camiones, trolebuses, tranvías y automóviles particulares. Por ello, existe una interacción entre los modos mencionados.



Figura 3.5: Categorías de derecho de paso o ROW.

Fuente: Traffic Control – Extension (2018). [Material del aula]. TUM, Múnich, Alemania.

Los beneficios del transporte público son para todos, incluso para aquellos que nunca lo han utilizado, y los ciudadanos deberían entender la importancia de su valor. A continuación se citan los tipos de beneficios que ofrece el transporte público según el Foro de Transporte y Turismo: “*Los beneficios del transporte público*” desarrollado en Australia en el 2010.

Beneficio económico:

- Agiliza la productividad y las oportunidades al mover a los ciudadanos.
- Existe una correlación directa entre el incremento del valor de una propiedad con la mejora del acceso al transporte público.
- La congestión urbana es considerada como uno de los grandes obstáculos de la productividad de las economías desarrolladas.

Beneficio social:

- La capacidad de un individuo, familia o comunidad para acceder a oportunidades económicas y de empleo; educación, salud y otros servicios.
- El transporte público es a veces el único modo de acceso a servicios vitales de gente mayor por lo que es indispensable considerar sus necesidades dentro del transporte.

Beneficio ambiental:

- Sustituyendo los automóviles por transporte público, se reduce significativamente la contaminación del aire, mejorando las condiciones de salud de la población en general.
- La capacidad del transporte público para contribuir a los objetivos de reducción de emisiones se debe considerar seriamente.

Dentro de la jerarquización del uso de la vía pública, el transporte público ocupa el tercer lugar después de los peatones y los ciclistas; así lo ilustra la Figura 3.6. La realidad es que en la CDMX, como en muchas partes, los automóviles se apoderan de la base de la pirámide invertida. Dentro de la misma, se denotan las necesidades del área como necesidades básicas, equidad, eficiencia y cuidado del medio ambiente (Button & Hensher, 2001).



Figura 3.6: Jerarquización del uso de la vía pública.
Fuente: Reglamento de tránsito, SEMOVI.

3.4 Transporte público de pasajeros en la Ciudad de México

El transporte público, regulado por la Secretaría de Movilidad (SEMOVI), ofrece un servicio deficiente e insuficiente para la población que afecta a la mayoría de los usuarios, especialmente a los sectores de menores ingresos que viven en zonas periféricas. Los problemas de desigualdad se observan en los grupos de personas como las mujeres, las personas con discapacidad, las personas de la tercera edad y los menores de edad, que enfrentan barreras diversas que reducen sus posibilidades de moverse con seguridad. Algunos datos que respaldan la ineficiencia, inequidad y la fragmentación del sistema de transporte público de la CDMX, y que se resumen en la Figura 3.7, fueron recabados por la SEMOVI en el Plan Estratégico de movilidad de la Ciudad de México 2019 en donde se cita lo siguiente:

- El Metro, tren ligero, trolebuses y el servicio de la Red de Transporte de Pasajeros (RTP), operados por el Gobierno de la Ciudad de México, padecen de fallas que afectan al 29% de los viajes de la metrópolis. Esto se debe principalmente a la poca inversión en mantenimiento e infraestructura en los últimos años.

III. SITUACIÓN ACTUAL DEL TRANSPORTE URBANO EN LA CIUDAD DE MÉXICO

- El STC Metro estima que 101 trenes, correspondientes al 27% del total de la flota, están fuera de operación, a la vez que sus fallas operacionales, que tan solo en 2017 llegaron a 22,195 son cada vez más continuas.
- El Sistema de Transportes Eléctricos (STE) tiene una crisis más aguda. Sus 300 trolebuses superan los 20 años de vida útil, mientras su parque vehicular se ha reducido en 12% desde 2017 y del restante sólo el 63% se encuentra en operación. A su vez, un tercio de los trenes ligeros se encuentra fuera de operación por distintos motivos.
- En el sistema de autobuses RTP el panorama no es distinto: si bien se adquirieron nuevas unidades en los últimos dos años, el 27% de su flota de servicio público se encuentra fuera de operación.
- El Metrobús se escapa a esta situación, ya que ha recibido inversión para su crecimiento, aunque presenta importantes problemas de saturación en estaciones y autobuses que aumentan los tiempos de espera y reducen significativamente la calidad de los viajes.

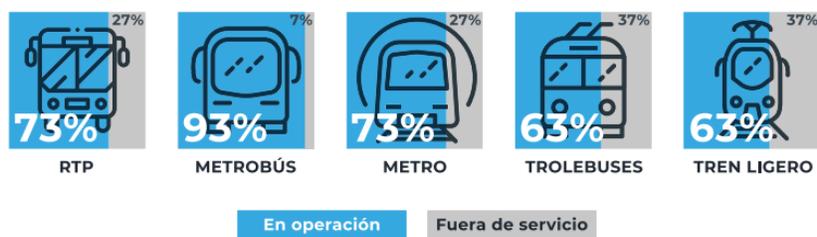


Figura 3.7: Estado del transporte público operado por la Ciudad de México, 2018.

Fuente: Plan Estratégico de movilidad de la Ciudad de México 2019, SEMOVI.

Dentro de la Encuesta Origen-Destino 2017 se muestra la cantidad, en millones, de viajes típicos que se realizan en un día hábil entre semana por la población de más de 6 años de la Ciudad de México y de la Metrópolis por tipo y por modo de transporte utilizado. Como lo muestra la distribución porcentual en la Figura 3.8, el 45.1% de los viajes en la ZMVM se realizan por transporte público mientras el 21.1% de ellos por transporte privado. Para la CDMX, los porcentajes son casi del 50% y del 23.5%, respectivamente. Con un enfoque solamente en el transporte público, los modos más empleados según el Plan Estratégico de movilidad son el colectivo (microbús o combi) con 67.8% en la CDMX y con 82.1% en la ZMVM y el Metro con 16.8% y 38.2% respectivamente.

III. SITUACIÓN ACTUAL DEL TRANSPORTE URBANO EN LA CIUDAD DE MÉXICO



Figura 3.8: Distribución numérica y porcentual de los viajes en transporte público en la CDMX y ZMVM, 2017.

Fuente: Plan Estratégico de movilidad de la Ciudad de México 2019, SEMOVI.

Finalmente en la Figura 3.9 se desglosa el número de viajes realizados diariamente, con su respectivo porcentaje, de los diferentes modos de transporte en la CDMX.

MODO DE TRANSPORTE	VIAJES/DÍA	%
Colectivo	14,625,825.00	42
Automóvil	6,543,727.00	19
Metro	5,508,220.00	16
Autobús suburbano	2,503,813.00	7
Taxi	2,203,813.00	6
Metrobús	1,165,000.00	3
Autobús RTP	800,104.00	2
Bicicleta	420,932.00	1
Trolebús	304,916.00	1
Tren Ligero	115,348.00	3
Motocicleta	92,563.00	3
Otros	273,956.00	1
Total	34,558,217.00	100

Figura 3.9: Número de viajes al día según el modo de transporte en la Ciudad de México.

Fuente: Encuesta Origen Destino INEGI 2017.

3.4.1 Modos de transporte operados por el gobierno.

3.4.1.1 STC-Metro

Para proporcionar servicio, el STC cuenta con 12 líneas de las cuales 10 líneas son neumáticas y las 2 restantes, férreas y con un total de 195 estaciones. Lo anterior, permite cubrir más de 226 kilómetros, con 390 trenes distribuidos entre todas sus líneas, de los cuales aproximadamente el 73% de la flota se encuentra en funcionamiento, mientras que al porcentaje restante se le da mantenimiento o no cuenta con un operador.

El STC Metro es uno de los sistemas de transporte masivo más importantes a nivel internacional, con un servicio público imprescindible en la movilidad en la ZMVM. Ocupa el primer lugar dentro de los sistemas de metro a nivel mundial con menor precio por servicio y es el segundo metro con mayor extensión en km en América Latina.

Las características principales que hacen del Metro de la CDMX un modo de transporte único son:

1. Es un sistema de transporte más rápido comparado a otros modos de transporte.
2. Es de bajo costo.
3. Su contaminación auditiva es menor comparado a otros modos de transporte.
4. Cuenta con conexión a otros modos de transporte.
5. Cubre una sexta parte de la demanda de usuarios del transporte.

Como ya se mencionó, según los datos de la Encuesta Origen-Destino 2017, el 16.8% de los viajes/día hábil (5.5 millones de viajes) son realizados por el STC Metro. Por otro lado, en la ZMVM con casi 22 millones de habitantes, se realizan 39 millones de viajes/día hábil (38.2%). En la Figura 3.9 se puede observar que su porcentaje de uso es bajo comparado con los camiones (colectivo) y el automóvil. Una razón de ellos es que el mayor porcentaje de los usuarios del Metro lo utilizan como un medio de conexión intermedio de traslado entre otros modos de transporte.

3.4.1.2 Tren ligero

El Tren Ligero es la principal vía de transporte colectivo que opera hacia el sur poniente de la Ciudad de México, conectando la estación del Metro Taxqueña con Xochimilco. Representa una continuación del antiguo sistema de tranvías para el sur de la ciudad y es considerado un transporte ecológico por consumir electricidad en lugar de combustibles fósiles. Aporta un porcentaje de servicio del 3% de los viajes en un solo modo de la CDMX (EOD INEGI, 2017) a través de 16 estaciones y una flota de 20 trenes dobles acoplados con doble cabina de mando con capacidad máxima de 374 pasajeros por unidad.

Este modo de transporte no contaminante es más utilizado como una extensión del Metro o como conector entre otros modos de transporte que como uso de transporte único. Es un servicio de transporte que beneficia principalmente a la población de las Delegaciones, hoy Alcaldías, Coyoacán, Tlalpan y Xochimilco (GDF, 2012).

3.4.1.3 Trolebús

El Trolebús es uno de los modos de transporte que data de 1951 y, al igual que el Tren Ligero, este modo de transporte es precursor del tranvía; aunque con la ventaja de contar con mayor libertad de movimiento que el mismo; además de ser silencioso, relativamente rápido, amplio y no contaminar el medio ambiente.

Con la creación de los Ejes Viales, los trolebuses se convirtieron en el transporte principal que correría sobre estas nuevas vialidades. Un claro ejemplo es el Corredor Cero Emisiones A1, que recorre el Eje Central Lázaro Cárdenas, transportando más del 55% de usuarios de toda la red de trolebuses

En el año 2009 la red de trolebuses contaba con 12 líneas en servicio, sin embargo el parque vehicular como las líneas de servicio se han visto reducidas, ya que en la actualidad se cuenta con 8 líneas, un total de 203.64 km y 340 trolebuses inventariados que representa tan solo el 1% del total de los viajes realizados en la CDMX con 304,916 viajes diarios en el 2017. La red de servicio de los trolebuses está constituida por 3 corredores Cero Emisiones y 5 líneas convencionales para atender la demanda de usuarios.

3.4.1.4 Red de Transporte de Pasajeros – RTP

La Red de Transporte de Pasajeros es un sistema de transporte público de autobuses pensado para las zonas periféricas de la ciudad, con la finalidad de atender preferentemente a las clases populares, así como de articular su conexión con otros sistemas de transporte. Uno de sus objetivos principales es trasladar a sus usuarios desde las terminales del Metro y del STE a las zonas habitacionales que circundan la Ciudad de México y viceversa. La Encuesta Origen-Destino del INEGI indica que el RTP representa el 2% del total de los viajes realizados en la CDMX con 800,104 viajes diarios en el 2017. Se cuenta con diferentes tipos de servicio:

- Servicio ordinario: Operan 865 autobuses a través de 93 rutas con un promedio diario de pasajeros transportados de 324 mil usuarios en día hábil (incluye exentos de pago).
- Servicio exprés: Disminuye el tiempo de traslado ya que cuenta con paradas exclusivas colocadas estratégicamente para este fin. Cuenta con 145 autobuses en 23 rutas.
- Servicio Atenea: Su objetivo es garantizar e incrementar traslados libres de violencia sexual en los principales corredores viales de la Ciudad de México. Cuenta con 100 autobuses a través de 50 rutas.
- Ruta Verde/Ecobús: La RTP incorporó la primera flota a nivel nacional que cuenta hoy con 72 autobuses que operan con Gas Natural Comprimido (GNC) denominadas Ecobús, las cuales poseen tecnología de punta amigable con el medio ambiente y por ello contribuyen a reducir la emisión de partículas al 100% de monóxido de carbono (CO), hasta un 99.98% de NOX (óxidos de nitrógeno), al 50% de hidrocarburos, con respecto al parque vehicular que utiliza diésel; además de eliminar la emisión de humo al 100%. Estas unidades fueron incorporadas con 2 rutas: Metro Balderas – Santa Fe y Metro M. A. Quevedo – Santa Fe.
- Servicio Especial/Escolar: Se cuenta con 105 autobuses tipo cero emisiones de contaminantes. Se realizan un total de 530 mil 992 viajes/alumno.
- Servicio Nochebús: Este servicio responde a la demanda ciudadana de contar con un servicio de transporte público nocturno, seguro y económico. RTP ofrece seis rutas.

3.4.1.5 Metrobús

En el año 2007 según datos del INEGI, el metrobús contaba con el 1.2% de los viajes en un solo modo de transporte; hoy en día, dicho porcentaje se ha incrementado al 3% aproximadamente, lo que demuestra su importancia dentro de los modos de transporte. Es un sistema de transporte de tipo BRT, que combina infraestructura y equipamiento de alta tecnología. El Metrobús cuenta con un carril confinado que le permite el libre tránsito de sus autobuses, para brindar una movilidad rápida, segura y de bajas emisiones contaminantes.

El proceso de la operación del metrobús empieza en sus estaciones que cuentan con plataformas elevadas, para permitir el rápido ascenso y descenso a nivel del autobús para los usuarios. En la mayor parte de las estaciones, se cuenta con un sistema de peaje totalmente automatizado por medio de tarjeta inteligente. El servicio es programado y controlado para que sea rápido y frecuente entre origen y destino con una capacidad para atender altas demandas de pasajeros, aunque hoy en día en las horas pico, la capacidad es insuficiente.

Durante 2012 se reunió la documentación necesaria para el registro ante la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) como un Mecanismo de Desarrollo Limpio de un programa de actividades que incluye las Líneas de la 2 a la 13. Cabe señalar que la Línea 1 de Metrobús Corredor Insurgentes obtuvo su registro durante el año 2011.

Las rutas y las características de las flotas que conforman el sistema de transporte Metrobús se muestran a continuación en las Tablas 3.1 y 3.2, respectivamente.

RUTA	LONGITUD EN KM EN AMBOS SENTIDOS	DEMANDA DE USUARIOS (mil pasajeros/día)
Ruta 1: Av. De los Insurgentes	30	720
Ruta 2: Eje 4 Sur	20	190
Ruta 3: Eje 1 Poniente	17	165
Ruta 4: Buenavista-San Lázaro-Aeropuerto	28	75
5 Eje 3 Oriente-Av. Ing. Eduardo Molina	10	80
Ruta 6: Eje 5 Norte-Av. Montevideo	20	160
Ruta 7: Av. Paseo de la Reforma	15	130
TOTAL	140	1520

Tabla 3.1: Rutas del sistema de transporte Metrobús.

Fuente: Metrobús, SEMOVI.

TIPO DE AUTOBÚS	CANTIDAD	CAPACIDAD	DIMENSIONES	CARACTERÍSTICAS PARTICULARES
Articulado	439	160	18 m de largo	1 autobús articulado sustituye a 126 automóviles
Biarticulado	104	240	24 m de largo	Para transportar 1000 personas en 10 km, 4 autobuses biarticulados utilizan 40 litros de combustible mientras que 835 automóviles consumen 650 litros para mover a la misma cantidad de personas. El ahorro es de 460,000 litros al día
Diesel	46	100	12 m de largo	Los motores diésel son más eficientes que los motores de gasolina, por lo que utilizan menos combustible para recorrer la misma distancia.
Híbrido	9	100	12 m de largo	Primera flota de autobuses híbridos en Latinoamérica
Doble piso	90	130	12 m de largo	Vista panorámica Certificación oficial ambiental Euro VI

Tabla 3.2: Características de los tipos de autobuses de la flota del sistema metrobús de la CDMX.

Fuente: Metrobús, SEMOVI.

3.4.2 Modos de transporte concesionados

3.4.2.1 Camiones y microbuses

Desde sus inicios, los camiones y microbuses han sido considerados un modo de transporte conflictivo y desorganizado ya que está constituido por varias empresas privadas las cuales no están debidamente reguladas ni cuentan con una buena planeación, lo que genera un gran número de irregularidades con el nivel de servicio, el registro de las rutas y una competencia entre los operadores por los usuarios. La ZMVM cuenta con un uso de camiones y microbuses del 42% en un solo modo de viaje, lo cual lo convierte en el modo de transporte de pasajeros más utilizado por arriba del automóvil (INEGI, 2017).

La Ciudad de México cuenta con una variedad muy particular de vehículos con capacidades que varían según las modificaciones que se le apliquen al vehículo pues no se sigue ninguna reglamentación al respecto. Se cuenta con lo siguiente:

- Furgonetas, con hasta 18 asientos.
- Camioneta o mejor conocidas como combis, con hasta 13 asientos.
- Microbuses, con hasta 40 asientos.
- Autobuses, hasta 50 asientos.

Una de sus características principales es que son un medio de transporte de conducción libre con elevado rendimiento, en cuanto a relación de viajeros/superficie ocupada. Sort hace referencia a que el tipo de vehículo se acopla directamente a la zona a la que brinda el servicio, por ejemplo los microbuses o combis son orientadas a la población de barrios pobres que cuentan con callejuelas estrechas y de gran pendiente donde no pueden acceder camiones grandes. Sin embargo los microbuses son el vehículo de mayor uso en la ahora CDMX. (Sort, 2006).

Las rutas para este modo de transporte no funcionan como una red de transporte común debido a que son concesiones por parte de la SEMOVI a personas físicas (a quienes comúnmente se les conoce como “hombres-camión”) o empresas privadas que poseen una o varias unidades para

prestar el servicio. La manera en que se organiza el microbús o camión se define al interior de cada ruta, donde las ganancias de cada uno son para el beneficio del dueño o chofer y son producto del pasaje recolectado. En México, de acuerdo con la SCT, al cierre de 2016 existían 28 mil concesiones individuales repartidas entre 140,830 empresas del sector registradas, de las cuales el 81.2% son hombre-camión, 16.2% pequeñas empresas (6 a 30 vehículos), 2% empresas medianas (31 a 100 vehículos) y 0.6% grandes empresas con más de 100 camiones en su flota. La operación y el mantenimiento de las unidades de transporte están a su cargo.

De los 15.57 millones de viajes que se realizan diariamente en transporte público en la ZMVM, en prácticamente 3 de cada 4 se emplea el servicio colectivo de microbús; esto es 11.54 millones de viajes. En los municipios conurbados se utilizan en 4 de cada 5 viajes en transporte público. La siguiente Figura detalla las cantidades exactas.

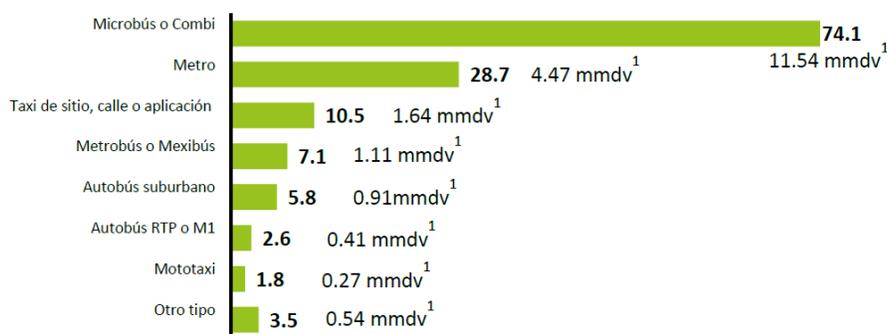


Figura 3.10: Distribución porcentual de viajes realizados un día entre semana por la población de 6 años y más en transporte público, según principales medios de transporte utilizado.

Fuente: Encuesta Origen Destino INEGI 2017.

Finalmente, este modo de transporte tiene ciertas ventajas y desventajas que generan disconformidades en cuanto al servicio otorgado. En un gran número de viajes el usuario tiene la ventaja de poder realizar paradas continuas a su voluntad, son útiles como complemento a la red del Metro, permitiendo un mayor acercamiento al destino. Dentro de sus desventajas, sobresale la calidad del servicio prestado ya que las unidades suelen ser incómodas, generalmente suelen ir muy llenas y son conducidas con escasa precaución.

3.4.2.2 Taxis

El servicio de transporte público individual en la modalidad de taxi, según Jorge Fernández Ruiz, es brindado a partir de un vehículo automotor de alquiler con conductor, sin itinerario fijo, destinado al transporte de uno o varios pasajeros dentro del esquema de transporte público, y en consecuencia, en sujeción a un régimen de derecho público que impone los requisitos que debe cumplir el vehículo y su conductor, sus reglas de operación, así como la tarifa que debe aplicarse. (Fernández R., 2002).

Los taxis cuentan con el 6% de los viajes en un solo modo de transporte (INEGI, 2017), y puede considerarse como uso de automóvil puesto que cuenta con el mismo número de plazas y comparte característica similares. Hoy en día, el servicio de taxi, se divide en 4 modalidades diferentes:

- Taxis itinerantes: El servicio es brindado por unidades que cuentan con taxímetro.
- Radiotaxis: Las compañías mantienen contacto y registro por medio de una antena.
- Taxis de sitio: No cuenta con taxímetro, su precio, mayor que los anteriores, debe ser acordado antes de iniciar el viaje.
- Taxis mediante una aplicación: Se brinda el mismo servicio mediante tarifas dinámicas sujetas a la distancia recorrida y el tiempo de servicio. La modalidad de pago es mediante tarjeta bancaria. Todas las características del viaje se realizan mediante una aplicación de celular. Se debe realizar un registro ante el gobierno con una aportación del 1.5% de cada viaje al Fondo del Taxi, la Movilidad y el Peatón.

3.5 Tiempos de viaje

Los tiempos de viaje en la CDMX y la ZMVM van en aumento constante, tanto por las distancias a cubrir que son mayores, como por la obligada reducción de velocidad de los diferentes modos de transporte disponibles por los más frecuentes cuellos de botella. De igual manera, los tiempos y medios de traslado están distribuidos de manera muy desigual. La paradoja es que algunas de las zonas mejor servidas por las redes de transporte público colectivo son las que más ocupan el automóvil, mientras las periferias de escasos recursos, altamente dependientes de estos sistemas, sufren de servicios lentos, incómodos, inseguros y poco confiables.

Como se mencionó, los tiempos promedio de viaje son mayores para el transporte público, utilizado en su mayoría por los sectores de menores ingresos y en el que se realizan el 50% de los viajes de la ciudad, en comparación con los realizados en automóvil. Por ejemplo, realizar un viaje en Metro implica 39% más de tiempo en promedio que el viaje en automóvil particular, situación similar a los tiempos de viajes en transporte colectivo, que son 54% mayores, en autobús suburbano 33% mayores y en RTP 22% mayores (Plan Estratégico de movilidad, 2017).

En la Figura 3.11 podemos observar que en los municipios conurbados, los modos de transporte como el trolebús y el metro presentan tiempos de traslado promedio cercanos a una hora y media mientras que para la CDMX los colectivos y nuevamente el Metro son los modos que presentan tiempos de traslado promedio mayores a una hora. El tiempo promedio de viaje en la Ciudad es de 45 minutos para el automóvil y de 30 minutos para el taxi.

III. SITUACIÓN ACTUAL DEL TRANSPORTE URBANO EN LA CIUDAD DE MÉXICO

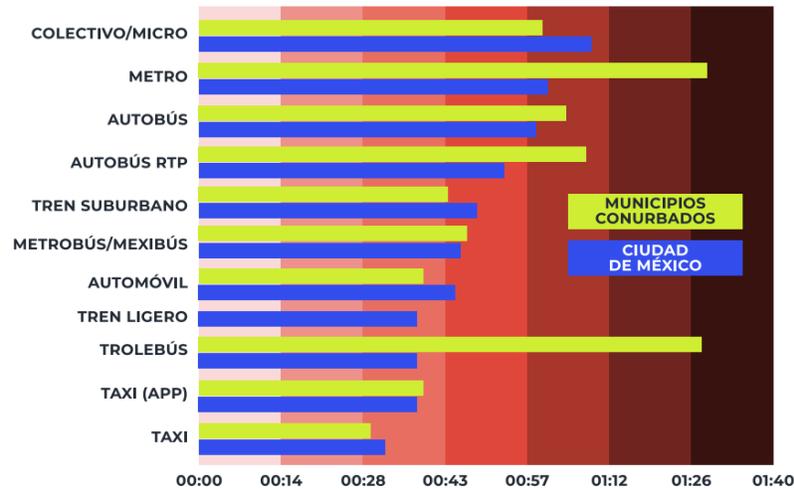


Figura 3.11: Tiempos de traslado promedio por modo de transporte en la ZMVM, 2017.
Fuente: Plan Estratégico de movilidad de la CMDX 2017, SEMOVI.

Haciendo un resumen de la Figura 3.12, se muestran los tiempos y el uso de cada modo de transporte de los resultados arrojados por la Encuesta Origen-Destino 2017 en Hogares de la ZMVM sin distinción de sexo, propósito de viaje o zona de residencia de los viajeros. Se observa que los datos en amarillo de la Tabla 3.3 representan los resultados más críticos de cada columna mientras que los datos en azul representan los segundos más críticos. Se concluye entonces que el uso del autobús y el automóvil es el que presenta mayores tiempos de viaje. Nuevamente el automóvil pero esta vez en conjunto con la bicicleta presentan los menores tiempos de traslado; finalmente los colectivos o micros y caminar son los modos con mayor porcentaje de uso.

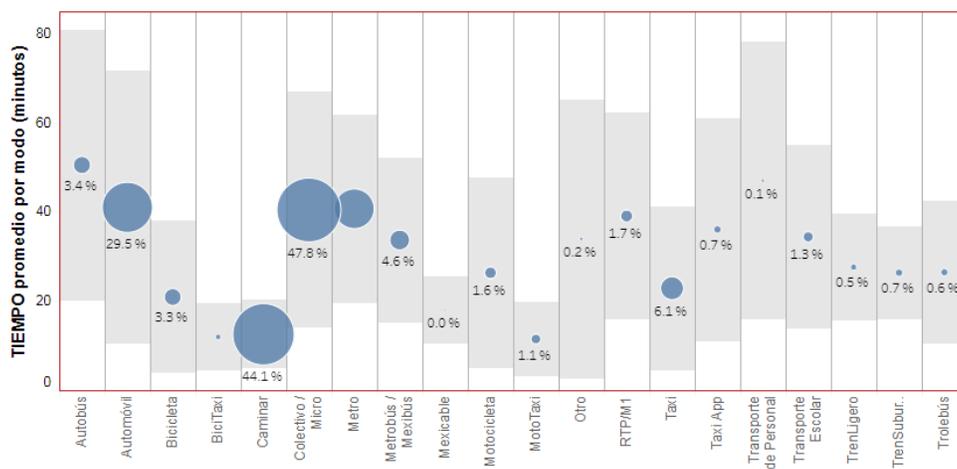


Figura 3.12: Tiempos de traslado promedio por modo de transporte en la ZMVM, 2017.
Fuente: Encuesta Origen-Destino en Hogares 2017, II UNAM; INEGI.

III. SITUACIÓN ACTUAL DEL TRANSPORTE URBANO EN LA CIUDAD DE MÉXICO

Modo de transporte	Duración Promedio del Viaje [min]	Desviación Estándar [min]	Duración Máxima del Viaje [min]	Duración Mínima del Viaje [min]	Porcentaje [%]
Autobús	50.47	30.42	80.88	20.05	3.40
Automóvil	40.98	30.59	71.57	3.79	29.50
Bicileta	20.88	17.09	37.97	3.79	3.30
Caminar	12.52	7.67	20.20	4.85	44.10
Colectivo/Micro	40.39	26.44	66.84	13.95	47.80
Metro	40.66	21.04	61.70	19.62	18.50
Merobús/Mexibús	33.65	18.54	52.19	15.12	4.60
Motocicleta	26.32	21.41	47.73	4.90	1.60
RTP/M1	39.03	23.19	62.22	15.85	1.70
Taxi	22.84	18.33	41.18	4.51	6.10
Taxi App	36.00	24.95	60.95	11.06	0.70
Transporte Escolar	34.36	20.50	54.86	13.87	1.30
Tren Ligero	27.58	11.93	39.50	15.65	0.50
Tren Suburbano	26.32	10.36	36.69	15.96	0.70
Trolebús	26.43	15.93	42.36	10.50	0.60
Otro	33.91	31.31	65.22	2.60	0.20

Tabla 3.3: Resumen de datos en forma de tabla de la Figura 3.14.

Fuente: Encuesta Origen-Destino en Hogares 2017, II UNAM; INEGI.

Esta situación provoca que los habitantes de esta ZMVM pierdan en promedio 219 horas en el transporte público al año, lo cual se traduce en un costo pérdida que puede ir de 1.7% a 4.7% del PIB que genera esa área, subrayó Isaac Medina Martínez de ITDP México en octubre del 2019.

El doctor Carlos Gershenson García del IIMAS de la UNAM explicó el fenómeno de vehículos que llegan a una estación llenos de gente haciendo imposible el ascenso y descenso, y que inmediatamente después llega uno vacío. Gershenson empleó la regla conocida como “configuración equidistante en el tiempo” que establece lo siguiente: en cada estación el tiempo entre la salida de un vehículo y la llegada del siguiente debe permanecer constante. Las demoras surgen cuando algún vehículo se retrasa, por ejemplo, debido a la gran demanda, aplazando la salida de los siguientes convoyes. Con la espera, se incrementa el número de usuarios por estación que, a su vez, retrasará la salida de los vehículos, generando un círculo vicioso.

Otro efecto muy común derivado de las demoras de las unidades del transporte público es el efecto conocido como “Bus bunching” o sobreposición. Consiste principalmente en la acumulación de dos o más unidades por el incumplimiento en sus horarios o por efectos secundarios en el tránsito. La consecuencia principal del “Bus bunching” es el aumento de los tiempos de espera y la mala distribución de usuarios transportados en las unidades.

En la Ciudad de México, el tiempo promedio que los usuarios del sistema de transporte público esperan en una parada o estación es de 11 minutos, pero más del 32% esperan más de 20 minutos (Moovit, 2017). Además del tiempo de espera en las estaciones, el tiempo que es destinado a realizar un transbordo en el mismo o en diferentes modos de transporte y especialmente en ciertas estaciones en el Metro es tiempo muerto para los usuarios y es algo para tener en mente cuando el 82% de los usuarios realizan al menos un transbordo durante sus viajes.

CAPÍTULO IV

Sistemas de transporte tipo BRT

Dentro de los modos de transporte público semi-masivos, el autobús es el más abundante y el más utilizado en México. Dado que los autobuses comparten la infraestructura vial con los automóviles, camiones de diferentes tipos y otros vehículos como motocicletas y bicicletas, las áreas de congestión de tránsito son problemas constantes que provocan el aumento de los tiempos de viaje de los autobuses y por ende el incumplimiento de sus horarios programados.

Para evitar esta problemática, el primer sistema de gran escala de autobús en carril exclusivo, o en inglés Bus Rapid Transit (BRT), fue desarrollado en Curitiba, Brasil, en 1974 por el arquitecto y urbanista Jaime Lerner (Weinstock et al., 2011). El sistema BRT tiene la capacidad de mejorar el nivel de servicio en el corredor y en toda la red circundante y genera muchos aspectos positivos, incluida la reducción en el tiempo de viaje y en las demoras, el aumento de la velocidad y la fiabilidad, la reducción de impactos ambientales y la mejora de la seguridad (Carrigan et al., 2013).

Fue hasta el año 2000 con el sistema *TransMilenio* de Bogotá que se cambió la percepción de BRT en el mundo. Bogotá, una ciudad de gran tamaño (6.5 millones de habitantes en ese entonces) y una ciudad relativamente densa (240 habitantes por hectárea), demostró que el BRT era capaz de ofrecer un rendimiento de alta capacidad para las mega ciudades del mundo. Hoy en día, con Bogotá y Curitiba como principales ejemplos, el número de ciudades con sistemas BRT construidos o con sistemas en desarrollo es bastante significativo; más de 160 ciudades en todo el mundo prestan su servicio de transporte con la ayuda de BRT realizando alrededor de 30 millones de viajes diarios de pasajeros (Carrigan et al., 2013).

4.1 Definición del sistema

El sistema BRT está definido por la Administración Federal de Tránsito (FTA, por sus siglas en inglés) del Departamento de Transporte de los Estados Unidos (USDOT) como un sistema mejorado de autobuses que opera en carriles de derecho de paso exclusivos para combinar la flexibilidad de los autobuses con la eficiencia del ferrocarril. Al hacerlo, se opera a mayores velocidades, proporciona una mayor confiabilidad del servicio y aumenta la comodidad del usuario. Con el uso de ITS e inversiones operativas, se proporciona un servicio significativamente mejor que el servicio de autobuses tradicional (USDOT, 2015).

Debido a los altos costos de la infraestructura ferroviaria, donde se incluye al metro, muchas ciudades solo pueden implementar estos sistemas a lo largo de pocos kilómetros. Implementar un sistema BRT es entonces económicamente más viable, debido a que proporciona un servicio de

transporte de alta calidad, similar a un metro, pero a una fracción del costo. Cabe resaltar que cuando se sustituye una línea de Metro por una de BRT, es muy probable que existan problemas de saturación. Una línea BRT debe fungir como complemento al metro y no como sustituto.

La siguiente lista contiene las características de algunos de los sistemas BRT más exitosos implementados hasta la fecha. Debe aclararse que no todos los sistemas cuentan con todas las características enlistadas. Dentro de sus limitaciones de costo y capacidad, ciudades pequeñas y medianas pueden encontrar que no todas estas características estén a su alcance ya que existen factores o circunstancias locales que limitan la implementación de ciertas características.

- Carriles exclusivos de derecho de paso.
- Rápido ascenso y descenso.
- Transferencias gratuitas entre líneas.
- Pago de tarifa antes de ingresar al autobús.
- Estaciones cerradas que sean seguras y confortables.
- Mapas de ruta, señalización y pantallas de información en tiempo real.
- Tecnología de localización automática de vehículos para gestionar sus movimientos.
- Integración modal en estaciones y terminales.
- Tecnologías limpias de vehículos.
- Reformas estructurales efectivas dentro de las instituciones de transporte público.

Las características anteriores están destinadas a ofrecer al usuario un servicio de alta calidad como la disminución de hasta un 40% en los tiempos de recorrido comparado con un transporte convencional, mayor certidumbre en la operación, tiempos de espera mínimos para abordar un autobús, conectividad con otras modalidades de transporte, seguridad y accesibilidad.

4.1.1 Razones para su implementación

Desde hace un par de décadas, los especialistas en transporte de todo el mundo han examinado soluciones de transporte público con la meta de mejorar la movilidad y contener la expansión urbana. Estas preocupaciones han llevado al desarrollo de los sistemas BRT los cuales se pueden construir en etapas con tiempos de planeación y de construcción menores, y que tienen menores costos y mayor flexibilidad que otros modos de transporte. Las razones más importantes se resumen a continuación:

Como ya se mencionó, dentro de los elementos de diseño que tienen por objeto aumentar la eficiencia operativa de los sistemas BRT se cuenta con: (1) la eliminación de varios carriles de tránsito combinado para disponer carriles separados para autobuses, (2) la priorización de las señales para los autobuses en las intersecciones, (3) el pago de tarifas fuera del vehículo y (4) plataformas de abordaje a nivel del autobús. En comparación con los sistemas ferroviarios, los sistemas BRT requieren inversiones de capital inicial considerablemente menores. Los costos de capital para los sistemas oscilan entre 2.4 MUSD y 3.5 MUSD por kilómetro, para los sistemas

desarrollados en Curitiba, Ciudad de México o Guayaquil (mejoras del sistema físico menores), y entre 3.8 MUSD y 12.5 MUSD por kilómetro, como en Bogotá o Pereira (reconstrucción de la calzada del corredor) (EMBARQ, BID, 2013). Tienen también, en promedio, costos operativos más bajos y períodos de puesta en marcha mucho más cortos.

En la Tabla 4.1 se puede observar el abismo que existe entre los costos para sistemas BRT y otros sistemas de transporte público, tomando los casos de la línea B del Metro de la Ciudad de México y el sistema BRT de Porto Alegre, los cuales cuentan con longitudes muy similares, 24 y 27 km respectivamente. Es cuando se comparan los costos de inversión de ambas líneas que queda muy claro la diferencia del costo por kilómetro para cada modo de transporte; la línea B del metro requirió de US\$40.9 millones por cada kilómetro mientras que la línea de BRT de Porto Alegre requirió tan solo US\$1 millón por cada kilómetro; es decir, 40 veces menos de inversión.

Ciudad	Tipo de sistema de transporte	Longitud de la línea [km]	Costo por km [US\$ million/km]
Taipei	Bus rapid transit	57	0.5
Porto Alegre	Bus rapid transit	27	1.0
Quito (Eco-Via Line)	Bus rapid transit	10	1.2
Las Vegas (Max)	Bus rapid transit	11.2	1.7
Curitiba	Bus rapid transit	57	2.5
Sao Paulo	Bus rapid transit	114	3.0
Bogotá (Phase I)	Bus rapid transit	40	5.3
Tunis	Light rail transit	30	13.3
San Diego	Light rail transit	75	17.2
Lyon	Light rail transit	18	18.9
Bordeaux	Light rail transit	23	20.5
Portland	Light rail transit	28	35.2
Los Angeles (Gold Line)	Light rail transit	23	37.8
Kuala Lumpur (PUTRA)	Elevated rail	29	50.0
Bangkok (BTS)	Elevated rail	23	73.9
Las Vegas	Monorail	6.4	101.6
Mexico (Line B)	Metro rail	24	40.9
Madrid (1999 extension)	Metro rail	38	42.8
Caracas (Line 4)	Metro rail	12	90.3
Hong Kong	Metro rail	82	220.0
London (Jubilee Line ext.)	Metro rail	16	350.0

Tabla 4.1: Comparación de costos de implementación de sistemas BRT con otros sistemas.

Fuente: Lloyd Wright, BRT, 2005.

En general, estos sistemas alcanzan velocidades y una productividad muy superiores al promedio, comparados con los autobuses convencionales. Las velocidades promedio de los sistemas de tránsito rápido de autobuses en las ciudades de América Latina y el Caribe oscilan entre los 18 y los 28 km/hora, siendo el sistema Transmilenio de Bogotá el primero en alcanzar niveles de productividad operativa equivalentes al metro. La productividad operativa se define como el número de pasajeros transportados por carril por dirección por hora en el sistema. En cambio, las velocidades promedio de los autobuses convencionales se ubican en un nivel de 7 a 14 km/hora en las grandes ciudades (BID, 2013).

La Figura 4.2 compara la productividad operativa contra los costos en millones de dólares por kilómetro para cada modo de transporte público analizado: BRT, metro, metro elevado y LRT (tren ligero). A partir de estos datos, el BRT se posiciona como la opción de menor costo que

proporciona una gama relativamente amplia de opciones de capacidad. El BRT puede funcionar económicamente en ciudades con baja demanda de pasajeros hasta capacidades más altas de 40,000 usuarios por hora por dirección.

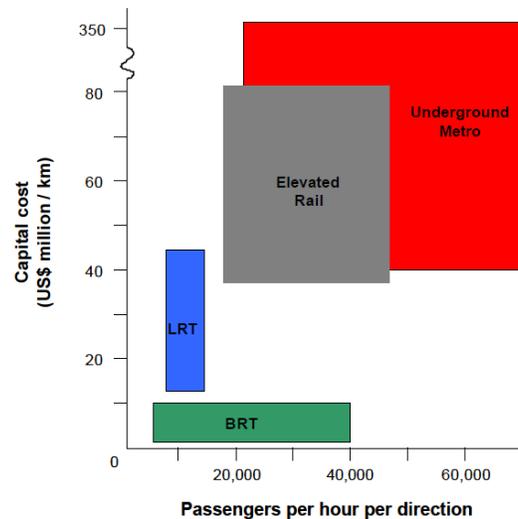


Figura 4.2: Capacidad de pasajeros y costos para cuatro modos de transporte público.
Fuente: Lloyd Wright, BRT, 2005.

En un estudio sobre la primera línea de tránsito rápido de autobuses en la Ciudad de México se identificó una reducción del 10% en las emisiones de CO₂ en el corredor, debido a un cambio modal del automóvil privado al sistema BRT. Además de mejoras en las emisiones de los autobuses, los niveles de energía y una mayor eficiencia energética en general por parte de los viajes realizados en el corredor (Schipper et al., 2009).

4.2 Estaciones y vehículos BRT

Según marca los Estándares BRT, las estaciones y los vehículos que prestan el servicio deben contar con ciertas características. Para las paradas, la distancia óptima entre cada estación es de alrededor de 450 metros. Cuando es mayor, se impone más tiempo al usuario que camine a la siguiente estación que el que se ahorra con el autobús. Por lo tanto, para mantener una coherencia razonable con el espaciamiento óptimo entre estaciones, la distancia promedio entre estaciones no debe ser inferior a 0.3 km ni superior a 0.8 km.

Las estaciones deben ubicarse a un mínimo de 26 metros, pero idealmente a 40 metros de las intersecciones para evitar demoras. Cuando las estaciones se ubican justo después de la intersección, pueden producirse demoras cuando los pasajeros tardan mucho en subir o bajar y se impide que otras unidades atraviesen la intersección. Pero cuando se ubican justo antes de la intersección, la probabilidad que le toque luz roja en la intersección aumenta.

También, los autobuses deben cumplir con las normas de emisiones y número de puertas. Para las normas de emisiones, si no quieren ser penalizados en sus puntajes de calificación, deben contar con la tecnología Euro VI y EE. UU. 2010. Como la velocidad de entrada y salida de las unidades depende del número de puertas con las que cuente la unidad, se recomienda lo siguiente: los autobuses articulados deben tener tres o más puertas en el lado de la estación o dos puertas anchas para autobuses regulares (no articulados) y permitir el abordaje a través de todas sus puertas.

4.3 Barreras del sistema

Dentro del aspecto económico, ambiental y social, los beneficios del sistema BRT ponen en clara evidencia que muchas ciudades deberían empezar a considerar la posibilidad de implementarlo, pero en muchas ocasiones, existen ciertas barreras que lo impiden. Dentro de estas barreras se encuentra principalmente la voluntad política, las instituciones y los operadores existentes, la falta de información, la capacidad técnica e institucional, el financiamiento y las limitaciones físicas como geográficas.

La voluntad política en conjunto con la oposición de los grupos de operadores existentes, son las principales dos barreras a vencer cuando se desea implementar un sistema BRT. Sin embargo, la experiencia respalda a aquellos políticos que han decidido implementar el BRT, exponiendo sus beneficios en términos de ahorros económicos, se les ha recompensado con una enorme popularidad, como es el caso de Curitiba en Brasil y de Bogotá en Colombia.

El personal especializado encargado de la planificación y el diseño representa una barrera misma para su desarrollo. Este personal no suele utilizar el transporte público como su principal modo de transporte; esto se debe a que son parte de una élite de clase media-alta que tiene el poder adquisitivo para contar con un vehículo privado. El problema recae en que ellos no utilizan con la misma frecuencia el transporte público y no conocen los problemas como aquellos usuarios que lo utilizan todos los días. Esta falta de familiaridad con las necesidades de los usuarios que diariamente se enfrentan a su ineficiencia puede resultar en un diseño lejos del óptimo.

La falta de conocimiento de soluciones alternas de transporte como BRT sigue siendo importante. El largo período entre el desarrollo del sistema en Curitiba y la realización de BRT en otras ciudades es evidencia del déficit de información. En los últimos años, el conocimiento de BRT ha aumentado considerablemente gracias a las visitas a Bogotá por parte de funcionarios de ciudades de África y Asia que han fomentado nuevos proyectos de BRT. Sin embargo, muchas ciudades aún no cuentan con información básica para comprender el potencial del BRT.

Finalmente, las condiciones locales, como factores urbanos, geográficos y topográficos, pueden fungir como barreras para la implementación de BRT. Un claro ejemplo son los montes o colinas empinadas y las avenidas o calles extremadamente estrechas que al momento de evaluar el

proyecto, representan desafíos importantes de diseño. Sin embargo, siempre existen soluciones técnicas para cada uno de estos problemas.

4.4 Sistemas BRT en México

En la actualidad, los sistemas BRT en México han mostrado un alto grado de eficiencia alcanzado a partir de dos aspectos: por un lado, hoy en día se vive un proceso de expansión de corredores BRT en nuestro país, proyectos que han tomado relevancia en las agendas gubernamentales como una solución ante las fallas de la movilidad en las principales áreas metropolitanas del país y que han sentado un precedente para eliminar el modelo hombre-camión y la transformación urbana; por otro lado, hay una necesidad apremiante de garantizar el cumplimiento de las principales prioridades de los usuarios en sus viajes diarios que son: rapidez, comodidad, seguridad y economía (Zamudio, Alvarado, 2015).

Lamentablemente, al no tener la capacidad de atender el constante incremento de la tasa de ocupación (demanda), los sistemas BRT han sido víctimas de su propio éxito, ocasionando niveles de eficiencia bajos e incluso colapsos en las famosas horas pico.

4.4.1 Sistemas BRT existentes en el país

Dentro del territorio nacional, el sistema de autobús de tránsito rápido ha crecido mucho en los últimos años. Podemos encontrar sistemas en funcionamiento, otros tantos en etapas de construcción o planeación y algunos que han sido cancelados o están detenidos. A continuación, en la Tabla 4.2, se citan todos los sistemas que se encuentran en alguna de las etapas mencionadas por ciudad de la República:

CIUDAD	NOMBRE DEL BRT	ETAPA
Acapulco	Acabús	En funcionamiento
Chihuahua	MetroBús Chihuahua	En funcionamiento
Ciudad Juárez	ViveBús Cd. Juárez	En funcionamiento
CDMX	Metrobús	En funcionamiento
Comarca Lagunera	Metrobús Laguna	En construcción
Cuernavaca	Morebús	Cancelado
Edo. De México	Mexibús	En funcionamiento
Guadalajara	MacroBús	En planeación
León	Optibús	En funcionamiento
Mexicali	Línea Expres 1	Detenido
Monterrey	TransMetro y Ecovía	En funcionamiento

CIUDAD	NOMBRE DEL BRT	ETAPA
Oaxaca	SIT Oaxaca	Detenido
Pachuca	Tuzobús	En funcionamiento
Puebla	RUTA	En funcionamiento
Querétaro	Qrobús	En funcionamiento
San Luis Potosí	Metrobús	En construcción
Tampico	Metrobús	En construcción
Tijuana	SITT	En funcionamiento
Tuxtla Gutiérrez	Conejobus	En funcionamiento
Villahermosa	Transbus	En funcionamiento
Xalapa	Metrobús	En planeación

Tabla 4.2: Sistemas BRT existentes en el país.

Fuente: Autobús de Tránsito Rápido, México.

4.4.2 Evaluación de los sistemas BRT

La evaluación que se presenta a continuación fue desarrollada por los Ingenieros en Transporte Daniel Zamudio y Víctor Alvarado basándose en las principales necesidades de los usuarios de transporte público considerando los criterios de calidad definidos por la *Guía de Planificación de*

Sistemas BRT publicada por la Agencia de Cooperación Técnica Alemana en 2010. Con el nombre Ranking Nacional de los sistemas BRT, se realizó la evaluación técnica de 8 sistemas BRT, desde el punto de vista de los usuarios. El objetivo fue evaluar el nivel de cumplimiento y eficiencia de los sistemas Metrobús CDMX y Chihuahua, Optibus, ViveBus, Ecovía, Macrobus, Mexibus y RUTA, así como de las líneas que los integran.

La evaluación consistió en 15 rubros con un total de 100 puntos y se llevó a cabo en horarios de máxima demanda y horas valle.

1. Integración tarifaria (15 puntos): Capacidad que tienen los sistemas BRT para ofrecer una tarifa diferida entre rutas troncales y diversos modos de transporte a través de la implementación de un control de peaje y tarjetas inteligentes, lo cual permite al usuario lograr una mayor economía, comodidad y flexibilidad.
2. Nivel de servicio en terminales y estaciones (3 puntos): Saturación o espaciamiento entre usuarios, el cual permite o impide un flujo adecuado dentro de las estaciones.
3. Nivel de servicio dentro de los autobuses (9 puntos): Saturación o espaciamiento adecuado entre usuarios, para el ascenso y descenso de autobuses durante su viaje.
4. Información al usuario (5 puntos): Datos convenientes y precisos sobre su operación.
5. Profesionalización del sistema (8 puntos): Los sistemas BRT deben fomentar un ambiente positivo y agradable durante la experiencia de viaje de los usuarios.
6. Confort dentro del sistema (5 puntos): Satisfacción que puede experimentar el usuario durante su viaje. El confort está integrado por: asientos de espera en estaciones, bebederos, wifi, aire acondicionado dentro de la unidad y las estaciones, ergonomía en asientos y servicio público de sanitarios.
7. Integración modal (6 puntos): Se refiere a la conexión que existe entre el BRT y otros modos de transporte público para que el usuario realice sus transbordos.
8. Infraestructura de integración modal (6 puntos): Aquellos elementos necesarios para que el usuario realice sus transbordos con otros modos de transporte público con seguridad, comodidad y accesibilidad.
9. Seguridad vial (6 puntos): Es la protección al usuario en sus desplazamientos mediante las adecuaciones del entorno (calles, avenidas y cruces viales).
10. Seguridad personal (6 puntos): Resguardo y protección al usuario durante su viaje, así como al momento de realizar transbordos.
11. Espacio público (6 puntos): Capacidad del sistema para lograr un ordenamiento y mejoramiento de la imagen urbana fomentando la cultura ambiental y de convivencia.

Ejemplos: arborización, iluminación, banquetas, vías exclusivas para circulación de peatones y ciclistas, áreas deportivas, recreativas y culturales.

12. Tecnología en autobuses (5 puntos): Desempeño ambiental que pueden ofrecer los autobuses para minimizar las emisiones contaminantes. Se recomiendan altos estándares tecnológicos vehiculares: mayores a EURO V, gas natural e híbrido.
13. Velocidad promedio de operación (9 puntos): Es aquella que se registra de terminal a terminal en una ruta BRT, la cual incluye tiempos de paradas así como las demoras por imprevistos en el tránsito. Las mejores prácticas internacionales recomiendan una velocidad promedio de 25 km/h.
14. Frecuencia de paso por hora (6 puntos): Se refiere al número de autobuses que pasan por una estación durante una hora. Se recomienda una frecuencia de paso de 5 minutos (este tiempo se puede ajustar dependiendo de la demanda de los corredores).
15. Monitoreo del servicio (5 puntos): Existencia de un centro de control que pueda monitorear en tiempo real la operación del sistema, respaldado a través de una eficiente programación de servicio.

Al evaluar cada rubro de los ocho sistemas a partir de la opinión de los usuarios, se obtuvieron los siguientes porcentajes que se muestran en la Tabla 4.3.

Concepto	Metrobús	Macrobús	Eoovia	Maxibús	RUTA	Vivebús Chihuahua	Optibús	Vivebús Cd. Juárez
Integración tarifaria	3%	67%	50%	17%	83%	67%	93%	17%
Nivel de servicio en terminales y estaciones*	95%	97%	97%	98%	96%	92%	95%	93%
Nivel de servicio dentro de los autobuses*	71%	72%	76%	66%	73%	56%	85%	68%
Información al usuario	98%	60%	65%	60%	55%	50%	50%	50%
Profesionalización del sistema	84%	63%	28%	71%	67%	47%	74%	28%
Confort dentro del sistema	83%	76%	96%	60%	49%	86%	46%	50%
Integración modal	85%	83%	67%	76%	77%	75%	100%	42%
Infraestructura de integración modal	57%	100%	83%	68%	77%	75%	100%	33%
Seguridad vial	92%	83%	97%	84%	90%	97%	75%	75%
Seguridad personal	92%	92%	92%	69%	71%	75%	80%	67%
Espacio público	62%	55%	50%	44%	33%	42%	77%	25%
Tecnología en autobuses	84%	60%	60%	80%	70%	60%	0%	60%
Velocidad promedio de operación*	49%	100%	78%	93%	44%	44%	47%	78%
Frecuencia de paso por hora	70%	33%	8%	56%	50%	67%	12%	17%
Monitoreo del servicio	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%
	77%	76%	69.8%	69.4%	69%	68.7%	67.6%	50.1%

Tabla 4.3: Tabla resumen de los resultados de evaluación de los sistemas BRT en México.

Fuente: Autobús de Transito Rápido, México.

Evaluando cada línea de cada sistema, las línea 1 y 5 del Metrobús de la Ciudad de México y la línea 1 del Macrobus obtuvieron las primeras tres posiciones, respectivamente. Así lo muestra la Tabla 4.4.

Lugar	Corredor	Ciudad	Porcentaje de cumplimiento %
1°	Metrobús Línea 5	D.F.	83.8
2°	Metrobús Línea 1	D.F.	78
3°	Macrobus Línea 1	Guadalajara	76
4°	Metrobús Línea 3	D.F.	75.8
5°	Mexibus Línea 1	Estado de México	75.2
6°	Metrobús Línea 2	D.F.	75
7°	RUTA 2	Puebla	72.6
8°	Metrobús Línea 4	D.F.	72.5
9°	Optibus Línea 1	León	69.9
10°	Ecovia	Monterrey	69.8

Tabla 4.4: Mejores 10 líneas de sistema BRT en México.
Fuente: Zamudio, Alvarado, 2015.

Como conclusión de la evaluación, se tiene que los tres sistemas BRT que mejor atienden las necesidades de los usuarios fueron: Metrobús de la Ciudad de México con un puntaje de 77 puntos (77%), Macrobus de Guadalajara (76%) y Ecovia de Monterrey (69.8%). Sin embargo, es importante mencionar que los 8 sistemas aún no alcanzan su nivel de cumplimiento óptimo, debido a deficiencias que van desde el diseño y la construcción de las líneas hasta la operación y mantenimiento de las mismas. En general, las deficiencias identificadas en la mayoría de los sistemas BRT (cada uno en distinto grado) fueron: ausencia de integración tarifaria, deficiencias en la frecuencia del servicio, baja velocidad y pérdida de confort, así como falta de personal que contribuya a la seguridad personal y seguridad vial a lo largo de los distintos corredores.

4.5 Los estándares BRT

A pesar de la creciente presencia, superioridad y éxito de los sistemas BRT, mucha gente aún desconoce las características de los mejores corredores BRT y su capacidad para proveer niveles de servicio típicamente asociados a sistemas subterráneos. Son soluciones comparables, menos costosas e igual de elegantes (ITDP, 2014).

El estándar BRT, o en inglés The BRT Standard, detalla las características esenciales de los corredores BRT, y proporciona el marco común para que los diseñadores de sistemas, los tomadores de decisiones y la comunidad del transporte sustentable identifiquen e implementen corredores BRT de mejor calidad. Debido a que dichos sistemas están presentes con mayor frecuencia alrededor del mundo, estos estándares ayudan a mejorar el servicio para sus pasajeros.

El objetivo principal es otorgar certificados de oro, plata, bronce o básico a aquellos sistemas que establecen automáticamente un estándar mundial. De existir en un sistema dichos elementos, el resultado se ve reflejado en un mejor desempeño y un aumento de pasajeros en el sistema.

4.5.1 Características de clasificación de BRT Standard

The BRT Standard establece una definición “mínima” de BRT, donde exige el cumplimiento mínimo de ciertos elementos para que un corredor sea considerado BRT. Las cinco características básicas son:

- Alineación de carriles: 7 pts
- Carriles exclusivos y derecho de vía: 7 pts
- Pago de pasaje anterior al abordaje: 7 pts
- Manejo de Intersecciones: 6 pts
- Abordaje a nivel de plataforma: 6 pts

Las cuatro diferentes clasificaciones se describen en la Tabla 4.5:

Categoría	Puntos	Descripción
Oro	85 - 100	Corredores que cumplen con casi todos los aspectos de las mejores prácticas internacionales. Cuentan con el desempeño operacional y la eficiencia más alta, al tiempo que proveen un servicio de la mejor calidad.
Plata	70 - 84	Incluye la mayoría de los elementos de las mejores prácticas internacionales y probablemente tenga la suficiente demanda para que una inversión en BRT sea costo-eficiente. Tiene un gran desempeño operacional y una calidad de servicio muy buena.
Bronce	55 - 69	Sistemas que cumplen con todos los requisitos para ser nombrados BRT y son consistentes con muchas de las mejores prácticas internacionales.
Básico	18 - 55	Sistema que contiene solamente los elementos esenciales para cumplir con la definición de BRT.

Tabla 4.5: Categorías “The BRT Standard”.

Fuente: The BRT Estándar 2014, ITDP.

En la Figura 4.3 se puede observar un ejemplo ideal de un corredor BRT con su parada en el centro de la avenida, 2 carriles confinados lo que permite contar con líneas exprés que no realice paradas en todas las estaciones, 2 carriles asignados para el transporte privado, espacio suficiente de banqueta, ciclovía y espacio para el peatón.



Figura 4.3: Ejemplo de disposición ideal de BRT.

Fuente: The BRT Estándar 2014, ITDP.

4.5.2 Sistema de prioridad semafórica dentro de los estándares BRT

Aunque no existe un apartado específicamente dedicado a los sistemas de prioridad semafórico, dentro del apartado de manejo de intersecciones, si se hace mención de la priorización semafórica. Citando lo que se puede leer en la Figura 4.4, el ITDP establece que un sistema de prioridad semafórico presente en una intersección, cuando es activado por una unidad de autobús, ayuda a mejorar las condiciones del sistema. Cuando no se cuenta con dicha prioridad, se restan puntos lo cual puede llegar a afectar la certificación de un sistema BRT.

Intersection Treatments

7 points maximum

There are several ways to increase bus speeds at intersections, all of which are aimed at increasing the green-signal time for the bus lane. Forbidding turns across the bus lane and minimizing the number of traffic-signal phases where possible are the most important. Traffic-signal priority, when activated by an approaching BRT vehicle, is useful in lower-frequency systems but less effective than turn prohibitions.

BRT Basics: This is an element of BRT deemed essential to true BRT corridors.

Intersection Treatments	POINTS
All turns prohibited across the busway	7
Most turns prohibited across the busway	6
Approximately half of the turns prohibited across the busway and some signal priority	5
Some turns prohibited across the busway and signal priority at most intersections	4
Some turns prohibited across the busway and some signal priority	3
No turns prohibited across the busway but signal priority at most intersections	2
No turns prohibited across the busway but some intersections have signal priority	1
No intersection treatments	0

Figura 4.4: Manejo de Intersecciones para sistemas BRT.

Fuente: The BRT Estándar 2014, ITDP.

Sistemas Inteligentes de Transporte

5.1 ¿Qué es ITS?

Un Sistema Inteligente de Transporte o internacionalmente conocidos como ITS, acrónimo de Intelligent Transportation System, aplica las tecnologías de la información y comunicación (TIC) para apoyar y optimizar a todos los modos de transporte mediante la mejora rentable de su funcionamiento, tanto individualmente como en inter-colaboración (The ITS Policy Committee of IRF). Se busca entonces solucionar problemas de gestión de tráfico, movilidad, seguridad y medio ambiente de un sistema de transporte.

5.1.1 ¿Cuáles son sus objetivos?

Los ITS se implementan principalmente para resolver un problema, mejorar el rendimiento y proporcionar información necesaria para el mejoramiento de gestión y productividad de un sistema de transporte. Además, actúan para mejorar la eficacia, eficiencia y facilidad de uso de la oferta de servicios de transporte público en beneficio de las autoridades de transporte público, operadores y pasajeros. Dentro de las principales acciones se tiene:

- Mejora la movilidad y aumenta la seguridad.
- Ofrece información dinámica y efectiva para el usuario en tiempo real.
- Reduce el consumo de combustible y la emisión de contaminantes.
- Ayuda a la detención y atención oportuna de accidentes.
- Beneficia a los concesionarios para alcanzar un óptimo funcionamiento en su proyecto.
- Logra una operación segura y eficiente.

5.1.2 Aplicaciones de los ITS.

Sus aplicaciones han permitido resolver problemáticas y necesidades en diversas áreas del transporte otorgando nuevos beneficios a los usuarios. A continuación se exponen cinco de las áreas dentro de las cuales, la innovación a partir de los ITS, ha permitido resolver problemáticas y optimizar procesos.

5.1.2.1 Seguridad en el transporte

La seguridad es un elemento indispensable para el correcto funcionamiento del transporte y para salvaguardar la integridad de los usuarios o de los bienes transportados. Según cifras presentadas en la Asamblea General de Naciones Unidas, por parte de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el documento “*Mejoramiento de la seguridad vial en el mundo*” en el 2017, las

lesiones causadas por accidentes de tránsito constituyen la décima causa de muerte en todo el mundo, y la principal entre las personas de 15 a 29 años. Los accidentes de tráfico provocan más de 1.3 millones de muertes al año en el mundo, mientras que las lesiones no mortales oscilan entre los 20 y los 50 millones.

En el sistema carretero federal de México en el año 2017, según la SCT, se registraron 11,883 siniestros, donde participaron 19,388 vehículos. Al 4.3% de dichos siniestros (510) no se le atribuyó ninguna causa pero al restante 95.7% si: el 71.89% (11,247) es atribuido al factor humano, al estado del camino, como segundo lugar, se le atribuye el 14.37% (2,248), sigue el factor vehículo y finalmente los agentes naturales con 6.98% (1,092) y 6.76% (1,057), respectivamente. Los países han tratado de abordar, mediante la legislación, los factores de riesgo fundamentales; es decir, la velocidad, la conducción bajo los efectos del alcohol, la seguridad dentro del vehículo y el estado de las vías y los vehículos.

Con base en los datos y estadísticas de uso de transporte público en la Ciudad de México obtenidos por las plataformas SinTráfico y Moovit, el Metro registra 125 incidentes en promedio al mes, lo que equivale a casi 30 por semana. Aunque en el Metrobús el promedio mensual es menor (40.5 incidentes y 9.3 semanales), el tiempo de demora igualmente alcanza los 15 minutos en el servicio. La ruta que va de Indios Verdes a El Caminero es la línea con más incidentes. Su total es de 187, como se observa en la Figura 5.1.



Figura 5.1: Incidentes en los sistemas de transporte Metro y Metrobús.

Fuente: Moovit Insights, 2017.

Dentro de las soluciones a las necesidades mencionadas, los ITS han jugado un papel importante como en los ejemplos que se citan a continuación:

- Radares de control de velocidad de tipo sancionador: garantizan la detección y el registro de las velocidades de los usuarios.
- Estaciones meteorológicas y cámaras de explotación: Prevén las condiciones medioambientales y conocen el estado de las carreteras para notificar en tiempo real.
- Equipos de vigilancia y seguridad (CCTV).

- Detección automatizada de incidentes (DAI) mediante cámaras permite la recepción automática y simultánea al operador en turno del centro de control de alarmas.
- Ubicación automática del vehículo (AVL): identifica cierto tipo de vehículo para poder realizar el trazo de su recorrido y poder identificarlo.

5.1.2.2 Contaminación del sector transporte

En el 2012, el Panel Intergubernamental de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (IPCC) subrayó que en México el sector transporte generó el 39% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas a la producción y uso de la energía. Dentro del sector, el autotransporte ocupa el primer lugar con un valor del 59%, es decir, 23% de las emisiones del país o 152,891.01 (Gg de CO₂e) al año (Alvarado, 2018). Además, en algunas zonas del Valle de México, las emisiones generadas por vehículos, representan hasta un 60% de la contaminación total por partículas suspendidas gruesas (PM-10), y lo más grave es que, de acuerdo a la OMS, cada año mueren en nuestro país 14,700 personas a causa de enfermedades asociadas a la contaminación del aire.

Dentro de las causas que contribuyen a dicho problema está el rechazo al uso del transporte público, lo que aumenta significativamente la generación de CO₂ por persona transportada. Esto se debe en gran medida a que, en la mayoría de países de Latinoamérica, cada día es más asequible tener un vehículo propio; pero también por el gran número de vehículos antiguos y poco eficientes que generan gran congestión vehicular y mayor cantidad de contaminantes.

Como se observa en la Figura 5.2, la contribución de América Latina a los GEI por la quema de combustibles fósiles es baja respecto a otros países. Sin embargo, en términos de emisiones per cápita, para los países del OECD (Organización para la Cooperación Económica y de Desarrollo) el 28 % de las emisiones CO₂/cápita vienen del transporte, mientras que para Latinoamérica este valor es del 35 %; por lo tanto, América Latina posee mayores emisiones per cápita que los países desarrollados.

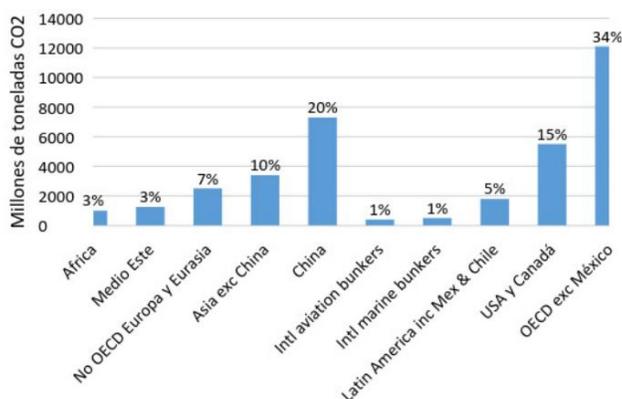


Figura 5.2: Emisiones de GEI originadas de la quema de combustibles.

Fuente: Agencia Internacional de Energía (IEA), 2011

Debido a la gran variación que existe entre el factor de ocupación, el rendimiento y la distancia recorrida entre los modos de transporte, la unidad utilizada para poder comparar las emisiones generadas de cada uno es el gramo de dióxido de carbono por kilómetro recorrido por pasajero (gCO₂/pas-km). Ejemplificando el consumo en diésel de los autobuses articulados BRT en la CDMX, estos tienen un rendimiento de 1.1 km/l en 2015 (INE, 2007), un factor de ocupación de 160 pasajeros y un recorrido diario de 280 km/día (Power Mex, 2013).

La Figura 5.3 muestra los valores de gCO₂/pas-km por modo de transporte.

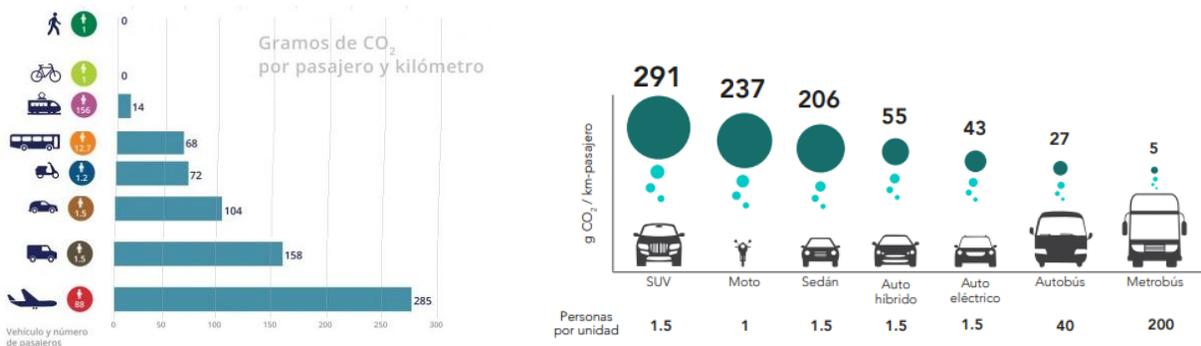


Figura 5.3: a) Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA, 2018).

b) Emisiones de CO₂ por tipo de vehículo y capacidad transportada. (Inventario de Emisiones CDMX, 2016).

Dentro del capítulo cuarto se explicó el funcionamiento y los beneficios del modo de transporte BRT y se mencionó que, dentro de la República Mexicana, ha tenido un aumento considerable debido a su buen rendimiento a un bajo costo. Ahora se expone, con el apoyo del estudio *Corredores de transporte público: una acción para reducir CO₂ dentro de la ZMVM* presentado por El Poder del Consumidor en el 2018, las emisiones de CO₂ por dicho modo de transporte comparadas con el automóvil. Los usuarios de BRT que dejaron de usar su automóvil, presentan una reducción de sus emisiones de CO₂ del 95%. Esto se debe a que por cada usuario transportado en un kilómetro de BRT se emiten 12.3 gCO₂, en tanto si lo hace en su automóvil el valor aumenta a 261 gCO₂/km. Los microbuses generan 28.2 gCO₂/pas-km.

Por último, los usuarios de BRT que dejaron de usar su automóvil y por cada servicio que hagan dentro del periodo de “hora pico” se puede reducir por lo menos 149,255 kg de CO₂ anuales – valor que aumenta conforme al número de servicios que se puedan hacer en este periodo. Además, logran el retiro de 141 automóviles particulares con una ocupación de 1.5 personas, el equivalente a la recuperación del espacio vial del 92% por cada servicio que se haga a lo largo de este horario.

La problemática de los contaminantes generados en el sector transporte debe solucionarse o disminuirse; se estima que, del 2010 al 2050, las emisiones del sector del autotransporte crecerán 370%, de 146 a 682 Tg de CO₂ (millones de toneladas de CO₂). En 2050, 80% de las emisiones del autotransporte provendrán de la quema de gasolina, 19% del diésel y 1% del GLP

(Sheinbaum *et al.*, 2016). Los ITS han ayudado en cierta medida a mitigar el impacto ambiental mediante la implementación de sistemas principalmente en el transporte público, que se citan a continuación:

- Semáforos adaptativos: capaz de manipular autónomamente las fases de los ciclos de una red de semáforos de acuerdo a las exigencias y limitaciones de la calle.
- Sistema de prioridad semafórico (TSP).

5.1.2.3 Infraestructura y espacios limitados

Estudios realizados por el Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo (ITDP México) con el respaldo de la Embajada Británica en México demuestran un incremento del uso del automóvil en los últimos años como resultado de políticas públicas federales implícitas que lo incentivan: subsidio a la gasolina, al impuesto a la tenencia, así como la prioridad del gasto público en infraestructura vial para el transporte privado. Ésta última requiere de especial atención, pues al enfocarse en crear infraestructura para el automóvil, se deja de lado el ordenamiento, mejoramiento y ampliación de la oferta de transporte público y no motorizado (Medina, 2012). ITDP asegura que contar con estacionamiento en el origen y destino de un viaje, incentiva el uso del automóvil lo cual es contraproducente en zonas céntricas donde hay una oferta importante de transporte público masivo.

En el artículo “*Invertir para movernos*”, publicado por ITDP en 2015, queda demostrado que en las principales Zonas Metropolitanas del país se destina, en promedio, 77% de presupuesto de movilidad a infraestructura vial para el automóvil cuando sólo alrededor del 30% de los viajes se realizan en automóvil particular.

Para resolver los problemas del transporte urbano se debe incentivar la inversión en la oferta de nueva infraestructura de transporte público y optimizar el uso del espacio existente en la vía pública en vez de crear nueva. En la secuencia de imágenes de la Figura 5.4 se puede observar el problema respecto al uso ineficiente del área pública destinada al transporte con dos cientos usuarios que utilizan diferentes modos de transporte. Mientras que la gente opte por usar su vehículo propio, el cual transporta en promedio 1.5 pasajeros cuando su capacidad máxima es de 5, como es el caso de la primera imagen, esto implica que la congestión vehicular va a ser importante, disminuyendo la velocidad de traslado, aumentando así el tiempo de viaje con un mayor costo de vehículo por pasajero transportado, provocando estrés en los pasajeros, un gasto excesivo de combustible y contaminación del aire; pero mientras la gente opte por otros modos de transporte como camiones, metro o bicicleta, el espacio ocupado por el transporte privado se ve reducido significativamente y disminuye con esto la congestión y el embotellamiento. Así se facilita el tránsito peatonal y el acondicionamiento de ciclistas que garantiza la preferencia del usuario por un modo de transporte masivo en lugar de sus vehículos propios. Como datos adicionales, se sabe que un coche parado ocupa un área aproximada de 20 m² mientras que a una

velocidad de 50 km/h, el espacio aumenta a 140 m². Una bicicleta andando a 15 km/h ocupa 5 m² mientras que estacionada ocupa tan solo 2 m².

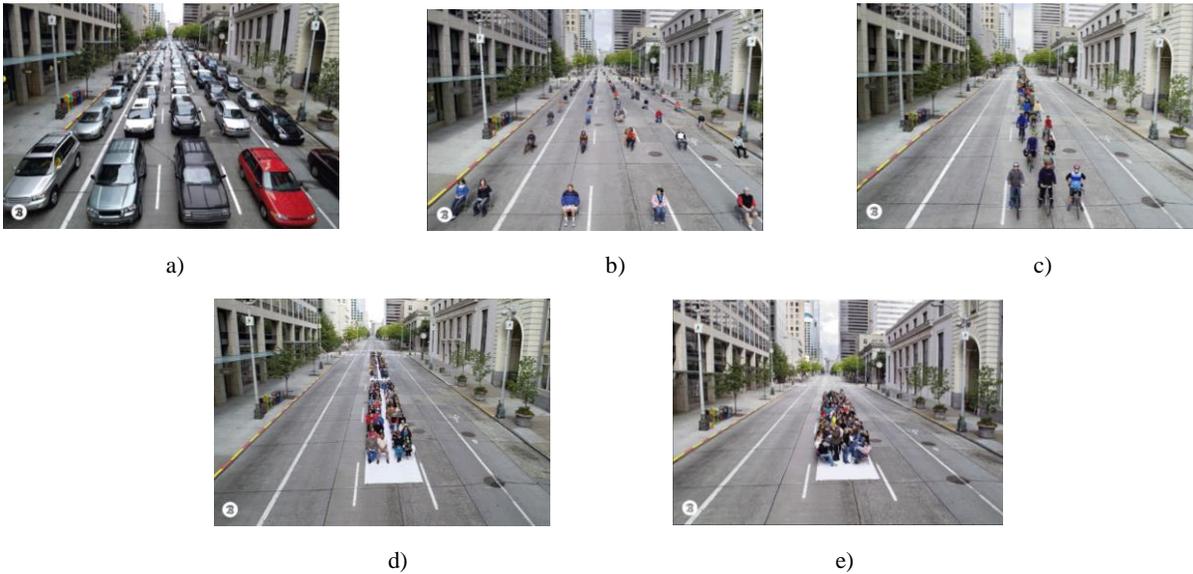


Figura 5.4: Espacio que ocupan 200 personas en a) 133 automóviles, b) sin automóviles, c) 200 bicicletas, d) 3 camiones y e) 1 vagón de metro.

Fuente: International Sustainable Solutions, 2015.

El problema de crear nueva infraestructura vial expansiva, cuando la falta de espacio es evidente, en vez de priorizar el uso del transporte público o el uso de la bicicleta es algo que concierne en su mayoría a las políticas públicas del país. Pero en ciertos casos, el uso de los ITS ha permitido beneficiar al usuario, para que no se vea tan afectado, mientras se logra dicha transición, entre ellos:

- Detectores: permiten obtener una cifra exacta del número de vehículos que se encuentran circulando sobre cierta vía y la velocidad a la que lo hace.
- Sistemas inteligentes para estacionar y tomar bicicletas a base de módulos prefabricados.
- Contadores automáticos de pasajeros (APC).

5.1.2.4 Tiempos de viaje

El tiempo que destinan los usuarios para realizar sus actividades diarias incluye muchas veces un alto porcentaje del denominado “tiempo muerto”; aquel que el usuario pierde esperando el modo de transporte o cuando el usuario se encuentra en alto total en su propio vehículo. El tiempo muerto se traduce directamente en una pérdida económica en horas-hombre. Las principales causas de que los tiempos de traslados sean mayores a lo que deberían son el congestionamiento, la deficiente operación de los vehículos de transporte público, la mala operación y/o programación de los semáforos, entre otras.

El Instituto de Ingeniería de la UNAM trabajó en la Encuesta Origen-Destino 2017 la cual fue realizada por el INEGI, en colaboración con los gobiernos de la CDMX y del Estado de México y la participación de los hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). La encuesta permitió conocer la movilidad cotidiana de sus habitantes y las características de los viajes que realizan. La Figura 5.5 muestra que de los viajes realizados para ir al trabajo, el 36.6% duran hasta media hora; el 58.1% tardan de 31 minutos hasta 2 horas y, en el 5.3% de los casos, emplean más de 2 horas. Para regresar al hogar, el 55 % de los viajes duran menos de 30 minutos; el 40.7% tardan de 31 minutos hasta 2 horas, y el 3.8% se prolongan por más de 2 horas.

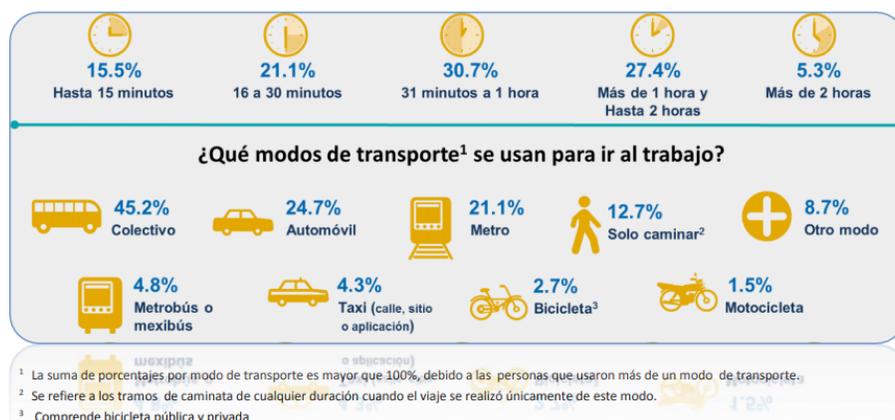


Figura 5.5: ¿Cuánto tiempo duran los viajes que se realizan para llegar al trabajo en la ZMVM?
 Fuente: INEGI. Encuesta Origen-Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México 2017.

Por otra parte, el tiempo perdido en los viajes también tiene otras componentes como la búsqueda de un lugar de estacionamiento. El ITDP reveló que el 30% del tráfico generado en la Ciudad de México se debe a que los conductores tardan entre 15 y 20 minutos dando vueltas para encontrar un lugar para estacionarse y gastan hasta 55,350 pesos mexicanos por conductor al año para el pago de parquímetros, estacionamientos, pensiones y valet parking.

Algunas de las aplicaciones de los ITS dentro de los tiempos de viaje son las siguientes:

- Aplicaciones: mapean e integran una gran cantidad de datos para que sus usuarios accedan a ellas de manera sencilla y se enteren en tiempo real de fallas, accidentes o demoras de los diferentes modos de transporte público.
- Pago de tarifa electrónico (EFP): reduce el tiempo que se emplea en realizar un viaje.
- Sistema de identificación de estacionamiento: a base de sensores colocados en los postes de luz de la calle, mismos que con ayuda de un radar podrán informar sobre la disponibilidad de los cajones para estacionarse.

5.1.3 Taxonomía de los Sistemas Inteligentes de Transporte

La taxonomía de los Sistemas Inteligentes de Transporte es muy amplia y se divide esencialmente en seis áreas:

- Sistemas Avanzados de Información al Viajero (ATIS – Advanced Traveler Information Systems) proporcionan información en tiempo real al usuario para que pueda decidir antes y después de su viaje.
- Sistemas Avanzados de Gestión de Tráfico (ATMS – Advanced Traffic Management Systems) monitorean y administran el tránsito y su infraestructura para reducir la congestión mediante semaforización inteligente o vial reversibles entre otras.
- Sistemas Avanzados de Transporte Público (APTS – Advanced Public Transportation Systems) incrementan la eficiencia y la seguridad de los sistemas de transporte público y ofrecen a los usuarios un mayor acceso a la información en las operaciones del sistema.
- Operaciones de Vehículos Comerciales (CVO – Commercial Vehicle Operations) abordan las necesidades especiales de vehículos de carretera comercial.
- Sistemas Avanzados de Control de Vehículos (AVCS – Advanced Vehicle Control Systems) ayudan a controlar los vehículos en situaciones de emergencia.
- Sistemas Avanzados de Transporte Rural (ARTS – Advanced Rural Transportation Systems) incluyen las necesidades especiales de los sistemas rurales e incluyen notificación y respuesta de emergencia.

5.1.3.1 Sistema de prioridad semafórica para el transporte público dentro de los ITS

Dentro de los ITS, el área de Sistemas Avanzados de Transporte Público se emplea por parte de los proveedores de servicio de transporte para proporcionar:

- Al cliente: información, rutas, horarios y accesos convenientes.
- Eficiencia/Productividad: menores costos de operación y mantenimiento y mejores tiempos de viaje.
- Optimización de la gestión del sistema: planificación, supervisión, asistencia al operador y procesos administrativos.
- Seguridad y protección: controles, vigilancia, comunicación y emergencias.

Ahora bien, dentro de APTS, existen diversos subsistemas con sus aplicaciones que cumplen con los cuatro aspectos fundamentales anteriormente descritos, donde el sistema de prioridad semafórica para el transporte público (TSP – Transit Signal Priority), en lo que este trabajo se va a enfocar de ahora en adelante, está presente.

CAPÍTULO VI

Sistema TSP

Es en el mejor interés de todos los usuarios del transporte mejorar el servicio de transporte público para optimizar el uso del espacio en las calles y como consecuencia, aumentar el número de personas que lo utilicen, disminuir nuestra dependencia en combustibles fósiles, y mejorar la calidad del aire. Estudios demuestran que las demoras de un autobús debido a la luz roja en intersecciones semaforizadas representan alrededor del 20% del tiempo total del viaje (Zhang, 2001).

El sistema Transit Signal Priority (TSP) hace alusión a sistemas de prioridad semafórica de transporte público en intersecciones que trabajan para incrementar la confiabilidad en los horarios de viaje del servicio de transporte público y otorgar un servicio más rápido y rentable. El sistema TSP tiene poco impacto en el tránsito general y es una forma de hacer que el transporte público sea más competitivo con el automóvil. Dicho sistema se ha implementado desde hace más de dos décadas aunque hoy en día todavía es complicado encontrar publicaciones que se enfoquen en una metodología específica para su implementación puesto que cada intersección presenta una problemática única; y es aún más complicado en países donde nunca se ha implementado el sistema, como es el caso de México.

6.1 Definición del sistema

Según la definición del *Manual de Planeación e Implementación de TSP 2005* del Departamento de Transporte de los Estados Unidos, TSP es una estrategia operativa que facilita y prioriza el movimiento de vehículos de transporte público, generalmente aquellos en servicio, como pueden ser autobuses o trolebuses, a través de la señalización controlada por semáforos en las intersecciones.

Dentro de la arquitectura de los sistemas TSP, es normal encontrar la interacción de cuatro elementos principales como se pueden observar en la Figura 6.1. Dos de ellos son partes físicas: el vehículo de transporte público que para nuestro caso de estudio lo vamos a denominar autobús y el control del tráfico. Las otras dos partes son conceptuales: la gestión de la flota del transporte público y la gestión del control del tráfico.

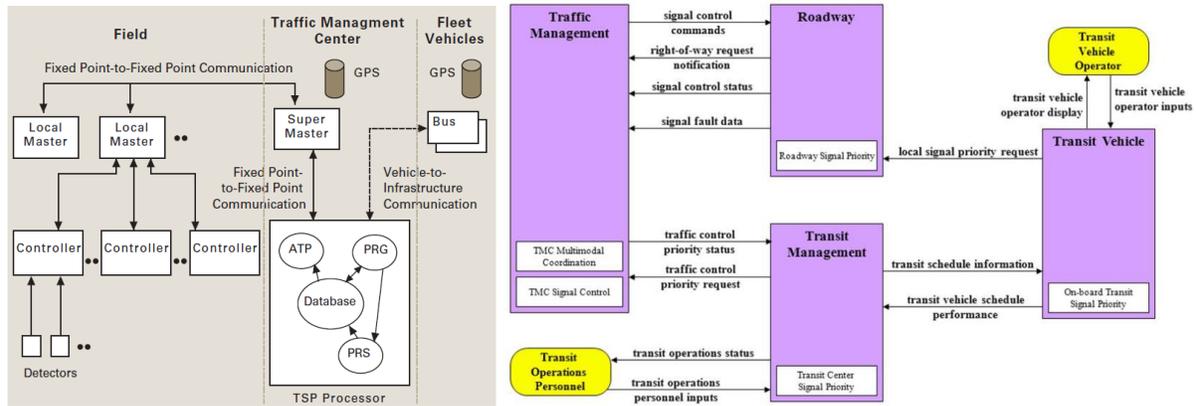


Figura 6.1: Arquitectura general de un TSP.

Fuente: a) Departamento de Transporte de EUA, Manual TSP 2005. b) CONOPS Kimley Horn, 2017

Estos cuatro subsistemas se ven mejorados con cuatro aplicaciones funcionales: detección de vehículos, generación de solicitud de prioridad (PRG), servidor de solicitud de prioridad (PRS) y control de TSP. Dentro del apartado del funcionamiento del sistema, se detalla cada parte.

6.1.1 ¿Prioridad o derecho preferente?

Antes de abordar completamente el tema de su funcionamiento, se deben definir los términos prioridad y preferencia (derecho preferente) puesto que se emplean normalmente como sinónimos debido a que ambos ocupan equipos similares y su operación es parecida pero en realidad se refieren a procesos diferentes.

El Protocolo Nacional de Comunicaciones de Transporte para Sistemas de Transporte Inteligente (NTCIP) define ambos conceptos de la siguiente manera:

Cuando se *modifica* el proceso de operación normal del semáforo con el fin de obtener un mejor acomodamiento de los vehículos de transporte público nos estamos refiriendo a prioridad. Pero cuando se *interrumpe* el proceso de operación normal del semáforo en la presencia de eventos especiales con una necesidad alta de prioridad (aproximación de vehículos de emergencia o de un tren en un paso de vía) nos referimos entonces al derecho preferente.

Como lo ejemplifica la Figura 6.2, el derecho preferente se emplea principalmente en intersecciones para vehículos de emergencia donde se garantiza un alto grado de prioridad por razones de seguridad y rendimiento. Se busca reducir el tiempo de respuesta a emergencias, reducir los accidentes que involucran dichos vehículos, mejorar la seguridad y disminuir los niveles de estrés del personal de vehículos de emergencia. Cuando se interrumpe una señal del semáforo, no se toma en consideración mantener los tiempos del plan de señalización existentes.

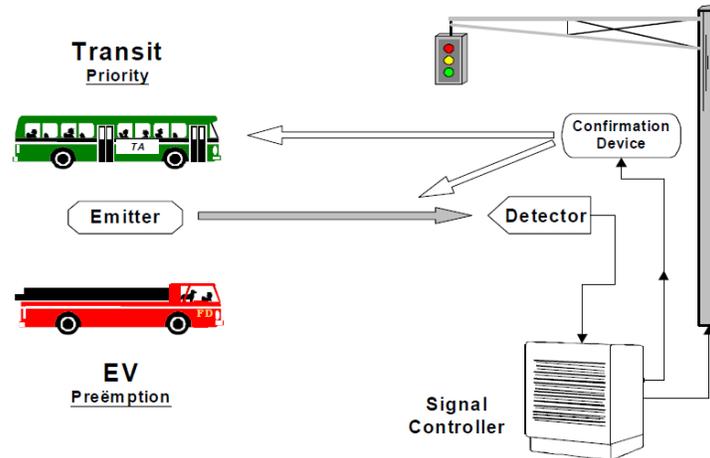


Figura 6.2: Ejemplificación de la prioridad y el derecho preferente de tránsito.

Fuente: Departamento de Transporte de EUA, Manual TSP 2005.

6.1.2 Sistema de detección de vehículos

Los detectores o sistemas de detección de vehículos son una parte importante del sistema; es necesario que el sistema pueda diferenciar los vehículos de transporte público del resto del tráfico, por lo tanto, una de las claves para que un sistema TSP sea exitoso es la detección precisa de unidades de transporte público y el transferir la información al controlador en tiempo real.

La selección del sistema de detección es un proceso bastante complejo que requiere una planificación y un diseño detallado para poder determinar que tipo de sistema de detección satisface mejor los objetivos de un proyecto. La precisión de los detectores puede verse afectada por una serie de factores, incluidas las condiciones ambientales, los objetos circundantes y la colocación del detector. La selección del detector se debe hacer en paralelo con la selección del software de priorización semafórica.

Los sistemas de detección más comunes son los siguientes:

- Detección de bucle cableado (*Hard-wired Loop Detection*)

Consiste en un transpondedor colocado en la parte inferior del vehículo, codificado con números de identificación únicos para la identificación automática de vehículos, y un receptor de detección de vehículo que se integra con el controlador de señal. El transpondedor es detectado por un alambre en forma de lazo incrustado en el pavimento a través de una ranura. Su principal limitación es su adecuada colocación en el pavimento; los detectores de bucle son propensos a fallar debido a la flexión del pavimento o pueden ser cortados durante las actividades de repavimentación.

- Detección basada en luz (infrarroja) (*Light-Based (infrared) Detection*)

El sistema generalmente consta de tres componentes principales: (1) un emisor de luz ubicado en el vehículo de transporte público, (2) detectores infrarrojos ubicados en cada intersección y (3) una interfaz de "selector de fase" que transmite el mensaje al controlador. El emisor de luz generalmente se encuentra en la parte superior delantera y puede ser activado manualmente por el conductor o automáticamente. Cuando está activado, el emisor envía una señal infrarroja al detector, ubicado en el semáforo en la intersección; la señal enviada puede contener un número de identificación que puede configurarse como único para cada vehículo (o clase de vehículos) para que la agencia de gestión de transporte público pueda rastrear la ubicación y la progresión de cada vehículo. El detector de infrarrojos recibe la señal y la manda al "selector de fase", donde la solicitud de prioridad se valida y se envía al controlador de señal. La detección de salida o "check-out" se logra cuando la luz infrarroja del vehículo ya no puede ser detectada en la intersección. Su principal desventaja es la tecnología basada en luz, que requiere una línea de visión entre el vehículo y el detector; su funcionamiento puede verse obstaculizado por la geometría de la calzada, problemas climáticos y obstrucciones, como el follaje de los árboles.

- Detección basada en sonido/ondas de sonido digital (*Sound-Based/Digital Sound Wave Detection*)

Consiste en un micrófono o un detector de ondas de sonido direccionado ubicado en la intersección, una interfaz de "selector de fase" que transmite la señal al controlador y una luz de confirmación visual opcional. El sistema detecta las sirenas o las ondas de sonido de los vehículos con una cierta frecuencia, un período y un rango ajustables. La gran ventaja está dirigida para vehículos de emergencia, los cuales ya cuentan con los equipos necesarios instalados como son las sirenas; además la visibilidad no es un problema. La gran desventaja es la posibilidad de falsas alarmas de edificios u otros automóviles.

- Detección basada en radio (*Radio-Based Detection*)

Se compone de transpondedores de radiofrecuencia (RF) instalados en los vehículos y de lectores de etiquetas RF instalados en las intersecciones semaforizadas. El sistema de lector de etiquetas está conectado al controlador de señal mediante un conector RS-232. No cuenta con problemas de visibilidad pero una desventaja es encontrar la ubicación ideal del lector de radiofrecuencia.

- Detección basada en GPS (*GPS-Based Detection*)

Consiste en dos componentes principales: la unidad a bordo del vehículo con una computadora que constantemente actualiza la ubicación del vehículo utilizando un sistema AVL basado en GPS y la unidad localizada en el controlador de la intersección quien evalúa y discrimina los mensajes de prioridad entrantes basándose en el número de vehículo en ruta, la distancia del vehículo, niveles de prioridad, etc. Su ventaja principal es avisar inmediatamente al controlador cuando el vehículo ha dejado atrás la intersección.

- Detección por presión

Se ubican por debajo del pavimento, con la parte superior a nivel del mismo. Con la presión ejercida por las llantas del vehículo se cierra un circuito, que registra la presión de un vehículo.

6.1.3 Su funcionamiento

Los pasos generales cuando se otorga prioridad a una unidad de transporte público se pueden observar en la Figura 6.3 y son los siguientes:

- a) El vehículo de transporte público que se aproxima es detectado en un cierto punto situado antes de la intersección semaforizada por alguno de los diferentes métodos de detección. El sistema de detección alimenta al sistema con datos del vehículo que solicita prioridad como por ejemplo su ubicación, su hora de llegada, su aproximación, etc.
- b) Se le notifica al generador de solicitud de prioridad la aproximación del autobús quien alerta inmediatamente al sistema de control que dicho autobús está solicitando prioridad. El sistema procesa la solicitud y basándose en las condiciones actuales del sistema, decide si otorgar y como otorgar la prioridad basado en las estrategias de control de prioridad ya programadas. Cuando se aprueba la solicitud, el controlador inicia el proceso para otorgar prioridad mediante una de las estrategias. Normalmente se emplea la extensión de luz verde cuando el semáforo está en luz verde; en caso contrario, se acorta el tiempo de señal de la luz verde de la calle perpendicular, es decir que se trunca el tiempo de la luz roja para que el autobús pueda pasar por la intersección sin necesidad de detenerse.
- c) Cuando el autobús ha pasado, este es detectado en un punto situado normalmente en el centro de la intersección, o a una cierta distancia después de la misma. Se establece entonces una comunicación con el controlador de tráfico notificando que el autobús ha dejado atrás la intersección.
- d) Después de recibir satisfactoriamente el mensaje de despeje de intersección, el controlador restaura el ciclo normal del semáforo mediante una lógica predeterminada. El controlador cuenta con la gestión de control de tráfico, pudiendo recopilar datos, registrar eventos y generar informes del sistema.

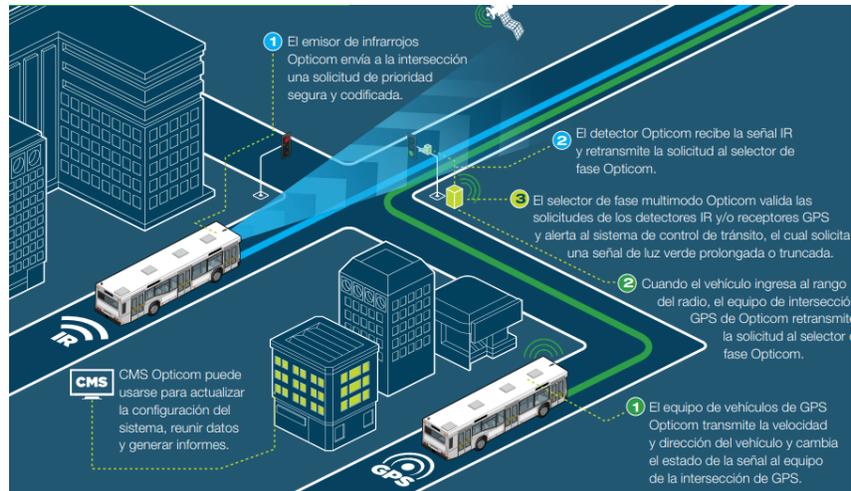


Figura 6.3: Funcionamiento del sistema TSP.
Fuente: Opticom, Global Traffic Technologies, 2016.

6.2 Objetivos

Dentro de sus principales objetivos, los sistemas TSP incluyen:

- Disminuir el tiempo de viaje reduciendo el tiempo de permanencia en intersecciones.
- Mejorar la puntualidad de horarios de servicio del transporte público.
- Reducir la variabilidad de los horarios del servicio de transporte público.
- Mejorar la confiabilidad del transporte público.
- Reducir la demora del usuario.
- Transportar una mayor cantidad de usuarios con un menor número de unidades.

Al conjunto de cada objetivo mencionado también se le conoce como Medidas de Efectividad (MOE), que sirven para evaluar al proyecto. Algunas consecuencias positivas inmediatas que surgen a partir de las MOE son, entre otras:

- Se aumenta la calidad del servicio prestado por el transporte público.
- Se incrementa el número de usuarios que utilicen el transporte público.
- Se reduce el número de autobuses de la flota.
- Se reducen las emisiones de partículas contaminantes para el aire.
- Se reduce el consumo de combustible.
- Se reducen los costos de operación del servicio.
- Se reduce el tiempo de espera en las estaciones del transporte público.
- Se mejora la movilidad en general.
- Se mejora la eficiencia en la red vial.

6.3 Estrategias de control de prioridad

6.3.1 Prioridad pasiva (Passive Priority)

Funciona de forma continua y favorece a todo vehículo de transporte público. Generalmente, cuando las operaciones del transporte público son predecibles, se conocen bien sus rutas, se conoce que el volumen de tráfico o carga de pasajeros es bajo y se conoce el horario y/o los tiempos de permanencia, las estrategias de prioridad pasiva son una forma eficiente de TSP.

Un ejemplo sencillo sería coordinar el tiempo promedio de permanencia en las intersecciones o paradas. Dado que las señales están coordinadas para el flujo de vehículos de transporte público y no para otro tipo de tránsito, el resto del tránsito puede experimentar demoras, paradas y frustraciones innecesarias. En Denver, el sistema de semáforos usa longitudes de ciclo basadas en la velocidad de viaje de los autobuses en el centro comercial “Denver Transit” para que los autobuses puedan permanecer sincronizados con las señales y para que las calles transversales puedan coordinarse en todo el centro comercial.

6.3.2 Prioridad activa (Active Priority)

Las estrategias de prioridad activa otorgan prioridad después de detectar una solicitud de prioridad y confirmar su activación. Existen diferentes estrategias de prioridad activa:

6.3.2.1 *Early Green* (Luz verde adelantada)

La estrategia *Early Green* acorta el tiempo de luz verde de la fase actual para acelerar el retorno a verde de la vía que lo solicita; es decir, trunca el tiempo de luz roja de la vía transversal cuando un vehículo equipado con el sistema TSP es detectado. Esta estrategia solo es aplicable cuando el vehículo equipado con TSP se aproxima y la fase del semáforo es roja.

6.3.2.2 *Green Extension* (Extensión de verde)

La estrategia *Green Extension* consiste, como su nombre lo indica, en extender el tiempo de luz verde en el semáforo cuando un vehículo equipado con TSP se aproxima. Esta estrategia solo aplica cuando la luz verde es la que predomina.

Ambas estrategias se pueden aplicar juntas para maximizar el tiempo dentro del ciclo. La extensión de verde es una de las formas más efectivas de TSP, ya que no requiere intervalos de espacio adicionales y permite que se beneficie un vehículo que reduce significativamente su demora en relación con la espera de una luz verde adelantada.

6.3.2.3 *Actuated Transit Phase* (Fase activada)

La estrategia *Actuated Transit Phase* solo se muestra cuando se detecta un vehículo en la intersección con un movimiento en específico. Un claro ejemplo es un carril exclusivo de giro: la fase de giro a la izquierda o a la derecha solo se activa cuando se detecta al vehículo en el carril.

6.3.2.4 Phase Insertion (Inserción de fase)

Cuando se inserta una fase que otorga prioridad dentro del ciclo del semáforo, se denomina inserción de fase. La fase solo puede insertarse cuando se detecta un vehículo y solicita prioridad para una fase en específico.

6.3.2.5 Phase Rotation (Rotación de fase)

El orden de las fases de un ciclo también puede rotarse para proporcionar prioridad. Por ejemplo, una fase de giro a la izquierda con dirección norte normalmente podría ser una fase retrasada, lo que significa que sigue la fase opuesta a través de la señal. Un autobús que busca girar a la izquierda en dirección norte que solicita prioridad y que llega a la intersección antes del inicio de la luz verde para dicho movimiento podría solicitar la fase de giro a la izquierda.

6.3.3 Adaptive/real-time Control (Adaptativa o control en tiempo real)

Las estrategias adaptativas o de control en tiempo real proporcionan prioridad al mismo tiempo que intentan optimizar determinados criterios de rendimiento. Los criterios pueden incluir la demora del usuario, la demora del vehículo de transporte público y/o una combinación de ellos. Estas estrategias continuamente están optimizando el ciclo del semáforo basado en datos observados en tiempo real. Por lo general, requieren la detección temprana de un vehículo para contar con el tiempo suficiente para ajustar las fases para proporcionar prioridad mientras minimizan los posibles impactos en el tránsito.

6.4 Recuperación del ciclo del semáforo

Es importante mencionar el papel que juega la recuperación del ciclo del semáforo, puesto que el proceso no termina cuando el vehículo deja atrás la intersección. En los casos donde la prioridad fue otorgada, la mayoría de los controladores implementan una operación de recuperación donde el ciclo vuelve a su operación de fase normal o compensa las fases que se cortaron o saltaron durante la prioridad.

En muchos casos, cuando el sistema TSP ha otorgado prioridad a un autobús, no se vuelve a conceder prioridad en la misma intersección hasta que las fases dentro del ciclo están de vuelta en sincronización. Esto suele llevar uno o dos ciclos. Algunos estudios revelan que la sincronización nunca se interrumpe porque al otorgar prioridad tan solo se toma una pequeña cantidad de segundos de la calle sin prioridad que rara vez se nota y permanece sincronizada con el corredor. Se informó también que el impacto en el flujo de calles no prioritarias fue extremadamente pequeño o imperceptible. Aunque el método de recuperación es crítico, también se ha hablado que es muy importante tener en cuenta el impacto negativo en las operaciones de tránsito después de un evento de prioridad. Esta es una de las razones por las cuales el derecho preferente no se ha implementado como una estrategia TSP.

6.5 Implementación del sistema TSP como proyecto de ingeniería

La implementación de un sistema TSP sigue una serie de pasos muy similares a la de otras tecnologías de transporte o proyectos de ingeniería. En su mayoría, los pasos abarcan la planeación, el diseño, la implementación, la operación y el mantenimiento y la evaluación.

6.5.1 Planeación

Se deben responder ciertas preguntas que van a ayudar a aclarar ciertas dudas con respecto a cómo realizar el proyecto:

¿Por qué implementar un sistema TSP?

Para responder al porqué, se debe pensar inmediatamente en los beneficios potenciales en el corredor, se debe realizar una evaluación de factibilidad con el capital con el que se cuenta y un caso de estudio potencial con análisis costo-beneficio. La necesidad de actualizar o reemplazar el software y los controladores de tráfico es un tema crítico a considerar, ya que representa el costo más significativo del proyecto. Si se puede usar el software y el equipo de control existente, los costos pueden ser inferiores a 5,000 USD por intersección, pero en caso contrario, pueden aumentar hasta 20,000 USD – 30,000 USD.

¿Quién participa?

Las principales partes que participan son las agencias de transporte público y las agencias encargadas de la operación de los semáforos (ingenieros de tránsito). La mejor manera de garantizar la implementación completa y el éxito operativo es involucrar a todas las partes desde un inicio. Muchos proyectos fracasan principalmente debido a desacuerdos entre las partes.

¿Qué se va a conseguir con su implementación?

Los cambios positivos que se producen después de implementar un sistema TSP en un corredor se cuantifican utilizando las medidas de efectividad (MOE) dentro del proyecto.

¿Dónde se va a implementar el sistema TSP?

Las partes pueden identificar lugares específicos de conflicto dentro de una vialidad y el proyecto se estructura basándose en ello. También puede suceder que se haya seleccionado a un corredor para que funcione como BRT por lo que el proyecto se enfoca en eso.

¿Cómo va a funcionar el sistema TSP?

El funcionamiento se basa desde un principio en la arquitectura del sistema para poder evaluar las alternativas de tecnologías que sean compatibles con la arquitectura seleccionada.

6.5.2 Diseño

El diseño comienza con la recopilación de datos e incluye un diseño detallado de cada intersección y en ciertos casos se emplea un modelo para correr una microsimulación previa a la etapa de implementación. Para esto se recurre al uso de softwares de simulación siendo VISSIM el más utilizado para realizar análisis más sofisticados de una situación compleja o para evaluar los impactos del corredor.

6.5.3 Implementación

Al implementar un sistema TSP se deben considerar ciertos factores que afectan esta etapa del proyecto. Los más importantes se encuentran clasificados dentro de dos categorías:

- Factores relacionados con el tránsito
 - Geometría de la vialidad: Dicta la capacidad del sistema de transporte y sus posibles formas de operación según el uso del suelo de los alrededores. Es el factor que usualmente limita la implementación del sistema.
 - Volúmenes de tránsito: Las horas pico son las que dictaminan los intervalos para evaluar al sistema y son en ellas en las que debemos enfocarnos cuando se desea obtener una reducción de costos mediante la reducción de la flota de vehículos.
 - Sistemas de tránsito: Son la base de la operación del sistema y existe una variedad de controladores según las características deseadas para operar el sistema. Las estrategias de operación permiten minimizar las demoras de los usuarios. El software y el hardware tienen la capacidad de otorgar prioridad y transferir datos en el formato deseado.
 - Demora de los usuarios: Siendo uno de los principales objetivos del sistema, comparar el tiempo de viaje del vehículo privado contra aquel del transporte público permiten cuantificar el rendimiento del sistema.
 - Peatones: Al tener el máximo grado de prioridad y poder asegurar su paso seguro en las intersecciones, el peatón restringe el tiempo disponible del sistema para otorgar prioridad a los vehículos.
 - Intersecciones adyacentes: Los impactos posibles en las calles perpendiculares a la calle que solicita prioridad deben ser examinados.
- Problemas relacionados con el transporte público
 - Tipos de sistemas de transporte público: Sistemas como BRT o transporte ferroviario ligero o pesado facilitan la implementación de TSP por tener un carril confinado.
 - Paradas: La ubicación de las paradas afecta la efectividad de la priorización al vehículo. Como ya se mencionó, las paradas de tipo Far-side optimizan los tiempos del sistema.

6.5.4 Operación y mantenimiento

La experiencia ha dejado claro que la operación y el mantenimiento del sistema no ha sido algo que represente un alto grado de dificultad. Los técnicos especializados en señalamiento agregan a la tecnología TSP un programa de mantenimiento y el personal de mantenimiento del autobús se apega de igual forma a un sistema de operación y mantenimiento. El monitoreo continuo del desempeño y la administración de un sistema TSP requiere la recolección de datos. Cuando no se presta la atención suficiente a dicho desempeño, esto representa un punto de debilidad para el sistema. En la mayoría de las ciudades, la agencia responsable de la gestión del transporte público maneja el mantenimiento de todos los equipos en el autobús, y la agencia de tránsito mantiene y opera todos los equipos en la calle y los señalamientos.

6.5.5 Evaluación

Como etapa final, se debe evaluar el impacto del sistema por varias razones. Primero, en varios de los casos de estudios, el demostrar y documentar los beneficios confirmó el mínimo impacto que existe en el tránsito general de la calle sin prioridad. Esta es una preocupación básica de todo el personal de ingeniería de tránsito, y el estudio de evaluación sirve para disipar esas preocupaciones. Si el estudio de evaluación ilustra que los beneficios son positivos y los impactos en el tránsito general son aceptables, entonces se aumenta la confianza en el sistema.

6.6 Evaluación de las estrategias de control de prioridad

La evaluación de las estrategias de control de prioridad se pueden clasificar en los siguientes dos grupos: evaluación del desempeño del tránsito y evaluación económica.

6.6.1 Evaluación del desempeño del tránsito

Al momento de medir la efectividad de la implementación de un sistema TSP, se acude a los siguientes criterios de desempeño del tráfico:

- Desempeño del autobús: tiempo y velocidad

Se evalúa el desempeño basado en la reducción del tiempo total de viaje, en la reducción de las demoras de los autobuses así como el aumento en la velocidad de los mismos.

- Seguridad del cumplimiento de los horarios del autobús

El cumplimiento en los horarios de las unidades del transporte público es una medida de fiabilidad en el servicio, la cual se mide por la puntualidad y la regularidad de las unidades (Furth & Miller, 2000).

- Desempeño del tránsito general: demoras del tránsito general y en los cruces de calles

Cuando se habla del tránsito general, se están considerando a todos los vehículos privados que pueden llegar a ser afectados por los otorgamientos de prioridad a unidades del transporte público.

- Desempeño general: demoras totales

El desempeño general puede ser estudiado en una intersección, en varias de ellas o en el sistema completo y se toman en consideración todos los vehículos que circulan por el tramo de estudio. Las demoras totales se dividen en dos: la demora del autobús y la demora por pasajero. En el primero todos los vehículos cuentan con la misma ponderación a comparación del segundo donde los autobuses, al transportar un mayor número de usuarios, cuenta con una ponderación mayor que aquella del vehículo privado.

6.6.2 Evaluación económica

Dentro de la literatura, existen autores que no consideran la evaluación económica para proyectos del tipo TSP debido a una razón principal: la dificultad inherente para convertir los resultados operacionales (por ejemplo demoras, aumento en colas etc.) a un valor monetario (Khasnabis et al., 1999). Sin embargo, hoy en día, estudios han logrado realizar dicha conversión y son los mismos programas de simulación que te arrojan dichos datos.

6.6.3 Calidad en el servicio

Para evaluar la calidad del servicio prestado por el sistema TSP en funcionamiento desde el punto de vista del usuario que utiliza diariamente el modo de transporte, se les puede encuestar para saber si mejoró, no cambió o empeoró.

La evaluación de la calidad en el servicio consistirá entonces de lo siguiente: nivel de servicio en terminales y estaciones así como dentro de los autobuses, confort dentro del sistema, velocidad promedio de operación, frecuencia de paso por hora y del monitoreo del servicio. Dichas evaluaciones se deben realizar con una frecuencia fija para no descuidar el servicio y en caso de presentarse una mala calidad en el mismo, mejorarlo.

6.7 Consideraciones para implementar un sistema TSP

6.7.1 Coordinación semafórica

Es en el mejor de los casos que los semáforos dentro del corredor se encuentren en coordinación y en comunicación con el centro de control a fin de que los tiempos de recuperación de los ciclos, al momento de otorgar prioridad en alguna intersección, no afecten el flujo de las unidades de transporte que circulan por el corredor o se interfieran entre sí dando origen a largas colas y provocando el aumento en el tiempo total del viaje, en lugar de la reducción del mismo.

6.7.2 Volúmenes vehiculares

Dentro de la Ingeniería de Tránsito, los aforos vehiculares consisten en el conteo clasificado de todo vehículo que pasa por un punto fijo imaginario establecido por el personal que lo realiza, sobre una calle, avenida o carretera. La composición vehicular permite clasificar en porcentajes a los diferentes tipos o categorías de vehículos que transitan por el punto fijado.

Al momento de implementar un sistema TSP se debe estudiar el comportamiento de los vehículos que interactúan con el corredor en estudio con la finalidad de cuantificarlos y conocer que tanto se verán beneficiados o afectados. Lo anterior involucra a todo vehículo que circula por el corredor y a aquellos que salen, se incorporan o lo cruzan, provenientes de calles o avenidas perpendiculares al corredor. Es por ello que contar con la información referente a la cantidad de vehículos que circulan por el corredor así como en las principales calles o avenidas perpendiculares más afluentes es indispensable.

Dentro de los diferentes tipos de conteos que existen y por efectos del presente trabajo se utilizan solamente los conteos en periodo pico, siendo aquellos los que contienen los periodos de mayor demanda del tránsito. El periodo de conteo no debe comprender condiciones en las que se presenten eventos especiales, a menos que se desee estudiar específicamente esa situación.

6.7.3 Volúmenes y rutas de autobuses

De la misma forma que con los volúmenes vehiculares, se debe tener el conocimiento de cuantas unidades de transporte circulan a lo largo del corredor en el periodo de conteo y su capacidad de transportar usuarios. Se debe conocer también la ruta que siguen los autobuses y si éstos están en interacción con los automóviles privados o si forman parte de un sistema BRT.

6.7.4 Ubicación de las estaciones

Cuando se planea el trayecto de una ruta de transporte público, las paradas juegan un papel importante. Existen dos tipos de paradas con sus ventajas y desventajas y dependiendo de los factores que influyen en el proceso de planeación de la ruta es que se toma la decisión de qué tipo de parada implementar. El primer tipo de paradas son aquellas ubicadas en la cercanía o casi inmediatas a la intersección (Near-Side stop) y el segundo tipo son aquellas que se ubican lejos de la intersección (Far-Side stop).

El debate sobre su ubicación ha existido desde los inicios de la implementación del sistema TSP con argumentos sólidos para cada una de ellas. Por un lado, una parada ubicada lejos de la intersección ofrece muchas ventajas en cuanto al diseño del sistema. Se ha estudiado que los autobuses que se detienen lejos de la intersección, tienen altas probabilidades de detenerse una

sola vez, eliminando la dificultad que existe para predecir con precisión la llegada del autobús a la intersección. Facilita también conflictos entre autobuses que giran a la derecha con el tránsito general y simplifica el cálculo de la extensión de verde haciendo que el "check-out" del vehículo sea más preciso, garantizando que la luz verde solo se extienda tanto como realmente sea necesario. Por otro lado, si el autobús se detiene justo antes de la intersección, existe una alta probabilidad que el autobús tenga que detenerse nuevamente en la intersección que tiene la señal de luz roja.

6.7.5 Consideraciones de los peatones

La única consideración importante que involucra a los peatones al implementar un sistema TSP es el respetar su tiempo mínimo de cruce en las intersecciones. Como se ha mencionado, después de los servicios de emergencia, los peatones tienen la máxima prioridad del derecho de tránsito, por lo que su derecho de paso va primero que el otorgamiento de prioridad semafórica a una unidad de transporte.

6.8 Simulación de un sistema TSP

En la ingeniería de tránsito la modelización y simulación son herramientas básicas para planificar y gestionar de manera óptima el comportamiento del flujo vehicular así como la infraestructura de transporte. Averill Law define simulación como una técnica para estimar las medidas de desempeño de un sistema modelado (Averill Law, 2003). Esto implica crear un modelo que se aproxime lo mejor posible al sistema del mundo real, para ser usado y crear escenarios alternativos al sistema, de forma tal, que permita evaluar e identificar los cambios presentados como las mejoras para predecir cierto aspecto del comportamiento del sistema, sin tener la necesidad de hacer experimentos en campo que puedan resultar costosos o caóticos.

Los principales softwares se clasifican según el modelo de tránsito que utilicen.

- **Modelos macroscópicos:** Son válidos para aplicaciones de gran escala donde las principales variables de interés están relacionadas con las características del flujo. Su calibración puede llevarse a cabo de manera relativamente sencilla utilizando, por ejemplo, datos de tránsito obtenidos a partir de aforadores automáticos.
- **Modelos mesoscópicos:** Presentan una aproximación intermedia entre los microscópicos y los macroscópicos en la medida en que mezclan conceptos y herramientas de ambos modelos al analizar el comportamiento de grupos de vehículos.
- **Modelos microscópicos:** Presentan la escala más pequeña para el acercamiento al análisis de los sistemas de ingeniería de tránsito. Sus variables de interés se relacionan con el comportamiento de vehículos individuales respecto a la infraestructura y a los demás vehículos en ella.

Para simular un modo de transporte público con la implementación de un sistema TSP es de gran ayuda utilizar softwares especializados en ello, los cuales ya están programados para facilitar los resultados al usuario, una vez realizada la simulación. Uno de los programas más utilizados para ello es VISSIM de la empresa alemana PTV Group (Figura 6.4).

PTV VISSIM, como software líder mundial para la simulación microscópica del tráfico, en un solo modelo permite representar a todos los usuarios de la vía pública y estudiar sus interacciones: autos, transporte de carga y cualquier tipo de transporte público, ya sea ferroviario o convencional. Para ello, los modelos de comportamiento vehicular, científicamente desarrollados y validados, proporcionan una simulación realista de todos los agentes. Como lo describe PTV Group, con VISSIM puede simularse la situación del tránsito a la perfección, tanto la comparación de operar con distintos tipos de intersecciones como el análisis de implementar medidas de prioridad al transporte público o el impacto de un distinto plan de semaforización.

Para mejorar directamente a los sistemas de transporte público, un complemento importante para aumentar su atractivo y su rentabilidad son las medidas de prioridad. Las medidas de priorización del transporte público de personas pueden englobar, entre otros, el ámbito del servicio y de los vehículos. Estos incluyen, por ejemplo, la optimización del cambio de pasajeros mediante la selección de las formas de parada adecuadas y, sobre todo, las medidas relacionadas con las rutas y la operación de intersecciones. Con los módulos VAP y VisVAP, en PTV VISSIM, se pueden simular los cambios de prioridad en semáforos a través de olas verdes, fases especiales, o de la instalación de carriles exclusivos para el tratamiento prioritario de vehículos de TP.



Figura 6.4: Software VISSIM 11.
Fuente: PTV Group.

6.9 Casos de estudio exitosos

6.9.1 Caso International Drive in Orlando, Florida.

El primer caso de estudio que se presenta se llevó a cabo en el International Drive de Orlando, Florida. El I-Drive es una ruta muy popular, comercial y turística que da servicio a una gran cantidad de tráfico vehicular y peatonal. Muchas áreas comerciales y destinos turísticos se encuentran a lo largo del recorrido como por ejemplo Universal Studios. También proporciona acceso al Centro de Convenciones del Condado de Orange. Este sistema de transporte destinado a transporte urbano de pasajeros por medio de autobuses cuenta con cuatro carriles con una longitud de aproximadamente 1.1 millas (1.77 km) desde *Wet 'N' Wild* en Universal Boulevard hasta *Fun Spot Way* cerca de centro comercial Orlando Premium. Dentro del trayecto, los autobuses deben atravesar seis intersecciones principales equipadas con semáforos, ilustradas en la Figura 6.5: Universal Boulevard (T1), Kirkman Road (T2), Grand National Drive (T3), Municipal Drive (T4), Del VerdeWay (T5) y Fun SpotWay (T6).



Figura 6.5: I-Drive, Orlando, Fl.

Fuente: Departamento de Ingeniería Civil, Ambiental y de Construcción de la Universidad Central de Florida.

En octubre de 2011, la Ciudad de Orlando implementó el plan de evaluación tipo incondicional a lo largo de I-Drive; esto proporcionó una prioridad semafórica para cualquier autobús equipado con GPS, independientemente de su adherencia al horario o la carga de pasajeros. A principios de 2013, se cambió del sistema incondicional a un sistema de tipo condicional, que solo proporciona prioridad semafórica a los autobuses que tienen una demora de 3 minutos o más. La construcción de BRT en I-Drive comenzó en julio de 2013 y se completó a finales de 2014.

El objetivo principal de la investigación fue evaluar y comprender el desempeño individual y en conjunto de BRT y TSP mediante la simulación del corredor ubicado en I-Drive en Orlando, FL basado en condiciones reales. Las condiciones existentes antes de implementar los sistemas TSP

y BRT se compararon con las condiciones después de aplicar el TSP para observar el impacto en el rendimiento del corredor para los autobuses y para todos los vehículos (autobuses más otros vehículos de pasajeros).

El estudio realizado por el Departamento de Ingeniería Civil, Ambiental y de Construcción de la Universidad Central de Florida optó por evaluar 7 escenarios y compararlos con las condiciones normales; es decir cuando el corredor no contaba ni con el sistema TSP ni con carriles exclusivos (modo tipo BRT). Los 7 escenarios se enlistan a continuación:

- I. Escenario TSP de tipo incondicional. Línea de autobús regular sin carriles de tipo BRT.
- II. Escenario TSP de tipo condicional con 3 minutos de demora sin carriles de tipo BRT.
- III. Escenario TSP de tipo condicional con 5 minutos de demora sin carriles de tipo BRT.
- IV. Escenario BRT sin TSP.
- V. Escenario BRT con TSP de tipo incondicional.
- VI. Escenario BRT con TSP de tipo condicional con 3 minutos de demora.
- VII. Escenario BRT con TSP de tipo condicional con 5 minutos de demora.

Los datos de entrada para realizar la simulación con la ayuda del programa VISSIM se recabaron en campo con la ayuda de agencias especializadas de tránsito como Kittleson and Associates y LYNX y con la ayuda de herramientas digitales como Google Maps. Los volúmenes máximos fueron detectados entre las 15:00 y las 19:00 mientras que las horas pico de pasajeros en el corredor fueron detectadas entre las 16:00 y 17:00 de lunes a viernes. Los resultados de calibración y validación del programa se desarrollaron utilizando el promedio de varias corridas de la simulación.

Los errores porcentuales en cada intersección entre los datos recabados en campo y el modelo VISSIM "Sin TSP - Sin BRT" fueron los siguientes: T1 (1%), T2 (18%), T3 (4%), T4 (2%), T5 (6%), y T6 (6%).

Los resultados arrojados por el programa se visualizan en la Tabla 6.1 donde los tres mejores escenarios están marcados en negritas. El escenario 5: BRT con TSP de tipo incondicional obtuvo el menor tiempo de viaje, la mejor velocidad, menor número de paradas en intersecciones y mostro un mejoramiento en las demoras. Sin embargo, este escenario tuvo un impacto negativo importante en los demoras del tránsito de las calles laterales, especialmente en las intersecciones principales con alta demanda de tránsito, lo que demuestra que su implementación es impráctica.

Es claro que en la situación en la que no se contaba con un sistema TSP ni con BRT, los tiempos de viaje fueron los mayores. Por su parte, el escenario 6: BRT con TSP de tipo condicional con 3 minutos de demora redujo los tiempos de viaje aún más que BRT con TSP de tipo condicional con 5 minutos de demora (escenario 7) y con respecto a los primeros cuatro escenarios. Es en el mismo de los casos, lo que ocurrió con el número de paradas en intersecciones. Como resultado, se demostró que dicho escenario 6 fue el que más beneficios mostró para los autobuses y

produjo menos dificultades para el tráfico en general. Por lo ya mencionado, se le determinó como el escenario más conveniente y fue implementado en el año 2016.

	EB all vehicles	WB all vehicles	EB bus only	WB bus only
Average travel time on the test bed (seconds)				
No TSP - No BRT	391	378	438	487
Unconditional TSP	297 (-24%)	320 (-15%)	340 (-22%)	416 (-15%)
Conditional TSP (3 minutes)	334 (-15%)	342 (-10%)	351 (-20%)	451 (-7%)
Conditional TSP (5 minutes)	360 (-8%)	360 (-5%)	367 (-16%)	461 (-5%)
BRT - No TSP	314 (-20%)	302 (-20%)	385 (-12%)	424 (-13%)
BRT unconditional TSP	274 (-30%)	286 (-24%)	335 (-24%)	364 (-25%)
BRT conditional TSP (3 minutes)	294 (-25%)	281 (-26%)	357 (-18%)	406 (-17%)
BRT conditional TSP (5 minutes)	302 (-23%)	289 (-24%)	361 (-17%)	417 (-14%)
Average speed on the test bed (feet/second)				
No TSP - No BRT	15.9	16.2	14.2	12.6
Unconditional TSP	20.9 (31%)	19.1 (18%)	18.3 (29%)	14.7 (16%)
Conditional TSP (3 minutes)	18.7 (17%)	17.9 (11%)	17.6 (25%)	13.7 (8%)
Conditional TSP (5 minutes)	17.3 (9%)	16.6 (3%)	16.8 (19%)	13.4 (6%)
BRT - No TSP	20.7 (30%)	20.0 (23%)	16.3 (15%)	14.8 (17%)
BRT unconditional TSP	23.4 (47%)	22.8 (41%)	19.1 (35%)	17.2 (36%)
BRT conditional TSP (3 minutes)	22.1 (39%)	21.5 (33%)	18.6 (32%)	16.4 (30%)
BRT conditional TSP (5 minutes)	21.6 (36%)	20.7 (28%)	18.0 (27%)	15.1 (20%)
No TSP - No BRT	166	153	193	175
Unconditional TSP	72 (-57%)	88 (-43%)	75 (-61%)	103 (-41%)
Conditional TSP (3 minutes)	144 (-13%)	140 (-8%)	146 (-24%)	165 (-5%)
Conditional TSP (5 minutes)	145 (-13%)	154 (1%)	172 (-11%)	172 (-1%)
BRT - No TSP	152 (-8%)	145 (-5%)	188 (-2%)	170 (-3%)
BRT unconditional TSP	69 (-59%)	72 (-53%)	69 (-64%)	92 (-48%)
BRT conditional TSP (3 minutes)	130 (-22%)	136 (-11%)	132 (-32%)	148 (-15%)
BRT conditional TSP (5 minutes)	136 (-18%)	142 (-7%)	164 (-15%)	163 (-6%)
Average number of stops per vehicle on the test bed				
No TSP - No BRT	3.70	3.43	3.81	3.47
Unconditional TSP	2.41 (-35%)	2.81 (-18%)	2.31 (-40%)	2.48 (-29%)
Conditional TSP (3 minutes)	3.40 (-8%)	3.08 (-10%)	3.04 (-20%)	3.42 (-1%)
Conditional TSP (5 minutes)	3.50 (-5%)	3.41 (0%)	3.37 (-12%)	3.55 (2%)
BRT - No TSP	3.45 (-7%)	3.36 (-2%)	3.40 (-11%)	3.42 (-1%)
BRT unconditional TSP	2.24 (-39%)	2.48 (-28%)	2.05 (-46%)	2.31 (-34%)
BRT conditional TSP (3 minutes)	3.08 (-17%)	2.90 (-16%)	2.77 (-27%)	2.86 (-17%)
BRT conditional TSP (5 minutes)	3.40 (-8%)	3.34 (-3%)	3.18 (-17%)	3.32 (-4%)

Tabla 6.1: Resultados de los 7 posibles escenarios de la simulación.

Fuente: Departamento de Ingeniería Civil, Ambiental y de Construcción de la Universidad Central de Florida.

Se concluye entonces que todo escenario con implementación de TSP y/o BRT fue efectivo para reducir los tiempos de viaje y las demoras, así como aumentar la velocidad a lo largo del corredor, en comparación con el escenario base (sin TSP ni BRT). Fue el escenario número 6 el cual mejoró significativamente los tiempos de viaje (17 - 26%), la velocidad promedio (30 - 39%) y la demora total promedio por vehículo (11 - 32%) para el movimiento principal en comparación con el escenario base. Las simulaciones también indicaron que sistemas TSP y BRT serán más efectivos en áreas con bajos volúmenes de calles que cruzan.

Fuente: Haitham Al-Deek, Adrian Sandt, Ahmad Alomari & Omar Hussain (2017) A technical note on evaluating the effectiveness of bus rapid transit with transit signal priority, Journal of Intelligent Transportation Systems, 21:3, 227-238, DOI: 10.1080/15472450.2017.1286987

6.9.2 Caso West Valley City, Utah

El segundo caso que se presenta hace referencia a un análisis basado nuevamente en posibles escenarios para implementar TSP en un corredor BRT en West Valley City, Utah en los Estados Unidos. El objetivo fue encontrar la estrategia óptima para las operaciones del transporte público estimada y planificada. El estudio utilizó el software de microsimulación VISSIM en combinación con ASC/3 evaluando los siguientes cuatro escenarios:

- I. Escenario sin TSP.
- II. Escenario con TSP.
- III. Escenario TSP con rotación de fase.
- IV. Escenario TSP personalizado (*custom TSP*).

El estudio fue realizado por los investigadores Milan Zlatkovic, Aleksandar Stevanovic, Peter T. Martin e Ivana Tasic del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Utah considerando las demoras del BRT y de los carros privados. El corredor se localiza en 5600 W en la ciudad de West Valley y la línea de BRT abarca 5 millas (8.05 km) de carriles confinados centrales desde 2700 S hasta 6200 S, con un total de seis estaciones de BRT, como se ilustra en la Figura 6.6. Este corredor tiene siete intersecciones señalizadas que operan en modo coordinado/activado. Todas las intersecciones se componen de un carril separado de giro a la derecha, uno a la izquierda y dos carriles centrales para movimientos a lo largo del corredor.

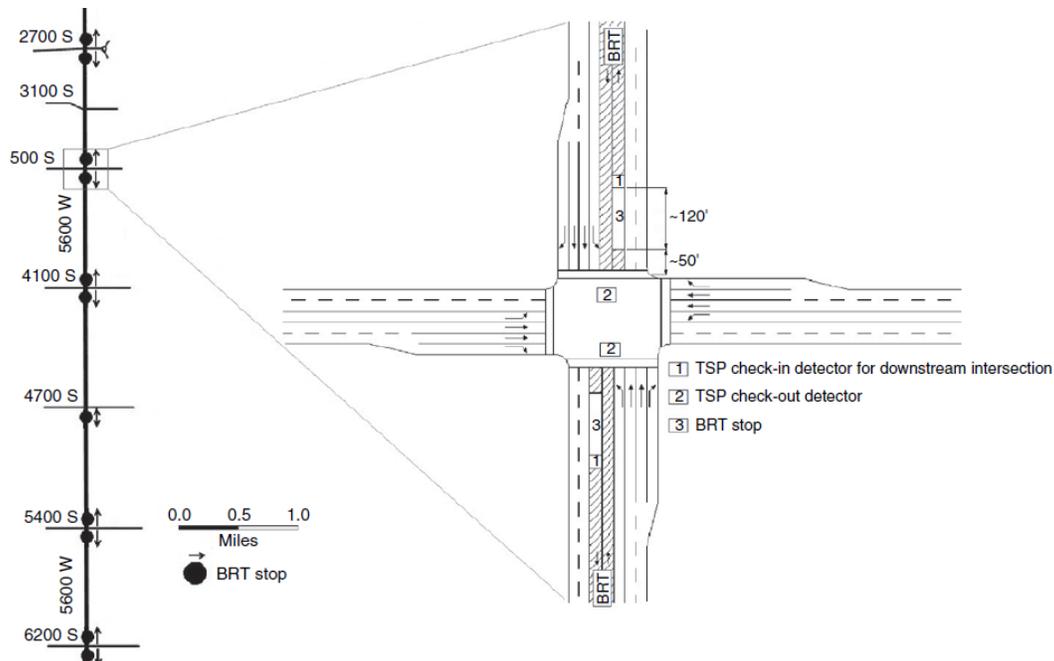


Figura 6.6: Plano BRT 5600 W West Valley City.

Fuente: Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Utah.

Las características de los 4 escenarios analizados se enlistan a continuación:

1. Escenario 1: Modelo sin TSP

A los carriles centrales no se les introdujo ningún tratamiento de control especial. El avance de los autobuses BRT se estableció en 10 minutos en cada dirección, de acuerdo con la frecuencia planificada para esta línea. La duración de la simulación en VISSIM fue de 2 horas, para el período crítico durante las 16:00 y las 18:00, con un tiempo de acumulación de 15 minutos. Los resultados de la simulación se promediaron a partir de cinco ejecuciones de simulación con diferentes semillas aleatorias.

2. Escenario 2: Modelo con TSP

El TSP se definió como prioridad incondicional. Se establecieron las estrategias de *Green Extension* y *Early-Green* al modelo anterior con las siguientes restricciones:

- Extensión máxima de luz verde para BRT: 10 segundos
- Máximo truncamiento de luz roja para BRT: 10 segundos
- Máximo truncamiento de luz roja para giro: 5 segundos

3. Escenario 3: Modelo TSP con rotación de fase

El modelo del escenario 2 fue modificado. Se le añadió la estrategia de rotación de fase, la cual cambia el orden de la secuencia de fases de modo que otorga prioridad en un menor tiempo. Se limitó a que solo las fases de la misma intersección en la misma barrera de control pudieran ser rotadas.

4. Escenario 4: Modelo TSP personalizado (*custom TSP*).

El principio fundamental para el modelo TSP personalizado es que ninguna de las fases (vehicular o peatonal) pueda omitirse, independientemente de la estrategia que este activa en ese momento. Esto proporciona condiciones de intersección normales, con algunas modificaciones en las operaciones cuando la prioridad es demandada.

Las Tablas 6.2 y 6.3 muestran la comparación de los tres escenarios con TSP. Existe una gran diferencia entre el TSP personalizado y los otros dos escenarios ya que el TSP personalizado proporciona un nivel de prioridad mucho mayor para los vehículos de transporte público.

VI. SISTEMA TSP

Segment	No TSP		TSP		TSP PR		Custom TSP		Intersection	No TSP		TSP		TSP PR		Custom TSP	
	BRT	Cars	BRT	Cars	BRT	Cars	BRT	Cars		Stop %	WT (s)	Stop %	WT (s)	Stop %	WT (s)	Stop %	WT (s)
Southbound								Southbound									
2700 S-3100 S	140	61	120	61	116	62	113	66	2700 S	40	92	40	88	40	70	30	70
3100 S-3500 S	68	67	67	68	60	68	59	75	3100 S	80	295	60	186	40	68	30	45
3500 S-4100 S	213	110	201	111	183	117	180	128	3500 S	60	74	50	62	40	13	10	20
4100 S-4700 S	219	113	184	114	179	116	180	130	4100 S	100	419	90	262	30	48	30	31
4700 S-5400 S	183	127	197	126	185	127	181	129	4700 S	60	286	20	93	30	52	10	3
5400 S-6200 S	205	119	184	120	186	121	175	130	5400 S	40	144	70	223	30	70	30	81
Total	1,029	598	952	600	909	611	889	658	6200 S	60	211	20	68	60	147	10	1
Northbound								Northbound									
6200 S-5400 S	141	132	142	132	146	134	147	138	6200 S	60	239	60	219	60	126	30	72
5400 S-4700 S	228	119	198	121	182	122	175	128	5400 S	20	16	30	30	40	27	40	46
4700 S-4100 S	130	134	114	131	111	131	112	131	4700 S	80	545	40	260	20	95	10	32
4100 S-3500 S	166	163	161	163	152	161	149	152	4100 S	80	131	30	24	20	25	10	8
3500 S-3100 S	90	64	89	64	91	69	94	72	3500 S	90	161	90	142	50	39	10	9
3100 S-2700 S	57	70	56	69	59	70	59	69	3100 S	0	0	0	0	0	0	10	13
Total	812	682	760	681	741	687	735	689	2700 S	0	0	0	0	0	0	0	0
								Average or total									
								47 1,092 36 675 27 312 16 180									

NOTE: Stop % = percentage of stopped BRT vehicles at red light; WT = BRT waiting time at red light at intersection.

Tabla 6.2: Tiempos de viaje, tiempos de espera (s) y porcentaje de paradas.
Fuente: Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Utah.

Intersection	Average Delay per Vehicle (s)				Average Number of Stops per Vehicle			
	No TSP	TSP	TSP PR	Custom TSP	No TSP	TSP	TSP PR	Custom TSP
Passenger Cars								
2700 S	33	34	34	35	0.8	0.8	0.6	0.8
3100 S	35	36	36	37	0.7	0.7	0.6	0.7
3500 S	37	38	39	46	0.8	0.8	0.8	0.9
4100 S	34	35	36	41	0.7	0.7	0.8	0.8
4700 S	35	36	38	39	0.7	0.7	0.7	0.8
5400 S	35	36	36	41	0.8	0.8	0.7	0.8
6200 S	35	35	35	38	0.7	0.8	0.6	0.8
BRT Vehicles								
2700 S	28	25	26	25	0.3	0.2	0.6	0.2
3100 S	20	9	8	8	0.4	0.2	0.6	0.2
3500 S	35	33	25	22	0.7	0.6	0.8	0.2
4100 S	51	37	27	26	0.9	0.6	0.8	0.3
4700 S	68	35	25	22	0.7	0.3	0.7	0.2
5400 S	26	33	30	28	0.2	0.5	0.7	0.4
6200 S	49	35	35	25	0.7	0.4	0.6	0.2

Tabla 6.3: Demoras promedio en segundos y número de paradas promedio por vehículo.
Fuente: Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Utah.

A grandes rasgos, los tres escenarios con implementación de TSP muestran reducciones de tiempos comparado con el escenario base. Se hace notar que la dirección sur muestra menores reducciones de tiempo debido a que es la dirección pico durante el periodo analizado. Entrando a más detalle, los resultados muestran que la estrategia *Green-Extension-Early-Green* (escenario 2) redujo el tiempo de viaje aproximadamente en un 7% en dirección sur y en un 6% en dirección norte. Su impacto en el tiempo de viaje del tránsito vehicular fue nulo. El escenario 3, que añade al anterior, la rotación de fases, mostró una disminución de los tiempos de viaje en un 12% y 9% en la dirección sur y norte respectivamente. Además mostró un ligero impacto en el

tiempo de traslado del tránsito vehicular, pero nada de llamar la atención: 2% en dirección sur y menos de 1% en dirección norte. Finalmente el cuarto escenario (*Custom TSP*) fue quien más redujo los tiempos de viaje en un 14% y 9% en la dirección sur y norte respectivamente pero quien tuvo un mayor impacto en el tránsito vehicular aumentando los tiempos de viajes de los automóviles en un 10% en dirección sur y un 1% en dirección norte.

El análisis de desempeño de las intersecciones muestra que la estrategia *Green-Extension-Early-Green* disminuye significativamente las demoras para BRT (20% a 50%). La adición de la rotación de fase provoca la disminución significativa de demoras de BRT en la mayoría de las intersecciones (la disminución máxima de alrededor del 60% se observa en 4700 S). *Custom TSP* muestra los mayores beneficios para los vehículos BRT en todas las intersecciones, puede disminuir las demoras de BRT en un 70% en algunos casos.

El objetivo del análisis fue encontrar la o las estrategias óptimas de TSP para el futuro corredor a lo largo de 5600 W en la ciudad de West Valley. Por el análisis de resultados mostrado anteriormente se concluye que el sistema TSP con rotación de fase y el TSP personalizado pueden ambos ser considerados como candidatos para su implementación.

Fuente: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2311, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2012, pp. 176–185. DOI: 10.3141/2311-17

6.9.3 Caso Jinan, China

El tercer y último caso de estudio fue desarrollado en la línea 1 del sistema de transporte público BRT en la ciudad de Jinan en China la cual tiene un promedio diario de aproximadamente 70,000 pasajeros. En caso de que se presentara una demora del autobús de tres segundos en una intersección, produciría un total de 58.3 horas de demora cada día, además de generar pérdidas económicas significativas, sin mencionar el estrés que se agrega al viaje diario a miles de usuarios.

Este estudio propone la implementación de un algoritmo que se basa en el control de prioridad semafórica con una estrategia de tipo activa para cada intersección del corredor. Dicho control de prioridad de los vehículos del sistema BRT se logra a partir de la información del vehículo y el controlador. El algoritmo obtiene información sobre la localización y la velocidad de los vehículos para poder predecir con un alto grado de precisión, el tiempo de viaje del vehículo.

Este método se analizó en 8 escenarios de control de prioridad diferentes para 8 modos de llegada del vehículo BRT a la intersección. Los ocho diferentes puntos de llegada se obtienen al estimar el tiempo de viaje del vehículo y ubicar la ventana de tiempo de llegada en un ciclo del semáforo; teniendo los primeros tres modos en la luz verde, un solo modo de llegada en la fase amarilla y los cuatro modos restantes en la luz roja, como se muestra en la Figura 6.7. Se considera también la demora, la eficiencia y la comodidad de los pasajeros.

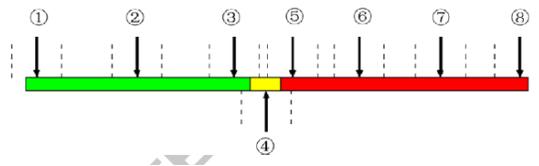


Figura 6.7: Ocho posibles escenarios con sus modos de llegada a la intersección.
Fuente: Li Zhou, Yizhe Wang, Yangdong Liu, Universidad de Shanghai, China.

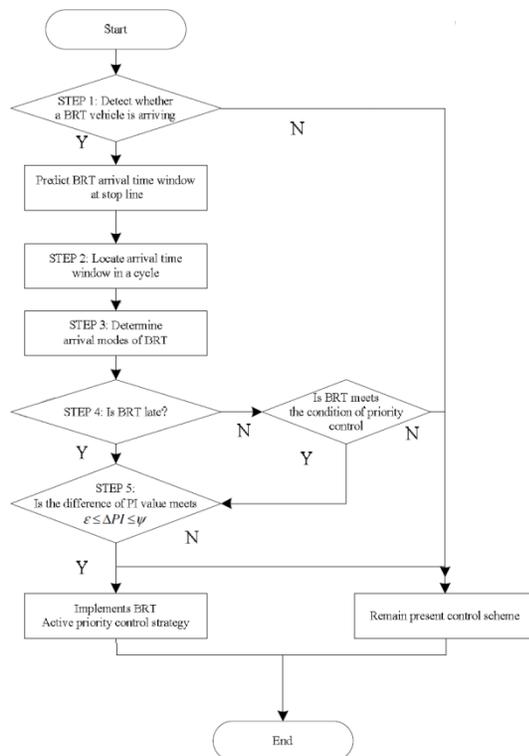
Ciertas condiciones básicas de la estrategia activa de TSP se establecieron para alcanzar el mejor funcionamiento del método. Las tres condiciones más importantes son:

1. Mejorar la confiabilidad y la comodidad: El método propuesto verifica la adherencia al horario establecido para el vehículo BRT justo cuando deja la parada en la intersección e implementa la prioridad semafórica a los vehículos demorados para garantizar la confiabilidad de la operación. En el método propuesto, la prioridad para BRT es puntual, es decir que la prioridad se otorga para los modos de llegada: al principio o al final de la luz roja, de manera que el impacto en los automóviles privados de pasajeros se limite a un rango pequeño.
2. Considerar la eficiencia general de los múltiples modos de viaje en intersecciones individuales: La prioridad semafórica exclusiva para vehículos BRT puntuales o retrasados tiene poco impacto en otros modos de viaje cuando el volumen de tránsito es pequeño, pero también

puede provocar efectos negativos en las intersecciones cuando el volumen es relativamente grande. Por lo tanto, el método otorga prioridad solo cuando la diferencia del beneficio al tránsito está dentro de un rango aceptable. Se compara el beneficio de tráfico con y sin la implementación de TSP definiendo el valor de la variable PI que nos permite calcular la demora promedio de los pasajeros con y sin prioridad.

3. Condición basada en el sistema de integración de infraestructura de vehículos: En esta investigación, el sistema de control de prioridad BRT está compuesto por un módulo de detección activo, un módulo de predicción y un módulo de decisión.

- El módulo de detección activa, detecta y transfiere información relacionada con la ubicación, velocidad, tiempo de permanencia en paradas con alta precisión.
- El módulo de predicción predice la ventana de tiempo de llegada de los vehículos BRT para alcanzar la línea de parada en una intersección, y transfiere la ubicación de la ventana de tiempo de llegada en un ciclo de duración al módulo de decisión.
- El módulo de decisión realiza la solicitud de control de prioridad para BRT de acuerdo con los modos de llegada de BRT y finalmente implementa una de las tres estrategias de control de prioridad de señal: extensión verde (*Green Extension*), truncamiento de rojo (*early Green*), inserción de fase especial o simplemente el rechazo de la solicitud de prioridad para BRT con la consideración de la congestión.



El proceso para otorgar o no la prioridad al vehículo BRT se muestra en forma de diagrama de flujo en la Figura 6.8.

Paso 1: Se detecta si algún autobús se aproxima. En caso afirmativo, el sistema de control de prioridad calcula un valor medio del tiempo de llegada a la intersección y el espacio que existe entre el vehículo y la intersección, para así calcular la ventana de tiempo de llegada y continuar con el paso 2.

Paso 2: Se localiza el límite inferior, el valor medio y el límite superior de la ventana de tiempo de llegada en cada ciclo respectivamente, luego se sigue con el paso 3.

Paso 3: Se determina el modo de llegada a la intersección donde cada modo tiene asignado una estrategia de priorización mostrados en la Figura 6.7.

Figura 6.8: Diagrama de flujo del proceso.
Fuente: Li Zhou, Yizhe Wang, Yangdong Liu.

Paso 4: Se determina la condición de operación del vehículo BRT con la ayuda de datos GPS. Seguir al paso 5 si el autobús está atrasado o si el autobús va en tiempo pero cumple con la condición para obtener prioridad. De lo contrario, permanecerá el ciclo semafórico y se finaliza el algoritmo.

Paso 5: Se calcula el valor de la variable PI con y sin la implementación de TSP. Si la diferencia del valor de PI está en un rango aceptable, se implementa la prioridad de acuerdo con el modo de llegada determinado en el paso 3. De lo contrario, permanecerá el ciclo semafórico y se finaliza el algoritmo.

El algoritmo se desarrolló con la ayuda del programa VISSIM 5.2 en donde se realizaron un cierto número de corridas. Las condiciones iniciales en el corredor fueron las siguientes: el flujo de los vehículos en los carriles de entrada en el corredor (que contiene carriles BRT exclusivos) se estableció en 600, 800, 1000 y 1200 PCU (Unidades de pasajeros por automóvil) por hora respectivamente para cada grupo de la simulación, mientras que el flujo en los carriles perpendiculares de entrada al corredor se estableció constantemente como 600 PCU por hora para todos los grupos de simulaciones.

Los ocho escenarios estudiados se muestran en la Figura 6.9 y su proceso es el siguiente: El escenario con el modo de llegada 1 corresponde a la estrategia de truncamiento de rojo, en donde el tiempo de reducción de la luz roja, debe ser mayor que el tiempo de mínimo verde de la fase anterior. El escenario con el modo de llegada 2 no se ve afectado por lo que el ciclo semafórico permanece igual. El escenario con los modos de llegada 3, 4 y 5 corresponde a una extensión de la luz verde en donde el tiempo de prolongación no debe exceder al tiempo máximo de verde. El escenario con el modo de llegada 6 en luz roja obliga a optar por la estrategia de inserción de luz verde. El escenario con los modos de llegada 7 y 8 es el mismo que el modo de llegada 1: truncamiento de la luz roja.

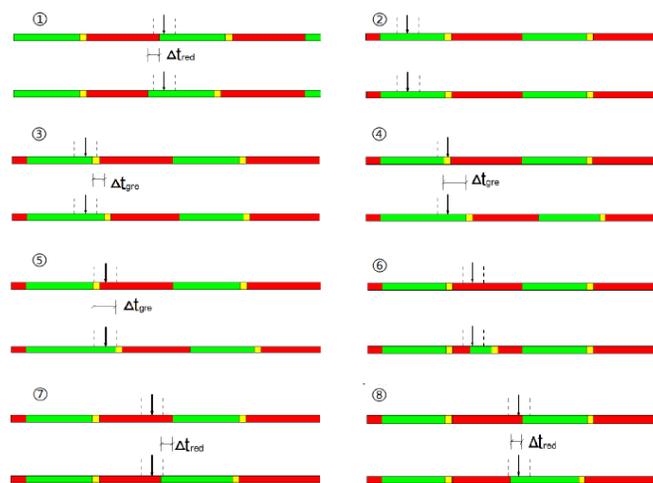


Figura 6.9: Ocho escenarios estudiados con los ocho modos de llegada.
Fuente: Li Zhou, Yizhe Wang, Yangdong Liu, Universidad de Shanghai, China.

Los resultados arrojados por la simulación fueron los siguientes: la demora promedio se redujo 7.1s, 6.3s, 6.3s y 6.7s para 600, 800,1000 y 1200 PCU por hora respectivamente. De la misma forma la velocidad de vehículo BRT aumentó 7.12%, 7,10%, 7.55% y 7.35% para los mismos flujos de tráfico anteriormente mencionados. Se realizaron 226 corridas cuando el flujo de tráfico se estableció en 1000 PCU/h. Los resultados indican que todos los modos de llegada se presentaron en algún momento durante la simulación con la frecuencia de la Figura 6.10. El modo de llegada 6 (inserción de la fase de luz verde) solo representa el 3.98%, lo que significa que tiene un efecto negativo considerable en el tránsito general en cierta intersección, así como el aumento de demora y problemas de seguridad de los vehículos. Las mejores soluciones son la extensión verde (modo de llegada 3,4 y 5) con una proporción total de 38,94% y el truncamiento rojo (modo de llegada 1, 7 y 8), con una proporción total de 34,96%. Por lo tanto, los modos de llegada de extensión verde y truncamiento rojo se prefieren como estrategias de prioridad de señal óptimas.

En conclusión, los resultados indicaron que el método propuesto reduce la demora promedio de los pasajeros en un 13.43% a 25.27% y mejora la velocidad de viaje de los vehículos BRT en un 7.10% a 7.55% en comparación con los escenarios de control existentes.

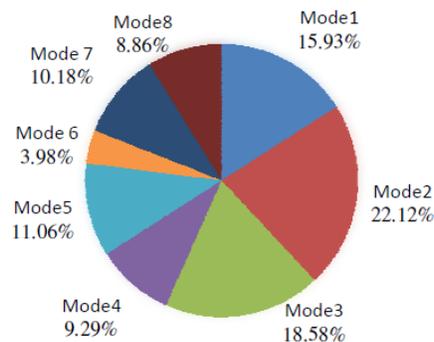


Figura 6.10: Frecuencia de aparición de los diferentes modos de llegada.

Fuente: Li Zhou, Yizhe Wang, Yangdong Liu

Fuente: L. Zhou, Y. Wang, Y. Liu, Active Signal Priority Control Method for Bus Rapid Transit Based on Vehicle Infrastructure Integration, International Journal of Transportation Science and Technology (2017), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.06.001>

CAPÍTULO VII

Concepto de Operaciones de un sistema TSP

La razón de ser del presente trabajo no es implementar en campo un ITS, sino plantear la posibilidad del uso de un ITS para mejorar ciertas características específicas de la operación de un modo de transporte público determinado. Para cumplir con esto, se hace uso de uno de los modelos basado en diferentes metodologías que a lo largo de los años se han desarrollado y que especifica una serie de pasos en el tiempo que conforman el enfoque de ingeniería de sistemas. El modelo “V”, que se muestra en la Figura 7.1, se ha establecido como el estándar de facto para representar los proyectos de ITS dentro de la ingeniería de sistemas.

Haciendo uso del modelo “V” dentro del enfoque de sistema de transporte, las etapas de interés de dicho modelo para este trabajo son solamente aquellas que abarcan el planteamiento del sistema y no su implementación; es decir, las primeras tres etapas que se encuentran en la extensión de la izquierda de la “V”: la arquitectura regional de ITS, los estudios de factibilidad y los conceptos de operación. Estas tres etapas ayudan a la identificación inicial, al alcance y a la extensión que puede llegar a tener el proyecto.

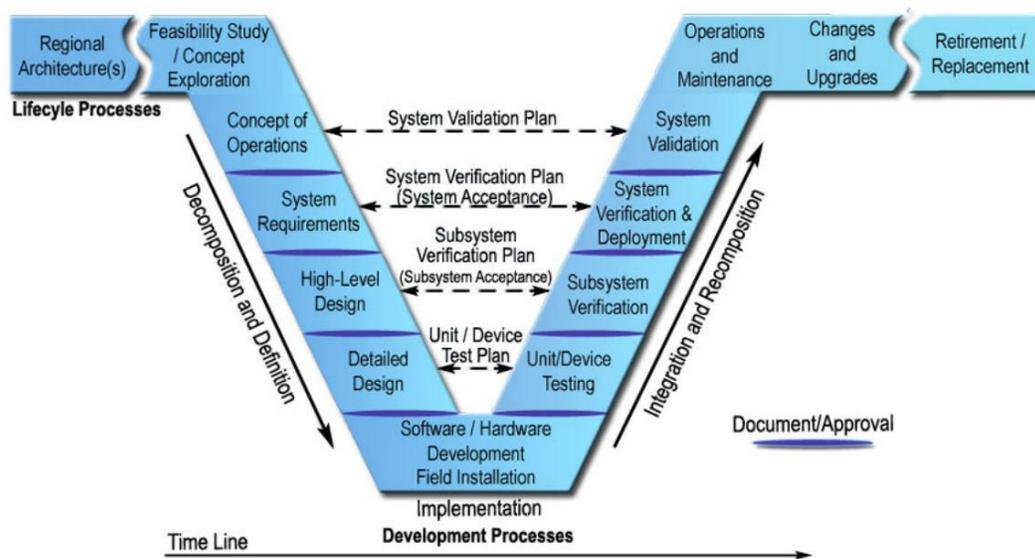


Figura 7.1: Modelo “V” en ingeniería de sistemas.

Fuente: Nashville MTA, 2017.

7.1 Definición de Concepto de Operaciones

A partir de la definición del Departamento de Transporte de los Estados Unidos, el término Concepto de Operaciones, o abreviado como ConOps, es una descripción de alto nivel de cuáles serán las capacidades principales del sistema; intenta responder las preguntas a quién, qué, cuándo, dónde, por qué y cómo, descritas en la Figura 7.2. Es el primer paso crítico donde se establece el escenario para el resto del desarrollo del sistema.

El ConOps también describe lo que el sistema hará desde el punto de vista de los usuarios y cómo se utilizará. Esto incluye la descripción de las principales entidades que trabajaron en el sistema, los flujos de información entre las entidades del sistema y entidades externas al mismo, las capacidades del sistema y los principales escenarios operacionales del mismo. Finalmente servirá para la validación continua del sistema una vez que se pone en funcionamiento.

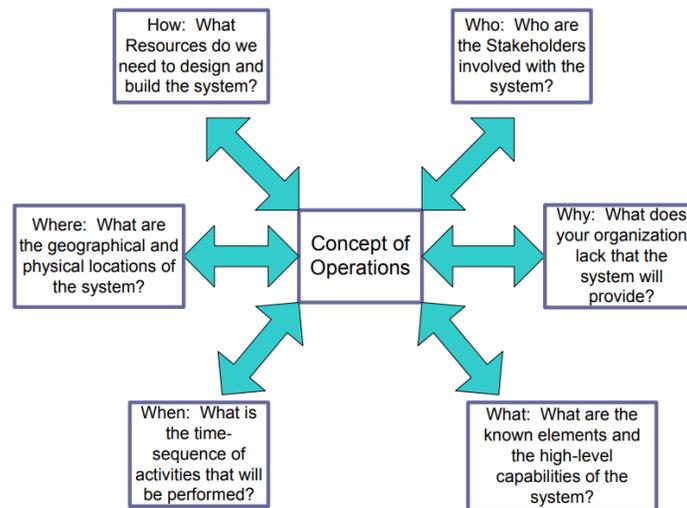


Figura 7.2: Diagrama de flujo de las preguntas clave de un ConOps.

Fuente: Manual ConOps para TMS 2005, USDOP.

7.2 Documento de ConOps

Dentro de la literatura de los ITS, el documento de ConOps sirve como resumen de muchas de las decisiones y fases de la planeación, que incluyen entre otras: alcance, necesidades, justificación, partes interesadas, panorama operacional actual y escenarios a considerar. Así como también proporciona elementos detallados de la operación del sistema actual para poder, basado en ello, hacer recomendaciones específicas para la futura planeación, el futuro diseño y la implementación de los elementos de ITS.

El documento es relevante puesto que debe ser apto para una amplia audiencia, desde personal técnico e ingenieros expertos hasta personas con relativamente poca experiencia en sistemas ITS. Debe ser tan legible y relevante para los tomadores de decisiones de alto nivel como lo es para el operador de las unidades del transporte público.

Como bien se mencionó, la única etapa de la ingeniería que se abarca en el presente trabajo es parte de la planeación. Principalmente, en el capítulo actual y en el siguiente, se describe la operación actual del tramo elegido de la línea 1 del Metrobús de la CDMX y las estrategias de control de prioridad ensayadas en la simulación.

La principal motivación para el desarrollo de tal documento incluye:

- Identificar los actores del sistema.
- Garantizar un foro de comunicación común para las partes interesadas.
- La base para todas las descripciones de subsistemas.
- Definir los principales grupos de usuarios y actividades.
- Identificar el entorno en el que funcionará el sistema.

Además de los cinco puntos descritos, para poder definir de una manera precisa el ConOps, las diferentes entidades implicadas deberán discutir, en términos de funcionamiento y operación, la inclusión de las diferentes posibilidades de los elementos del sistema, como lo pueden ser:

- Mando de control centralizado vs. distribuido
- Integración de prioridad para vehículos de emergencia (SI/No)
- Si es necesario, las bases de la condicionalidad:
 - Tipo de servicio (Exprés o local)
 - Cumplimiento de horarios
- Opciones de estrategia de prioridad (para nuestro caso activa)
 - Green Extension (Extensión de verde)
 - Early Green (red truncation) (Luz verde adelantada)
- Parámetros de la estrategia de control
 - Tiempo de extensión
 - Tiempo de truncamiento
- Mecanismos de detección, su capacidad de distancia de detección y despeje de intersecciones
- Condiciones del sistema para el control de tráfico
 - Manejo de la coordinación
 - Ventanas en los ciclos semafóricos para solicitar prioridad
 - Frecuencia y duración de los ciclos
 - Proceso de recuperación del ciclo
 - Datos a recopilar
- Escenarios operacionales y bajo cuales condiciones específicas
- Equipo necesario para el sistema (Hardware y Software necesario para las operaciones del sistema)
- Interfaces con otros sistemas ITS
- Personal necesario para operar y mantener el sistema

7.3 Desarrollo del documento de ConOps

El estándar de Concepto de Operaciones ANSI (ANSI/AIAA G-043-1992) proporciona un marco para desarrollar el documento de ConOps para cualquier sistema complejo. En esencia, la norma recomienda que un Concepto de Documento de Operaciones "... describa las características del sistema desde una perspectiva operativa", y responde a la pregunta, para cada parte interesada, "¿Qué aspecto tiene [el sistema] desde mi punto de vista?" El estándar se resume en el diagrama de la Figura 7.2. Los elementos del ConOps se abordan con más detalle siguiendo la Figura 7.3.

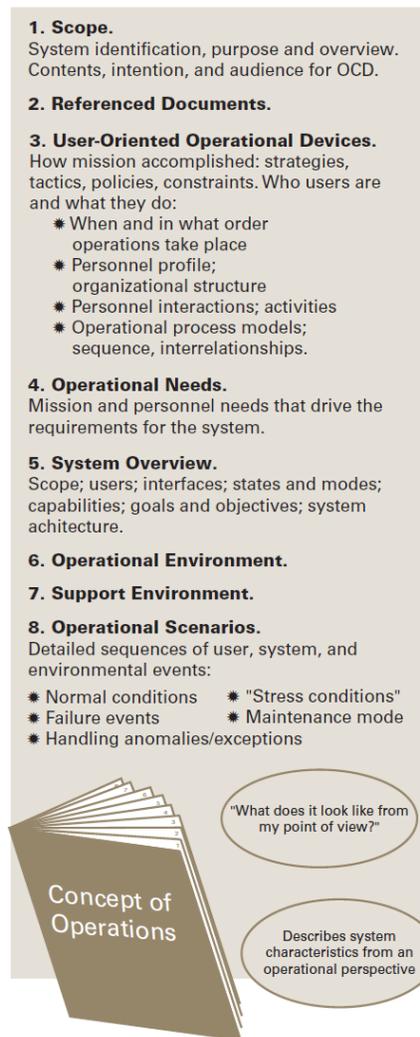


Figura 7.3: Diagrama del estándar de Concepto de Operaciones ANSI.

Fuente: Manual TSP 2005, USDOP.

- Alcance: Describe la composición del documento, su necesidad y metas más importantes. Se incluyen todas las partes incluidas.
- Documentos de referencia: Todas las fuentes de información que fueron necesarias para la realización del documento.
- Descripción operacional orientada al usuario: Describe la operación prevista del sistema desde un punto de vista del usuario.
- Necesidades operativas: Responde a la pregunta: qué es requerido por la agencia que el sistema actual no tiene.
- Resumen del sistema: Aunque toda la información contenida en esta sección se puede encontrar en otra sección del documento, esta sección se centra en las interrelaciones de los componentes clave del sistema.
- Entorno operacional y de soporte: Se recomienda que estas secciones se combinen para proporcionar información sobre el entorno general creado para el funcionamiento del nuevo sistema.
- Escenarios de operación: El sistema se describe en diversas condiciones operativas. Es más efectivo si las condiciones descritas en esta sección van desde condiciones "normales" a condiciones de estrés y falla. El escenario operacional estudia las perspectivas de diferentes clases de usuarios en una variedad de circunstancias.

CAPÍTULO VIII

Evaluación del TSP en los tramos Dr. Gálvez – Insurgentes e Insurgentes – Dr. Gálvez

Para poder evaluar el sistema TSP dentro de dicho corredor, se divide la evaluación en dos partes principales. La primera es el desarrollo simplificado del ConOps y la segunda es una microsimulación con el sistema TSP en funcionamiento con el uso del software VISSIM 11.

8.1 Concepto de operaciones: Dr. Gálvez – Insurgentes e Insurgentes – Dr. Gálvez

8.1.1 Introducción

El tramo en estudio pertenece a la línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México (CDMX) que corre a través de la Avenida de los Insurgentes desde Indios Verdes hasta El Caminero. El tramo comienza cerca de la intersección de Eje 10 Sur con Insurgentes en la estación Dr. Gálvez y termina en la glorieta de Insurgentes en la estación Insurgentes. El Concepto de Operaciones se realiza con el único propósito de plantear una propuesta de mejoría en la eficiencia del transporte público de la CDMX reduciendo los tiempos de viaje del modo de transporte público Metrobús.

8.1.1.1 Alcance del ConOps

A partir de la evaluación de sistemas TSP existentes aplicados en corredores BRT, descritos en el apartado 6.4, se recopiló la información de su operación y resultados, para contar con un marco de referencia y redactar el presente documento de ConOps el cual busca una posible solución para reducir el tiempo total de viaje del modo de transporte público Metrobús.

8.1.1.2 Documentos de referencia

- Smith H., Brendon H., Miomir I., Gannett F. (2005). Transit Signal Priority (TSP). A Planning and Implementation Handbook. United States Department of Transportation, Estados Unidos, 2005, pp. 3 – 41
- Smith Brian. (2005). Developing and Using a Concept of Operations in Transportation management Systems. United States Department of Transportation, Estados Unidos, 2005, pp. 186.
- Kimley Horn. (2017). Implementation of TSP on the Murfreesboro Pike Corridor. Concept of Operations. Nashville MTA, Tennessee, Estados Unidos, 2017, pp. 118.

- Gobierno de la CDMX. (2019). Metrobús. [citado 2019-04-24]. [En línea]. Disponible en: <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/>
- Información recolectada en campo los días martes, miércoles y jueves entre las 7:00 – 9:00 y las 18:00 – 20:00 en las siguientes fechas: del 26 de marzo del 2019 al 12 de septiembre del 2019

8.1.1.3 Justificación de la elección del tramo

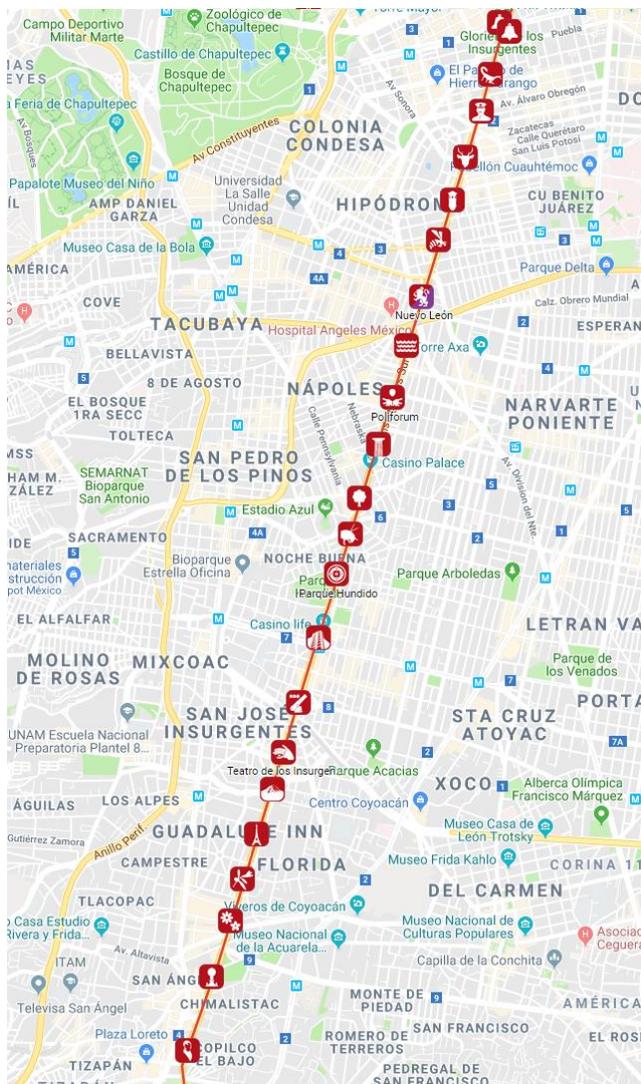


Figura 8.1: Tramo de estudio.
Fuente: Metrobús CDMX.

La elección del tramo de estudio, ilustrado en la Figura 8.1, se hizo por tres razones. La primera es la gran cantidad de personas que se desplazan diariamente con este modo de transporte. Actualmente el Metrobús transporta en un día laboral a 1.5 millones de usuarios a través de sus siete líneas, siendo la línea 1 la que más usuarios moviliza con casi 720 mil usuarios diarios en el 2018, por lo que en esta ruta se cuenta, en ciertas ocasiones en hora pico, con hasta un autobús por minuto para satisfacer la demanda (SEMOVI, 2017). La segunda razón surge a partir de los resultados de la evaluación de los sistemas BRT en el país del apartado 4.4.2 del capítulo IV donde el Metrobús de la CDMX tiene el mejor sistema y donde dentro del mismo, la línea 1 logró el segundo mejor puntaje. Esto permite analizar un sistema que opera en buenas condiciones y a partir de la implementación del sistema TSP, poder mejorarlas aún más. Una tercer razón que influyó en la elección del tramo fue la existencia de una estación de metro en un extremo del tramo lo cual provoca un flujo importante de personas entre los dos modos de transporte.

8.1.2 Descripción del sistema actual

A continuación se describen las operaciones bajo las cuales funciona la línea 1 del Metrobús a lo largo del tramo de estudio. Además, se muestra la información necesaria del sistema referente a los semáforos existentes y al aforo vehicular que circula por Av. de los Insurgentes Sur y por las calles o ejes viales perpendiculares más importantes.

8.1.2.1 Condiciones de operación

A lo largo de los 9.75 km y en ambas direcciones, el corredor se conforma mayormente por 3 carriles designados para el transporte privado y un carril confinado designado únicamente para las unidades del Metrobús. Entre los tramos de las estaciones Río Churubusco – Teatro Insurgentes y Glorieta de Insurgentes – Álvaro Obregón, en ambas direcciones, el número de carriles para los automóviles se ve reducido a dos.

Como lo muestran la Tabla 8.1 se registraron 44 intersecciones semaforizadas ubicadas entre las diferentes estaciones del Metrobús en dirección Dr. Gálvez y 43 en dirección Insurgentes. La mayoría de las paradas pertenecen al tipo Near-side Stop, sin embargo existen también estaciones del tipo Far-side Stop.

De estación a estación	# de Intersecciones	Near-side/Far-side Bus Stop	# de carriles	Distancia (m)
Glorieta Insurgentes - Durango	2	Far-side	2	500
Durango - Álvaro Obregón	2	Far-side	2	400
Álvaro Obregón - Sonora	2	Near-side	3	450
Sonora - Campeche	2	Near-side	3	450
Campeche - Chilpancingo	3	Near-side	3	400
Chilpancingo - Nuevo León	3	Near-side	3	750
Nuevo León - La Piedad	2	Far-side	3	400
La Piedad - Poliforum	2	Far-side	3	450
Poliforum - Nápoles	2	Near-side	3	350
Nápoles - Colonia del Valle	1	Far-side	3	450
Colonia del Valle - Ciudad de los Deportes	2	Far-side	3	400
Ciudad de los Deportes - Parque Hundido	2	Far-side	3	350
Parque Hundido - Félix Cuevas	1	Far-side	3	650
Félix Cuevas - Río Churubusco	3	Near-side	3	650
Río Churubusco - Teatro Insurgentes	3	Near-side	2	400
Teatro Insurgentes - José Ma. Velasco	2	Near-side	3	350
José Ma. Velasco - Francia	1	Far-side	3	400
Francia - Olivo	2	Far-side	3	450
Olivo - Altavista	2	Far-side	3	450
Altavista - La Bombilla	3	Near-side	3	450
La Bombilla - Doctor Gálvez	2	Far-side	3	600
TOTAL	44			9750

De estación a estación	# de Intersecciones	Near-side/Far-side Bus Stop	# de carriles	Distancia (m)
Doctor Gálvez - La Bombilla	2	Near-side	3	600
La Bombilla - Altavista	3	Near-side	3	450
Altavista - Olvio	2	Near-side	3	450
Olivo - Francia	2	Near-side	3	450
Francia - José Ma. Velasco	1	Near-side	3	400
José Ma. Velasco - Teatro Insurgentes	2	Near-side	3	350
Teatro Insurgentes - Río Churubusco	3	Far-side	2	400
Río Churubusco - Félix Cuevas	3	Far-side	3	650
Félix Cuevas - Parque Hundido	1	Far-side	3	650
Parque Hundido - Ciudad de los Deportes	2	Near-side	3	350
Ciudad de los Deportes - Colonia del Valle	1	Near-side	3	400
Colonia del Valle - Nápoles	1	Near-side	3	450
Nápoles - Poliforum	2	Near-side	3	350
Poliforum - La Piedad	2	Near-side	3	450
La Piedad - Nuevo León	2	Near-side	3	400
Nuevo León - Chilpancingo	3	Near-side	3	750
Chilpancingo - Campeche	3	Near-side	3	400
Campeche - Sonora	2	Far-side	3	450
Sonora - Álvaro Obregón	2	Far-side	3	450
Álvaro Obregón - Durango	2	Near-side	2	400
Durango - Glorieta Insurgentes	2	Near-side	2	500
TOTAL	43			9750

Tabla 8.1: Número de intersecciones y de carriles y tipo de parada a lo largo del tramo de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Dentro del carril confinado, las unidades del Metrobús circulan sin poder rebasar a otra unidad y sin la posibilidad de realizar giros a la derecha o a la izquierda. Esto aplica tanto en dirección norte como en dirección sur. Cada unidad debe realizar, sin excepción alguna, paradas en todas las estaciones e, independientemente de la demanda, el tiempo que permanecen las puertas del autobús abiertas es de 10 segundos por estación, por lo que la cantidad de usuarios que ingresa y/o sale de la unidad, no interfieren con su tiempo de apertura y cierre. Puede existir la

posibilidad que los usuarios interfieran con el cierre de las puertas lo que ocasiona que en vez de 10 segundos, a dicho tiempo se le adicione un par de segundos más.

Para conocer las condiciones de operación en las horas pico de la línea 1 del Metrobús, las cuales presentan el mayor flujo de usuarios; es decir, las condiciones más críticas, se trabajó en campo durante varias semanas. La literatura establece que los días martes, miércoles y jueves (no festivos) son los más representativos para coleccionar los datos y mediciones pertinentes. Con apoyo en los datos que presenta TomTom Index de los niveles de congestión horarios 2018, las horas pico en la CDMX son 7:00 - 9:00 en la mañana y 18:00 - 20:00 en la tarde/noche. Se estudiaron 8 recorridos en cada dirección para ambas horas pico por lo que en total se analizaron 32 recorridos.

Para determinar los tiempos totales de viaje y la velocidad máxima y media alcanzadas durante cada uno de los 32 recorridos, se utilizó la aplicación “Geo Tracker” para sistema operativo Android, cuya interfaz se muestra en la Figura 8.2. Al ingresar a la unidad del Metrobús en una de las dos estaciones extremo del tramo (Dr. Gálvez o Insurgentes), según fuera la dirección, se iniciaba a contabilizar el tiempo. Con la apertura de las puertas en la estación final se finalizaba el tiempo y se obtenía el registro del recorrido. La aplicación se encargaba de calcular las velocidades y de generar un archivo con extensión *.gpx*, del cual posteriormente y con ayuda del programa GPXSee se obtuvieron las gráficas de velocidad vs. distancia como se ejemplifican en las Figuras 8.3 y 8.4.

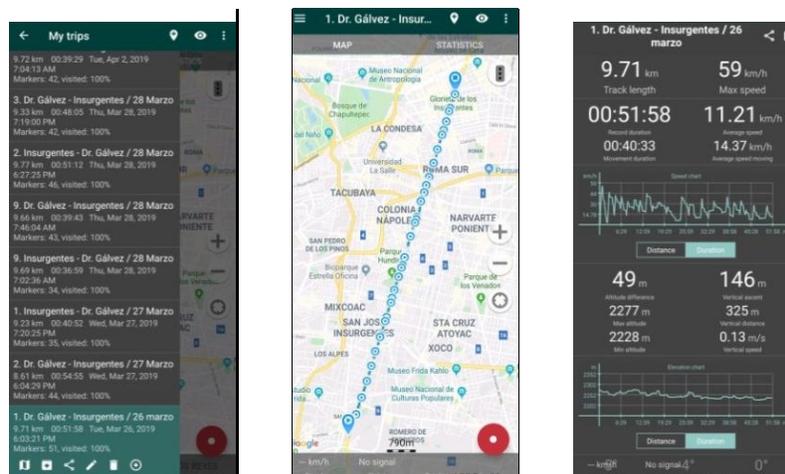


Figura 8.2: Ejemplo de interfaz para el recorrido 1 en dirección Insurgentes (26/03/19) por medio de “Geo Tracker”
Fuente: App: Geo Tracker.

Al analizar el comportamiento de las gráficas de velocidad vs. distancia (Figura 8.3) se observó un claro comportamiento de picos. Los picos superiores representan los máximos niveles de velocidad alcanzada mientras que los inferiores representan aquellos momentos en los que el autobús realizaba un alto total en una estación o debido a la luz roja en las intersecciones. Para todos los recorridos el comportamiento fue el mismo. Cabe señalar que dentro de los picos donde

la velocidad es nula, un pico puede representar ambos escenarios a la vez (parada en estación y parada en intersección) y esto representa que la estación es del tipo Near-side Stop y su distancia con respecto a la línea del alto es muy pequeña por lo que solo se puede apreciar un pico en el gráfico. Otro dato importante es que las velocidades promedio mostradas por Geo Tracker toman en cuenta esos periodos de tiempo sin velocidad, por lo que la velocidad promedio de desplazamiento difiere de esta.

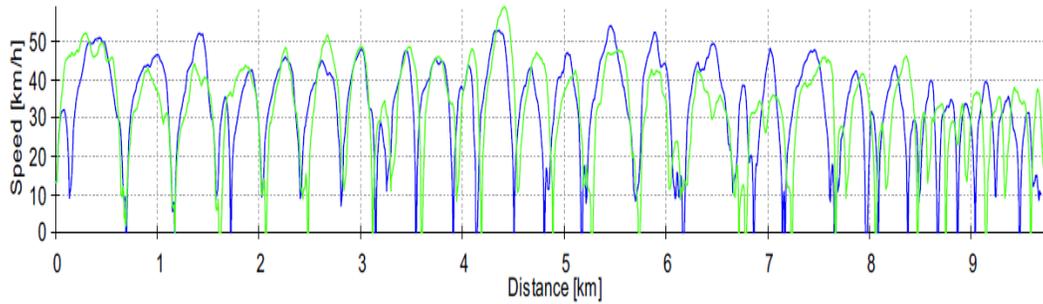


Figura 8.3: Gráfica de velocidad vs. distancia para los recorridos 7 y 8 dirección Insurgentes de la hora pico matutina.
Fuente: Elaboración propia con ayuda de GPXSee.

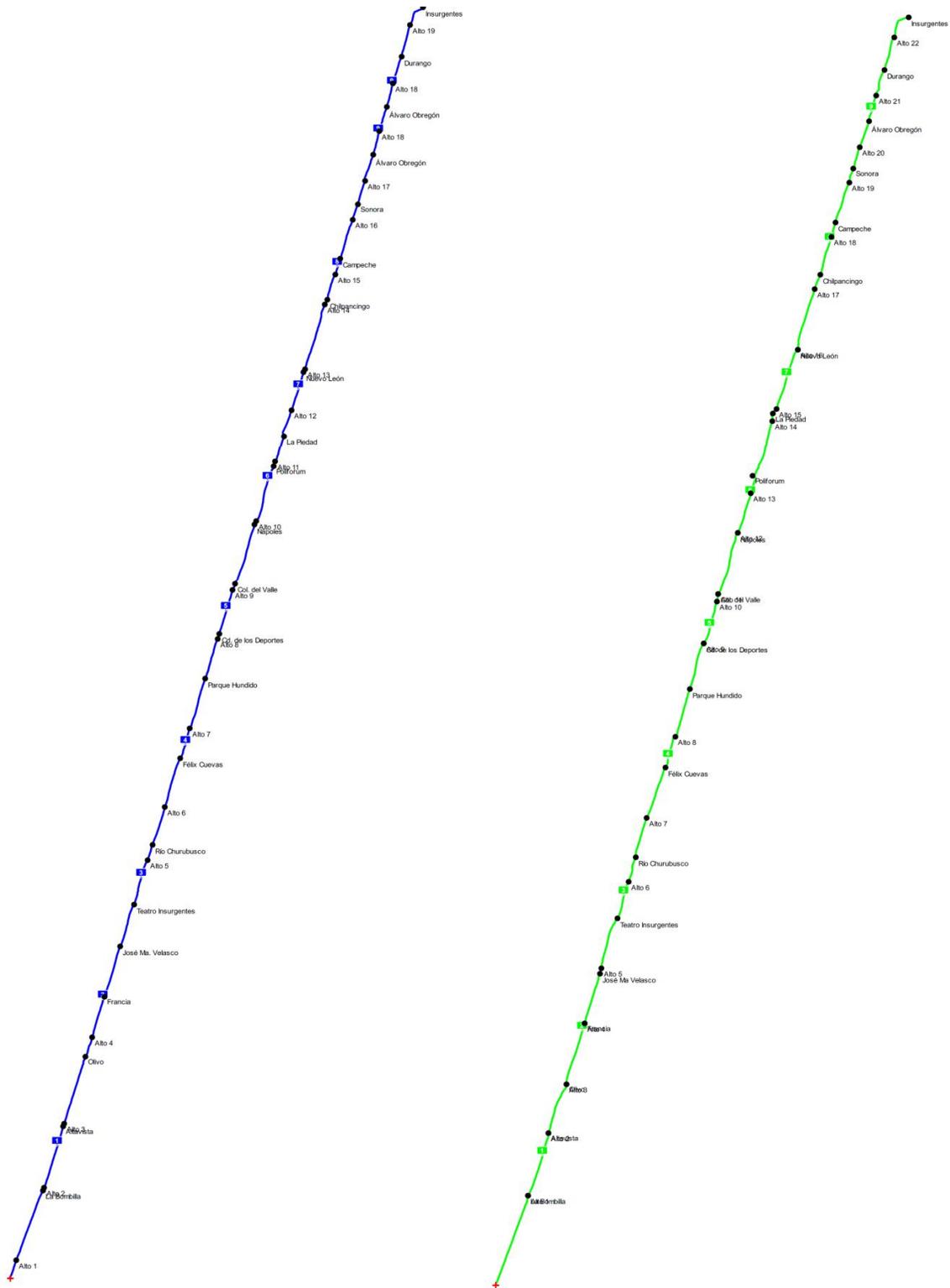


Figura 8.4: Recorridos 7 y 8 con altos y paradas direccion Insurgentes de la hora pico matutina.
Fuente: Elaboración propia con ayuda de GPXSee.

Los datos de los 32 recorridos obtenidos según su hora pico se muestran en las Tablas 8.2 y 8.3. Adicionalmente, se graficaron los tiempos de viaje de los mismos recorridos (Figuras 8.5 y 8.6). Es de mencionarse que la distancia recorrida nunca coincide exactamente con los 9.75 km del tramo establecidos en un inicio. Esto se debe a que la señal GPS del celular no es exacta y pudo ser interrumpida durante los recorridos:

	# de Recorrido	Día de registro	Hora inicio	Hora fin	Distancia recorrida (km)	Tiempo total de viaje	Velocidad máxima (km/h)	Velocidad media (km/h)
Dirección Insurgentes	Recorrido 1	28/3/2019	7:46:04	8:25:40	9.66	00:39:43	67	18.45
	Recorrido 2	2/4/2019	7:04:13	7:43:41	9.72	00:39:29	63	18.4
	Recorrido 3	2/4/2019	8:37:55	9:23:41	9.49	00:46:02	61	16.76
	Recorrido 4	4/4/2019	7:02:07	7:41:51	9.74	00:39:53	51	18.62
	Recorrido 5	30/5/2019	7:48:32	8:30:19	9.72	00:41:52	66	16.83
	Recorrido 6	11/4/2019	7:02:20	7:40:03	9.69	00:37:53	57	18.24
	Recorrido 7	23/5/2019	6:59:49	7:39:43	9.62	00:40:01	52	20
	Recorrido 8	4/6/2019	7:02:56	7:43:40	9.72	00:40:51	56	18.14
Dirección Dr. Gálvez	Recorrido 1	28/3/2019	8:04:56	8:49:22	9.75	00:41:50	54	16.76
	Recorrido 2	2/4/2019	7:50:59	8:36:12	9.61	00:43:20	59	15.89
	Recorrido 3	4/4/2019	7:52:04	8:39:12	9.77	00:43:16	57	15.76
	Recorrido 4	9/4/2019	7:03:52	7:47:52	9.9	00:41:09	50	15.44
	Recorrido 5	11/4/2019	7:49:42	8:37:25	9.73	00:44:52	50	15.49
	Recorrido 6	23/5/2019	7:51:36	8:37:21	10	00:42:53	48	15.95
	Recorrido 7	29/5/2019	7:03:45	7:44:31	9.72	00:40:55	46	16.49
	Recorrido 8	30/5/2019	7:03:14	7:46:13	9.92	00:40:04	44	15.97

Tabla 8.2: Datos obtenidos por “Geo Tracker” de los recorridos en ambas direcciones en la hora pico matutina.

Fuente: Elaboración propia.

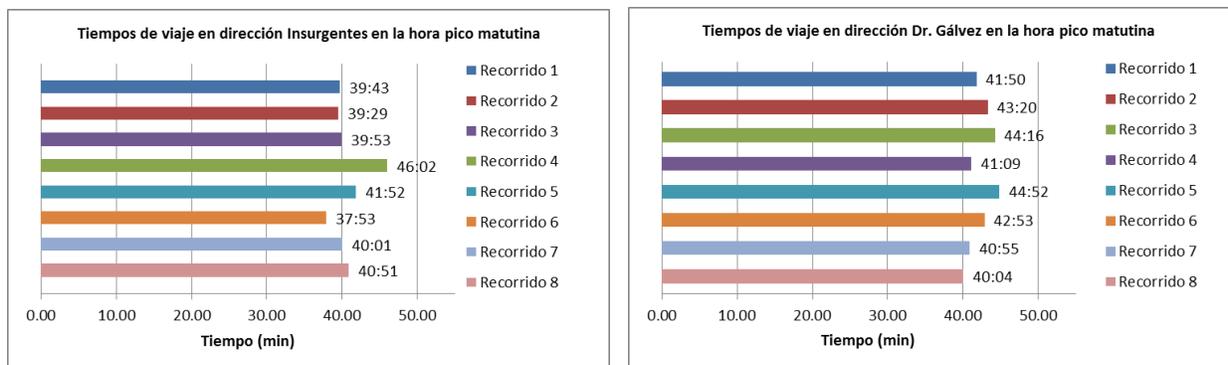


Figura 8.5: Tiempos de viaje de los 16 recorridos de la hora pico matutina de la Tabla 8.2.

Fuente: Elaboración propia.

		# de Recorrido	Día de registro	Hora inicio	Hora fin	Distancia recorrida (km)	Tiempo total de viaje	Velocidad máxima (km/h)	Velocidad media (km/h)
Hora pico vespertina	Dirección Insurgentes	Recorrido 1	26/3/2019	18:03:21	18:55:11	9.71	00:51:58	59	14.37
		Recorrido 2	27/3/2019	18:04:29	18:58:59	9.73	00:54:55	57	12.52
		Recorrido 3	28/3/2019	19:19:00	20:06:52	9.33	00:48:05	58	15.3
		Recorrido 4	2/4/2019	18:43:04	19:32:02	9.7	00:49:05	62	17.19
		Recorrido 5	4/4/2019	18:00:37	18:47:58	9.65	00:47:38	49	15.39
		Recorrido 6	4/4/2019	19:37:52	20:22:36	9.56	00:44:53	47	14.83
		Recorrido 7	9/4/2019	18:00:51	18:43:42	9.63	00:42:58	61	15.95
		Recorrido 8	10/4/2019	18:50:32	19:38:10	9.67	00:47:48	54	16.3
	Dirección Dr. Gálvez	Recorrido 1	27/3/2019	19:20:25	20:01:06	9.23	00:47:52	60	15.29
		Recorrido 2	28/3/2019	18:27:25	19:18:24	9.77	00:51:12	47	15.59
		Recorrido 3	2/4/2019	18:04:00	18:42:00	9.73	00:38:16	58	19.25
		Recorrido 4	2/4/2019	19:47:25	20:27:58	9.81	00:40:46	54	15.89
		Recorrido 5	4/4/2019	18:55:43	19:36:29	9.82	00:40:55	59	18.2
		Recorrido 6	9/4/2019	18:50:10	19:39:16	9.87	00:49:11	51	15.67
		Recorrido 7	10/4/2019	18:02:19	18:48:28	9.9	00:46:14	49	16.92
		Recorrido 8	14/5/2019	18:03:51	18:50:40	9.76	00:46:12	51	15.92

Tabla 8.3: Datos obtenidos por “Geo Tracker” de los recorridos en ambas direcciones en la hora pico vespertina.

Fuente: Elaboración propia.

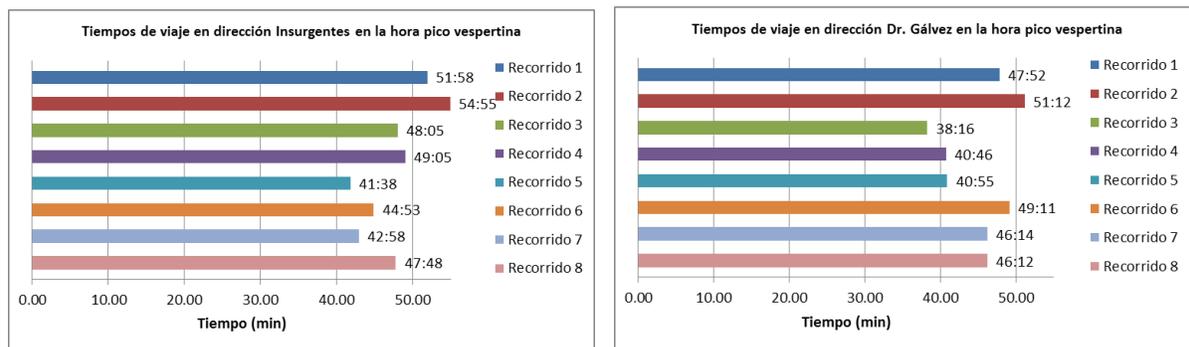


Figura 8.6: Tiempos de viaje de los 16 recorridos de la hora pico vespertina de la Tabla 8.3.

Fuente: Elaboración propia.

Analizando los resultados de ambas tablas se observa que los tiempos de viaje presentan variaciones importantes entre sí (9 minutos en la mañana y 12 minutos en la tarde en dirección Insurgentes y 5 y 13 minutos en dirección Dr. Gálvez, respectivamente), lo cual era de esperarse, puesto que existen diversos factores los cuales interfieren con el tiempo total de viaje. Dentro de estos factores está la forma de conducir del chofer del autobús, el estado actual y la pendiente de los carriles del Metrobús, la interferencia de pasajeros con las puertas al abrirse o al cerrarse y la obstrucción de los automóviles con el carril del Metrobús. Para poder trabajar mejor con los resultados, se promedió el tiempo total de viaje, la velocidad máxima y la media de los recorridos y se acomodaron en rangos aproximadamente de 45 minutos y se encontraron los resultados de la Tabla 8.4. Se observa que en el horario matutino en dirección Insurgentes, los tiempos de viaje rondan los 39 o 40 minutos mientras que en el horario vespertino se encuentran en el rango de 41 a 42 minutos. Cuando se analiza la dirección Dr. Gálvez, los tiempos se encuentran en los rangos de 41 a 42 minutos y de 43 a 45 minutos respectivamente.

En general, la hora pico vespertina presenta mayores tiempos de viaje que la matutina.

VIII. EVALUACIÓN TSP EN LOS TRAMOS DR. GÁLVEZ – INSURGENTES E INSURGENTES – DR. GÁLVEZ

		Promedio de tiempo total de viaje	Promedio de velocidad máxima (km/h)	Promedio de velocidad media (km/h)			Promedio de tiempo total de viaje	Promedio de velocidad máxima (km/h)	Promedio de velocidad media (km/h)
Dirección Insurgentes	Entre 7:00 y 7:45	00:39:37	55.8	18.7	Dirección Insurgentes	Entre 18:00 y 18:45	00:49:22	56.5	14.6
	Entre 7:45 y 8:45	00:40:48	64.7	17.3		Entre 18:45 y 19:20	00:48:27	58.0	16.7
Dirección Dr. Gálvez	Entre 7:00 y 7:45	00:41:17	49.0	16.5	Dirección Dr. Gálvez	Entre 19:20 y 19:45	00:46:29	52.5	15.1
	Entre 7:45 y 8:45	00:42:39	53.5	15.8		Entre 18:00 y 18:45	00:43:34	51.3	16.9
						Entre 18:45 y 19:20	00:45:03	55.0	16.9
						Entre 19:20 y 19:45	00:44:19	57.0	15.6

Tabla 8.4: Promedios calculados de las Tablas 8.2 y 8.3.
Fuente: Elaboración propia.

Ahora, en las gráficas de las Figuras 8.7 y 8.8, se muestra el número de altos entre las estaciones del Metrobús. De los 8 recorridos por dirección y por hora pico, se observa que en la dirección Insurgentes, los tramos que presentaron más altos fueron Nápoles – Poliforum, La Piedad – Nuevo León y Nuevo León – Chilpancingo con 10 altos para la hora pico matutina y Río Churubusco – Félix Cuevas con 17 altos para la vespertina. Otra información importante es que un autobús, por recorrido, se detiene, en promedio, en 20 de las 43 intersecciones en horario matutino y en 21 en vespertino; es decir, el autobús se ve obligado a detenerse por la luz roja del semáforo un 46.5% y un 48.8% de la intersecciones, respectivamente.

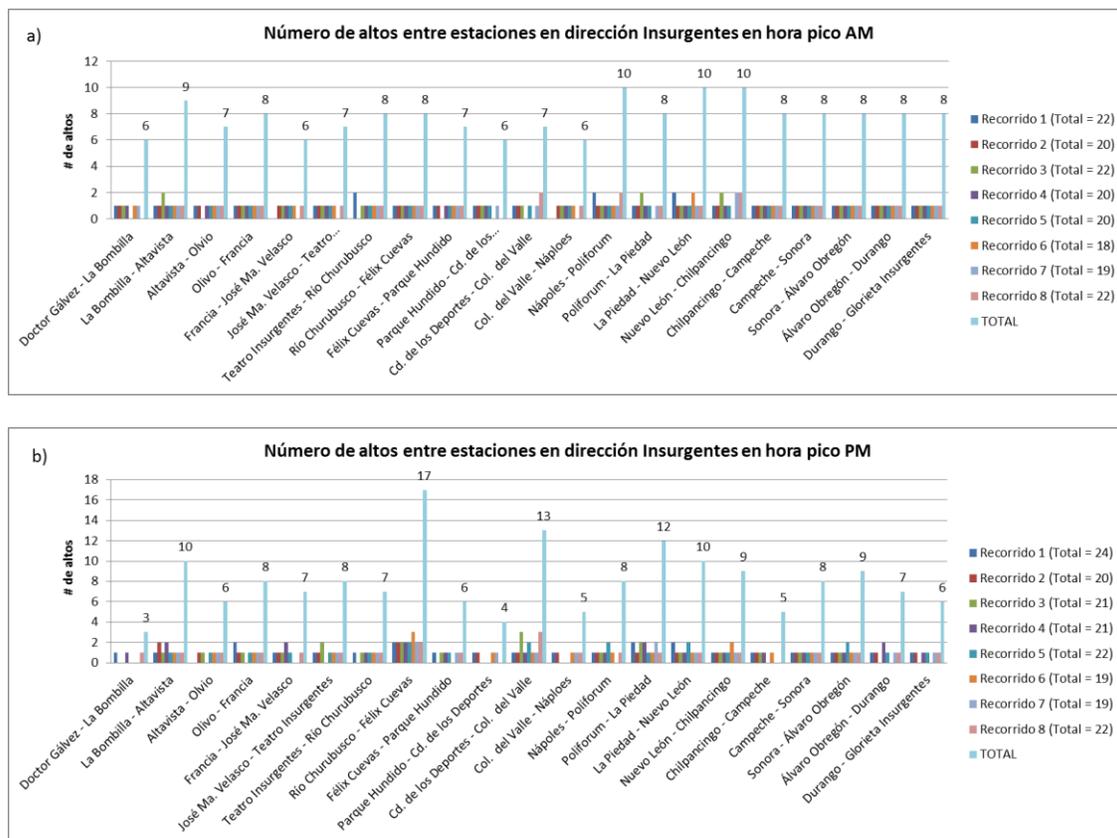


Figura 8.7: a) Número de altos a lo largo del tramo en dirección Insurgentes en la hora pico matutina.
b) Número de altos a lo largo del tramo en dirección Insurgentes en la hora pico vespertina.
Fuente: Elaboración propia.

En dirección Dr. Gálvez, los tramos La Piedad – Poliforum para la hora pico matutina y Olivo - Altavista para la vespertina presentaron el mayor número de altos con 14 altos dentro de los ocho recorridos. En la hora pico matutina, el promedio de altos en un recorrido fue de 19 (44.2% de las intersecciones) y de 20 para la hora pico vespertina (46.5% de las intersecciones).

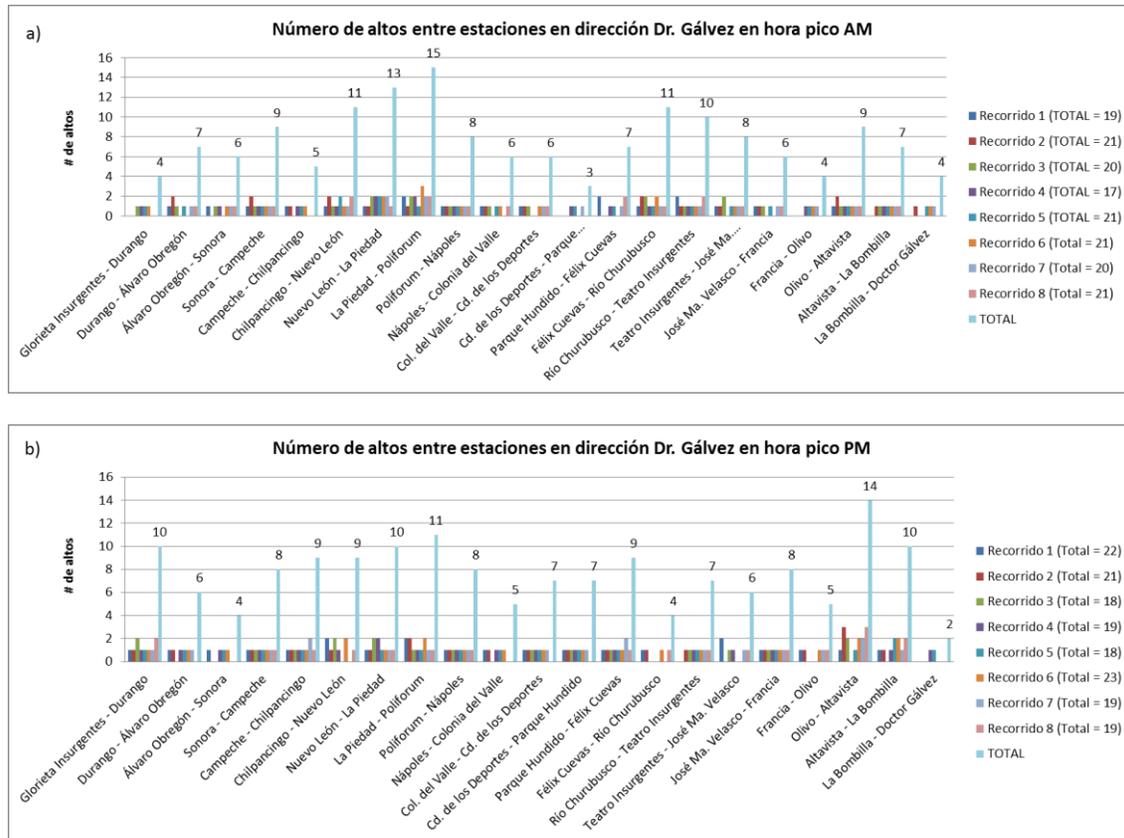


Figura 8.8: a) Número de altos a lo largo del tramo en dirección Dr. Gálvez en la hora pico matutina.
 b) Número de altos a lo largo del tramo en dirección Dr. Gálvez en la hora pico vespertina.

Fuente: Elaboración propia.

Para cuantificar el tiempo muerto de los autobuses; es decir, aquel tiempo en el que el autobús está detenido en una intersección mientras espera su derecho de paso, se realizó nuevamente trabajo en campo. Se ejemplifican 8 de los 32 recorridos en los cuales se cronometró el tiempo de espera al derecho de paso entre estaciones y dicha información se utilizó para generar las gráficas de la Figura 8.9.

Se puede observar que el tiempo mínimo que una unidad del Metrobús estuvo detenida en las diferentes intersecciones a lo largo de todo el tramo fueron 682 segundos (11.37 min) en el recorrido 4 dirección Dr. Gálvez (AM) mientras que el máximo fue en dirección Insurgentes (AM) con 759 segundos (12.65 min). Al calcular los promedios de los tiempos muertos se obtiene lo siguiente: en dirección Insurgentes se pierden 12.24 minutos por viaje mientras que en dirección Dr. Gálvez 11.90 minutos. Comparando dichos tiempos con los tiempos totales

promedios de viaje podemos concluir que una unidad de metrobús, en promedio, pasa aproximadamente el 29% de su tiempo total de viaje en alto total en dirección Insurgentes y el 26% en dirección Dr. Gálvez. De igual forma se observa que las intersecciones que presentaron un mayor número de altos, presentan tiempos muertos mayores, como era de esperar.

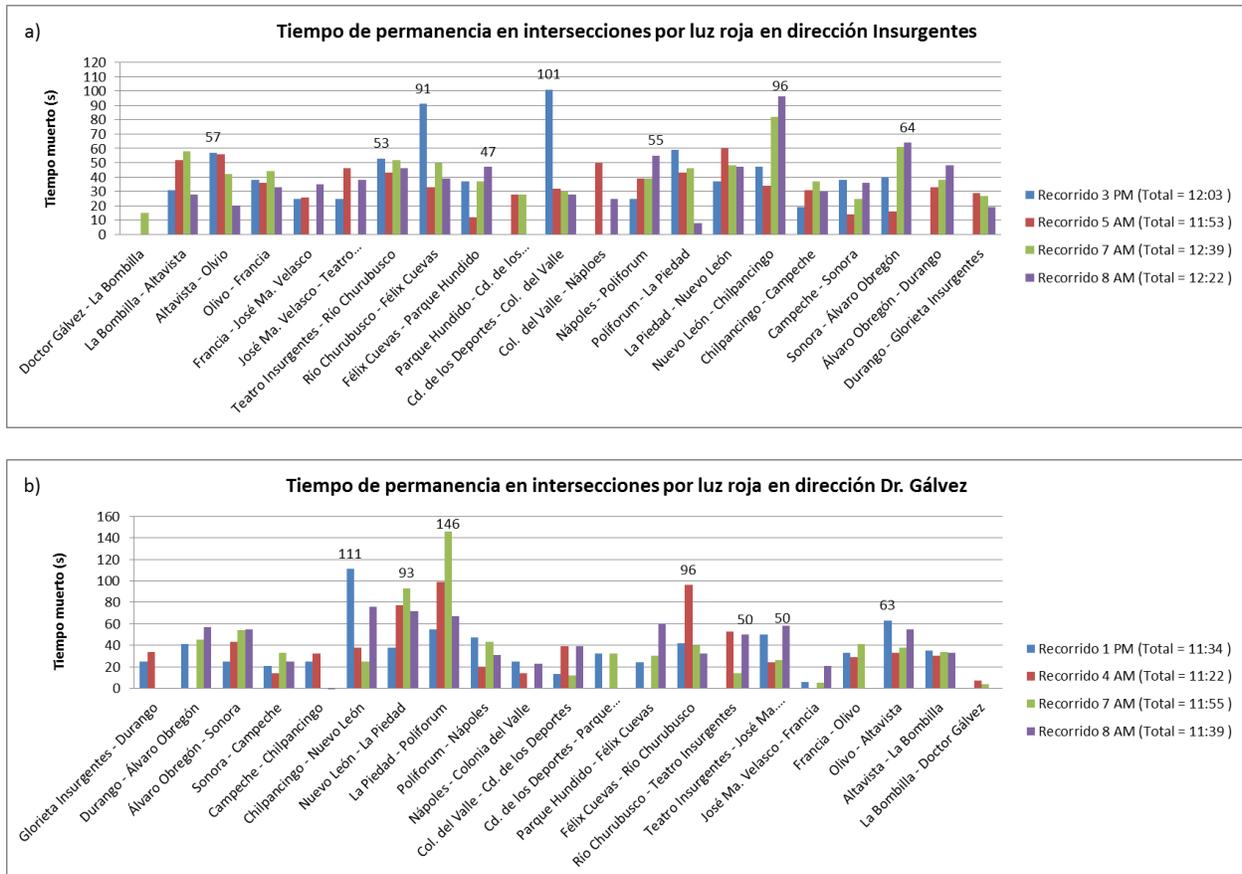


Figura 8.9: a) Tiempo de permanencia en intersección debido a luz roja de 4 recorridos en dirección Insurgentes.
 b) Tiempo de permanencia en intersección debido a luz roja de 4 recorridos en dirección Dr. Gálvez.

Fuente: Elaboración propia.

Dejando un poco de lado al Metrobús y estudiando ahora a los vehículos que circulan dentro de los 3 carriles en cada dirección de Av. de los Insurgentes Sur y en las calles y ejes viales perpendiculares, estos deben ser contabilizados para conocer que tanto se verán afectados o beneficiados. Los usuarios que circulan por la Av. Insurgentes Sur pueden beneficiarse pero aquellos provenientes de las calles perpendiculares, que buscan cruzar la Av. de los Insurgentes Sur o que buscan incorporarse a la misma, van a ser los más afectados, debido a que el sistema TSP busca priorizar al Metrobús, el cual circula por la Av. de los Insurgentes Sur.

Para ello, se realizaron aforos vehiculares en los mismos horarios pico en diferentes puntos de la Av. de los Insurgentes Sur para obtener el número de vehículos que circulan en un día promedio (miércoles 21 y 28 de agosto de 2019) sobre dicha avenida. Se observan en la Tabla 8.5.

VIII. EVALUACIÓN TSP EN LOS TRAMOS DR. GÁLVEZ – INSURGENTES E INSURGENTES – DR. GÁLVEZ

Sobre Insurgentes entre calles	Vito Alessio Robles y Encanto		Capuchinas y Perpetua		2 de Abril y María de la Luz Bringas		Eje 5 Sur San Antonio y Ameyalco		Álvaro Obregón y Tabasco	
	No. de autos	Vol. Horario	No. de autos	Vol. Horario	No. de autos	Vol. Horario	No. de autos	Vol. Horario	No. de autos	Vol. Horario
7:00 - 7:15	806	2922	117	493	509	1832	716	2770	370	1836
7:15 - 7:30	426	3036	98	587	382	1879	632	2816	418	2008
7:30 - 7:45	844	3630	128	640	521	1975	734	2948	542	2052
7:45 - 8:00	846	3756	150	638	420	1918	688	2992	506	2030
8:00 - 8:15	920	3698	211	600	556	1928	762	2996	542	1962
8:15 - 8:30	1020		151		478		764		462	
8:30 - 8:45	970		126		464		778		520	
8:45 - 9:00	788		112		430		692		438	

Sobre Insurgentes entre calles	Eje 2 Pte. Y Durango		Eje 4 Sur y Bajío		Eje 5 Sur San Antonio y California		Av. De la Paz y Monasterio	
	No. de autos	Vol. Horario	No. de autos	Vol. Horario	No. de autos	Vol. Horario	No. de autos	Vol. Horario
7:00 - 7:15	565	2029	327	1227	380	1490	868	3382
7:15 - 7:30	480	1974	295	1190	356	1574	756	3476
7:30 - 7:45	512	1940	296	1158	388	1694	942	3688
7:45 - 8:00	472	1866	309	1108	366	1928	816	3858
8:00 - 8:15	510	1764	290	1118	464	2094	962	3892
8:15 - 8:30	446		263		476		968	
8:30 - 8:45	438		246		622		1112	
8:45 - 9:00	370		319		532		850	

Dirección Insurgentes (Norte)										
Sobre Insurgentes entre calles	Vito Alessio Robles y Encanto		Capuchinas y Perpetua		2 de Abril y María de la Luz Bringas		Eje 5 Sur San Antonio y Ameyalco		Álvaro Obregón y Tabasco	
	No. de autos	Vol. Horario	No. de autos	Vol. Horario	No. de autos	Vol. Horario	No. de autos	Vol. Horario	No. de autos	Vol. Horario
18:00 - 18:15	1012	2812	194	547	560	2031	600	2214	562	1796
18:15 - 18:30	602	2374	124	432	460	1952	584	2154	434	1662
18:30 - 18:45	698	2408	104	403	451	1974	580	2068	392	1658
18:45 - 19:00	500	2368	125	435	560	2073	450	2172	408	1848
19:00 - 19:15	574	2438	79	384	481	1921	540	2354	428	1926
19:15 - 19:30	636		95		482		498		430	
19:30 - 19:45	658		136		550		684		582	
19:45 - 20:00	570		74		408		632		486	

Dirección Dr. Gálvez (Sur)										
Sobre Insurgentes entre calles	Eje 2 Pte. Y Durango		Eje 4 Sur y Bajío		Eje 5 Sur San Antonio y California		Av. De la Paz y Monasterio			
	No. de autos	Vol. Horario	No. de autos	Vol. Horario	No. de autos	Vol. Horario	No. de autos	Vol. Horario		
18:00 - 18:15	466	1398	202	1035	586	2354	1018	3244		
18:15 - 18:30	324	1158	247	1121	444	2382	760	3114		
18:30 - 18:45	394	1206	310	1112	690	2464	738	3044		
18:45 - 19:00	214	1018	276	1063	634	2378	728	3098		
19:00 - 19:15	226	1106	288	1038	614	2256	888	3064		
19:15 - 19:30	372		238		526		690			
19:30 - 19:45	206		261		604		792			
19:45 - 20:00	302		251		512		694			

Tabla 8.5: Aforo vehicular y volúmenes horarios sobre la Av. de los Insurgentes Sur.

Fuente: Elaboración propia.

Se aforaron también los vehículos de las calles y ejes viales con mayor carga de vehículos en las mismas horas los días martes 3 y 10, miércoles 4 y 11 y jueves 5 y 12 de septiembre de 2019. Para estos últimos, los tiempos de los aforos se realizaron en periodos de 15 minutos, por lo que para convertirlos en volúmenes horarios, se consideró dicho volumen como el representativo de toda la hora. Se observan en la Tabla 8.6. Es de resaltar que en dichas horas, debido a que se presentan en su mayoría Niveles de Servicio F, los aforos que se tomaron fueron flujos de saturación, siendo estos muy similares en ambas horas pico.

Calle / Avenida	Número de autos por fracción de 15 minutos en hora pico	Vol Horario	Calle / Avenida	Número de autos por fracción de 15 minutos en hora pico	Vol Horario	Calle / Avenida	Número de autos por fracción de 15 minutos en hora pico	Vol Horario
Monterrey	572	2288	Eje 6 Sur	604	2416	Barranca del Muerto (Baja)	225	900
Álvaro Obregón	244	976	Porfirio Díaz (Bajan)	174	696	Barranca del Muerto (Baja/Gira)	63	252
Eje 2 Sur (Yucatán) y Medellín	402	1608	Porfirio Díaz (Suben)	230	920	Barranca del Muerto (Sube)	247	988
Av. Sonora	100	400	Millet (Bajan)	70	280	Barranca del Muerto (Sube/Gira)	139	556
Coahuila	255	1020	Millet (Suben)	99	396	Su Santidad J.P.II (Francia)	100	400
Eje 3 Sur (Av. Baja California)	978	3912	Eje 7 Sur (Extremadura)	425	1700	Vito A. Robles (Río San Ángel)	275	1100
Eje 4 Sur Tehuantepec	188	752	Algeciras	161	644	Desierto de los L. (Bajan)	213	852
División del N. (Nuevo León)	443	1772	María de la Luz Bringas	214	856	Vito A. Robles (Suben)	141	564
Ohio	517	2068	Río Mixcoac (eje 8 Sur Baja)	90	360	Av. Miguel Á. De Quevedo	161	644
Filadelfia	267	1068	Río Mixcoac (eje 8 Sur Sube)	194	776	Av. de la Paz	380	1520
Eje 5 San Antonio	918	3672	Mercaderes (Hermes)	250	1000			

Tabla 8.6: Aforo vehicular sobre calles y avenidas perpendiculares realizado en campo.

Fuente: Elaboración propia.

8.1.2.2 Descripción operativa del sistema de semáforos actual

El sistema de semáforos tiene como objeto agilizar la movilidad a lo largo del tramo y disminuir los choques en los puntos de conflicto. De los semáforos que se ubican en las 44 intersecciones del tramo, cinco de ellos tienen como único objetivo permitir el paso peatonal de los usuarios que entran y salen de las estaciones del Metrobús, uno de ellos permite el paso exclusivo del Metrobús en la parada Col. del Valle mientras que los restantes 38 sirven para controlar el flujo de vehículos como de peatones. Estos semáforos deben conceder el tiempo mínimo necesario para el acceso y la salida de los usuarios, ya que las estaciones de autobuses del Metrobús se encuentran en el camellón de la avenida. También hacen posible el tránsito de vehículos sobre la Av. de los Insurgentes y sobre las calles o avenidas que cruzan. La operación de los semáforos está a cargo de la SSP y su mantenimiento en el tramo lo efectúa principalmente la empresa SEMEX.

A continuación, para ejemplificar, se muestra en la Figura 8.10 las fases de dos intersecciones en la hora pico vespertina, información que se obtuvo en campo. El resto de las fases con sus respectivos tiempos de ambas horas pico se encuentran en los anexos. Todos los semáforos a lo largo del tramo tienen un ciclo de 120 segundos y funcionan a tiempo fijo. Al tomar los tiempos, se cuantificó el lapso de tiempo que transcurre entre el otorgamiento de derecho de paso de dos intersecciones consecutivas; esto para tener todas las intersecciones referenciadas a la inicial. En los diagramas, las flechas de color negro representan los movimientos de los automóviles mientras que las de color rojo del Metrobús. Además, los tiempos de cada fase se muestran en el formato del software VISSIM.

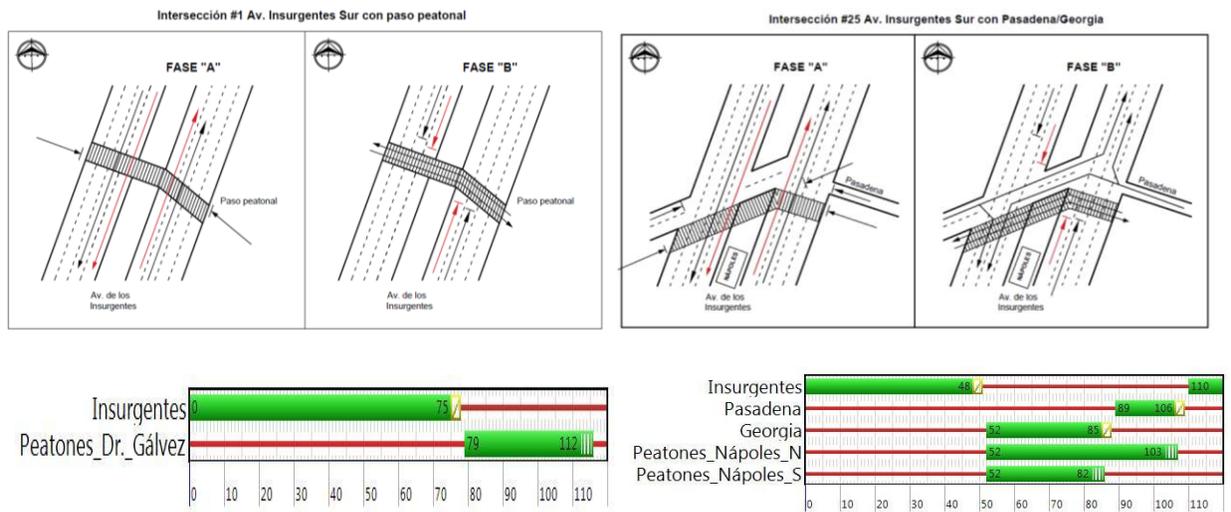


Figura 8.10: Tiempos y fases de 2 de las 44 intersecciones del tramo en estudio.

Fuente: Elaboración propia con Software VISSIM 11.

8.1.2.3 Equipo de operación

El conjunto de equipos que interactúan para el correcto funcionamiento del Metrobús es el siguiente:

8.1.2.3.1 Equipo a bordo del vehículo

Las 670 unidades que dan servicio en las siete líneas de Metrobús están equipadas con computadoras y GPS que mantiene una conexión directa con el Centro Informativo de Transporte Inteligente (CITI) para cualquier incidente o indicación necesaria. También les permiten a los usuarios, mediante aplicaciones en el celular, conocer el momento en que la unidad pasará por la estación, los tiempos que ocupa, y si tiene alguna demora para que decidan si esperan en la estación de Metrobús o utilizan otros modos de transporte.

Se cuenta también con pantallas y una voz guía que informan al usuario en que estación se encuentra la unidad y cuál es la próxima estación cuando el vehículo se encuentra en movimiento, lo cual facilita y agiliza el descenso del usuario del autobús.

8.1.2.3.2 Equipo en las estaciones

En cada estación, se cuenta con una o varias pantallas que indican los tiempos y las direcciones de las siguientes unidades por llegar a la estación. Eso se logra a partir de los GPS instalados en cada unidad de la flota.

8.1.2.3.3 Equipo en el CITI

Se conforma por personal capacitado en la operación y funcionamiento del sistema Metrobús. Su trabajo principal es mantener funcionando el modo de transporte correctamente y en caso de alguna irregularidad, actuar de manera rápida y eficaz para resolver el problema. Además, proporciona seguridad a los usuarios e información útil a las autoridades para la toma de decisiones en la instrumentación de políticas públicas en beneficio de la ciudadanía.

8.1.3 Necesidades operativas

A pesar de la adquisición de semáforos con la tecnología de semáforos adaptativos, hoy en día no existe ninguno de ellos que se aproveche como debería. Se necesitaría adquirir nueva tecnología que involucra sistemas de detección y controladores del sistema TSP pues el hardware con lo que se cuenta hoy en día no sería suficiente. Dentro de la presente investigación no se profundiza en la adquisición ni en los costos de dichas necesidades.

8.1.4 Sistema de prioridad semafórico en intersecciones (TSP)

Se explica el porqué del sistema, al igual que un breve resumen de las estrategias de prioridad que se emplearán y la conformación del sistema; es decir, la arquitectura TSP.

8.1.4.1 Objetivos

El objetivo principal de la implementación de un sistema de prioridad semafórica en una ruta de transporte público es reducir los tiempos de viaje de dicho modo de transporte, mejorar la puntualidad en los horarios de servicio y reducir las demoras o esperas de los usuarios. Con eso en mente, se busca que un porcentaje importante de personas que cuenta con automóvil, opten por dejarlo en casa o en algún lugar cercano para utilizar el Metrobús como modo de transporte principal o complementario, debido a que éste habrá mejorado su adherencia a sus horarios y podrá transportar una mayor cantidad de usuarios en un menor tiempo.

Los objetivos secundarios se traducen en beneficios económicos con la ganancia de horas-hombre, ambientales con la reducción de emisiones de GEI y sociales con la disminución del estrés de los usuarios y un mejor aprovechamiento de la vía pública.

8.1.4.2 Estrategias de prioridad

Ya se ha mencionado que la literatura indica que las estrategias de prioridad más sencillas de implementar y las cuales, trabajando en conjunto, arrojan muy buenos resultados, son Early Green y Green Extension. Por ello, se va a trabajar únicamente con dichas estrategias

Debido a la existencia de cruces de la Av. de los Insurgentes Sur con avenidas principales (ejes viales principalmente), las estrategias de otorgamiento de prioridad no siempre podrán ser asignadas con la frecuencia deseada; esto porque el impacto en el tránsito sería importante y lo que se busca es reducir los tiempos de viaje de los usuarios el Metrobús con el menor impacto posible al tránsito de las calles.

8.1.4.3 Arquitectura TSP

Como se describió en el capítulo VI, dentro de los sistemas TSP se encuentran los siguientes dos componentes: el generador de solicitud de prioridad (dispositivo de detección) y el servidor de solicitud de prioridad (controladores con lógica de prioridad integrada). Existe también un sistema de soporte que permiten a las agencias acceder a los datos para la administración del sistema.

Para generar las solicitudes de prioridad existen tres opciones: un sistema distribuido, un sistema centralizado y un concepto de "bus inteligente". En el primero, la solicitud de prioridad se acepta o rechaza a nivel de la intersección sin la intervención del controlador. En el sistema centralizado, las solicitudes son controladas desde el centro de control de mando (CITI en nuestro caso). Finalmente, la tercera opción es una variante del sistema distribuido donde la lógica para otorgar prioridad se encuentra en el mismo autobús. La opción más conveniente sería optar por un sistema distribuido ya que el CITI cuenta con expertos en la operación del sistema y se puede controlar mucho más fácil cuando existen drásticos cambios de demanda.

Por recomendación internacional principalmente, pero también por los obstáculos que pueden presentar los árboles en el camellón de Av. de los Insurgentes Sur, se recomienda el uso de detectores de bucle cableado. Su instalación va por debajo del pavimento donde circula la flota del Metrobús y debe ser correctamente instalada para su correcto funcionamiento.

Para los servidores de solicitud de prioridad o controladores, se decide optar por controladores tipo VAP (Vehicle Actuated Programming). VAP es el propio lenguaje de programación de VISSIM para definir operaciones de señal personalizadas y permite simular controladores de señal programables activados por vehículo. Durante las ejecuciones de simulación, VAP interpreta los comandos lógicos de control y genera los comandos de control de señal para el controlador efectivo en la red. En viceversa, los parámetros de detección se recuperan de la red y se procesan en la lógica.

8.1.5 Escenarios de operación

Los diferentes escenarios a analizarse dentro de VISSIM 11 varían solamente en la duración de la extensión de la luz verde y en el truncamiento de la luz roja. Ambos escenarios de prioridad consisten en las estrategias Early Green y Green Extension.

- I. Escenario SIN TSP.
- II. Escenario CON TSP 3 SEG (3 segundos de prioridad en ambas estrategias).
- III. Escenario CON TSP 5 SEG (5 segundos de prioridad en ambas estrategias).

8.2 Estudio de simulación

Al momento de simular se debe seguir una metodología de elaboración de un modelo. Según lo planteado, la metodología se basa en los siguientes pasos:

8.2.1 Formulación del problema

En promedio, cada autobús del Metrobús se ve obligado a detenerse totalmente en 19 de las 44 intersecciones en dirección Dr. Gálvez en la hora pico matutina y 20 en la hora pico vespertina. En dirección Insurgentes se detienen en 20 y 21 intersecciones respectivamente. El freno total provoca un tiempo perdido de viaje de aproximadamente 724 segundos, que convertido en minutos, representa 12 minutos con 14 segundos en dirección Insurgentes y 12 minutos con 54 segundos en dirección Dr. Gálvez; es decir aproximadamente el 29% y el 26% del tiempo total de viaje respectivamente.

8.2.2 Fijación de objetivos y plan general del proyecto

El objetivo principal de la simulación es calcular los tiempos de viaje del tramo estudiado de la línea 1 del Metrobús de la Ciudad de México en ambas direcciones y en ambas horas pico para los intervalos de salida establecidos a partir de la implementación del sistema TSP. Con los

resultados, calcular el ahorro de tiempo que representa implementar el sistema TSP dentro del corredor y los beneficios que conlleva dicho ahorro.

El plan general de la simulación consta de tres escenarios presentados anteriormente. Dentro de los últimos dos escenarios se aplican las dos estrategias de prioridad simultáneamente para los intervalos de salida establecidos. El número de ejecuciones de la simulación será el mismo que los 32 recorridos que se tomaron en campo; es decir, ocho ejecuciones para cada dirección y en cada hora pico. Esto con el fin de borrar los efectos del comportamiento estocástico del software y que al momento de comparar los resultados de la simulación con los resultados de campo, sean en igualdad de circunstancias.

8.2.3 Recopilación de datos

Todos los datos solicitados por el programa fueron tomados en campo o descargados de la página web de la SEMOVI y se encuentran en las tablas y figuras presentadas anteriormente dentro de este mismo capítulo o dentro de los anexos al final del trabajo. Se enlistan los datos necesarios que fueron ingresados al modelo:

- Intersecciones del tramo sobre Av. de los Insurgentes Sur
- Ciclos y fases de los semáforos de cada intersección
- Estaciones y paradas de la línea 1 del Metrobús dentro del tramo de estudio
- Intervalos de salida, capacidad y especificaciones de las unidades del Metrobús
- Aforos vehiculares
- Aforo de usuarios del Metrobús
- Rutas de los vehículos privados con sus flujos relativos
- Velocidades y distribuciones de tiempo de los autobuses, automóviles y peatones

8.2.4 Modelo de traducción

Para la construcción de los 9.75 km de la red que se muestra en la Figura 8.11, se utilizaron 547 Links que representan los tramos de Av. de los Insurgentes Sur y las calles y las avenidas que la cruzan, además de todas las conexiones necesarias para crear todos los movimientos posibles entre las calles de las intersecciones y aquellos pasos peatonales que permiten el ingreso a las estaciones del Metrobús. Para cada intersección se creó un controlador de señal de tiempo fijo con su respectivo programa de señal en donde se asignaban los tiempos de verde a cada movimiento, respetando siempre los tres segundos de luz ámbar y un segundo de todo rojo. Por medio de 572 semáforos, las señales emitidas por cada controlador se mostraron a los automóviles, a los autobuses de Metrobús y a los peatones. Como el Metrobús siempre debe detenerse en las 22 estaciones, se crearon 44 paradas de transporte público con sus respectivas áreas de reducción de velocidad. Para lograr que los camiones se pararan a recoger y dejar usuarios en cada parada, se crearon 4 líneas de transporte público. Se consideraron cuatro líneas extras con la finalidad de que al iniciar la simulación, se encuentren unidades circulando. Se

diseñaron dos tipos de autobuses. El primero del tipo articulado de 18 m de largo con capacidad para 160 usuarios y el segundo del tipo biarticulado con 24 m de largo y con capacidad para 240 usuarios. Para representar a las estaciones se construyeron 141 áreas de cuatro tipos: áreas de salida de peatones, áreas de espera, áreas de plataforma para la salida de los usuarios del autobús y áreas peatonales. Para lograr el ascenso y descenso de las estaciones, se crearon 27 rampas de 1.2 m de altura, 27 entradas de peatones donde se indica el volumen horario de usuarios que entran por estación. Para indicarle a los usuarios por donde desplazarse, se delimitaron 104 decisiones de ruta estáticas para peatones. Todas ellas van de las áreas de salida de los peatones hacia las áreas de espera o de las áreas de plataforma hacia las áreas de salida de peatones. Para los peatones en los cruces peatonales de las estaciones y para los automóviles privados, se crearon 103 entradas de vehículos en donde se agregó el volumen horario de automóviles o peatones que saldrán por un determinado Link. Para indicarle a los peatones y a los vehículos que rutas pueden seguir, se delimitaron 95 decisiones de ruta estáticas para vehículos en donde en su totalidad se permitían 254 movimientos diferentes y en donde cada movimiento cuenta con un flujo relativo, el cual representa la probabilidad en porcentaje de que un automóvil, teniendo un cierto número de posibilidad a tomar (girar derecha, izquierda o seguir derecho, por ejemplo). Para poder cuantificar el tiempo total de viaje desde uno de los extremos del tramo al otro en ambas direcciones de las unidades del Metrobús, se utilizaron 4 medidores de tiempo de viaje para vehículos. Además se utilizaron 42 medidores de tiempo de viaje adicionales, pero en este caso, cada uno con el fin de indicar el tiempo total de viaje entre cada estación. Por último, se añadieron un nodo por intersección para poder cuantificar los parámetros de emisiones de CO (monóxido de carbono) y de NOX (óxidos de nitrógeno), además del consumo de combustible y las demoras por vehículo y por pasajero.

Dentro de los anexos se resumen todos los componentes del sistema desglosados por elemento y sus cantidades.

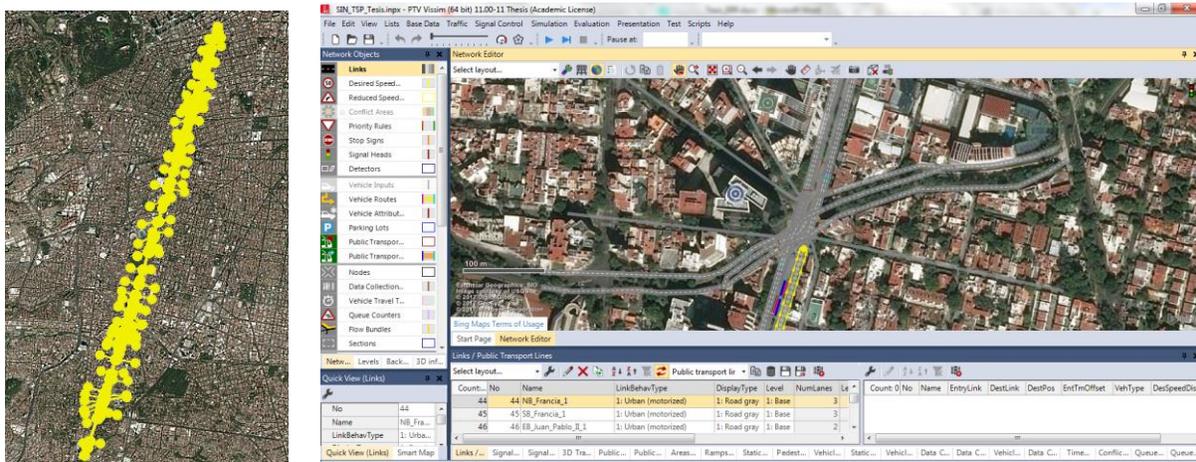


Figura 8.11: Creación de la red del tramo en estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir del software VISSIM 11.

8.2.5 Verificación, validación y calibración

La verificación se logra al comprobar que el modelo simulado cumple con los requisitos de diseño para los que se elaboró y se comporta de acuerdo a su diseño. La validación valora las diferencias entre el funcionamiento del simulador y el sistema real que se está tratando de simular considerando la incertidumbre de los datos. Para esto, debe existir un cruce de los datos que arroja la situación simulada (VISSIM) y la situación real (tracks tomados en campo mediante “Geo Tracker”) que permita validar que el comportamiento de ambos sistemas es muy parecido. Para ello se utilizan las medidas de bondad de ajuste, que nos van a indicar la discrepancia entre los valores observados y los valores esperados en el modelo de estudio. Si esto no se consigue a la primera, la calibración consiste en modificar los parámetros de microsimulación para poder conseguir que ambos comportamientos sean muy similares. Una vez que esto se logra, se prosigue con la implementación del sistema TSP.

La calibración y la validación del modelo se lograron al ingresar a la red los siguientes parámetros: tiempos de luz de señalamiento, volúmenes horarios de automóviles, distribuciones de tiempo, aceleraciones y velocidades.

Los tiempos de verde, de ámbar y de rojo de cada uno de los 44 controladores que ya fueron ejemplificados en el apartado 8.1.2.2 y que se encuentran también dentro de los anexos. Los volúmenes horarios de automóviles por calle o avenida y de los usuarios se ejemplifican en la Figura 8.12 pero todos los valores ya fueron presentados en las Tablas 8.5 y 8.6:

Count...	No	Name	Link	Volume(0)	VehComp(0)
66	66	Autos_Perpetua_EB	73: EB_Perpetua_1	300.0	4: Autos
67	67	Autos_Rio_Mixcoac_WB	83: WB_Rio_Mixcoac_1	776.0	4: Autos
68	68	Autos_Anillo_Rio_Mix...	81: Anillo_Rio_Mixcoac	100.0	4: Autos
69	69	Autos_Rio_Mixcoac_EB	85: EB_Rio_Mixcoac_2	320.0	4: Autos
70	70	Autos_Ma_de_la_Luz_...	89: WB_Maria_de_la_Luz_Bri...	856.0	4: Autos
71	71	Autos_Algeciras_EB	93: EB_Algeciras_1	644.0	4: Autos
72	72	Autos_Felix_Cuevas_...	97: WB_Felix_Cuevas_2	1700.0	4: Autos
73	73	Autos_Millet_WB	104: WB_Millet_1	320.0	4: Autos

Figura 8.12: Volúmenes horarios de automóviles por calle y de usuarios.

Fuente: Captura de pantalla del software VISSIM 11.

Dentro de las distribuciones de tiempo se creó una distribución normal (MB_10s) que representa el tiempo del autobús desde que llega a la estación, se abren las puertas y se cierran. Su media es de 12 s con una desviación estándar de 0 s. Otras distribuciones que se utilizaron representan la distribución de velocidad deseada. Esto quiere decir que cuando la unidad de Metrobús no se ve obstaculizada por otras unidades o semáforos, su velocidad deseada a alcanzar es de 45 km/h pero normalmente llevan una velocidad promedio entre 24 km/h (como límite inferior) y 27 km/h (como límite superior). De igual forma, se crearon distribuciones de velocidad para las áreas de reducción de velocidad en las estaciones, en la única curva al entrar a la glorieta de Insurgentes y en los pasos a desnivel (Río Mixcoac y Presidente Miguel Alemán). Los límites establecidos respectivos fueron los siguientes: 8 km/h, 14 km/h y 16 km/h.

Para las distribuciones de aceleración y desaceleración, en la Figura 8.13, se modificaron las curvas preestablecidas por el programa y se ajustaron con base en los datos tomados en campo.

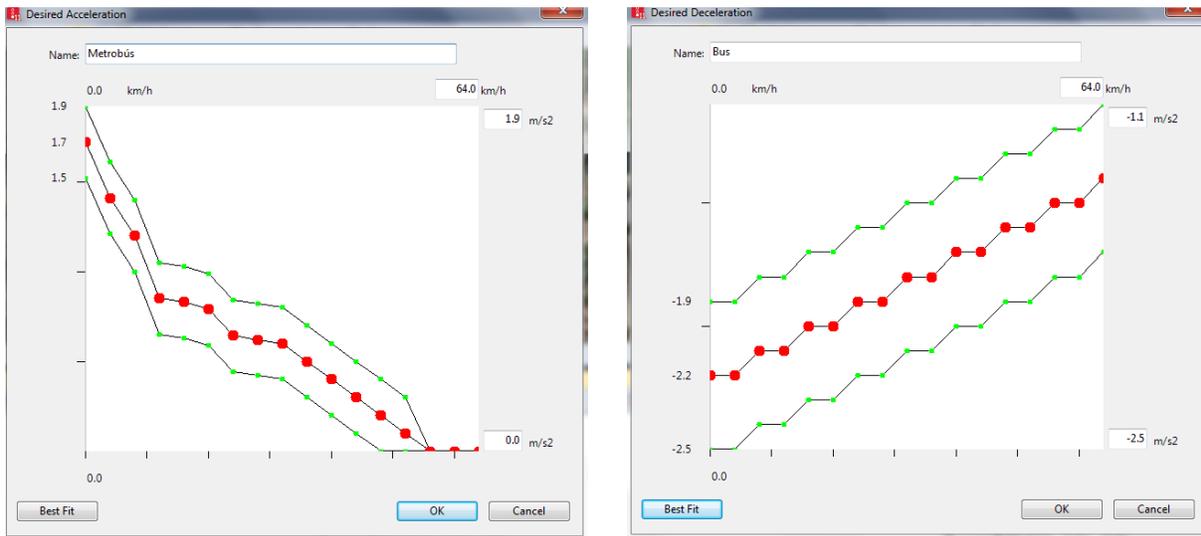


Figura 8.13: Distribuciones de aceleraciones y desaceleraciones.

Fuente: Captura de pantalla del software VISSIM 11.

Para las velocidades de los peatones se utilizó la recomendada por el programa (5 km/h) y para la de los automóviles se tomó el máximo límite permisible establecido para la Av. de los Insurgentes (50 km/h). Esto se muestra en la siguiente Figura:

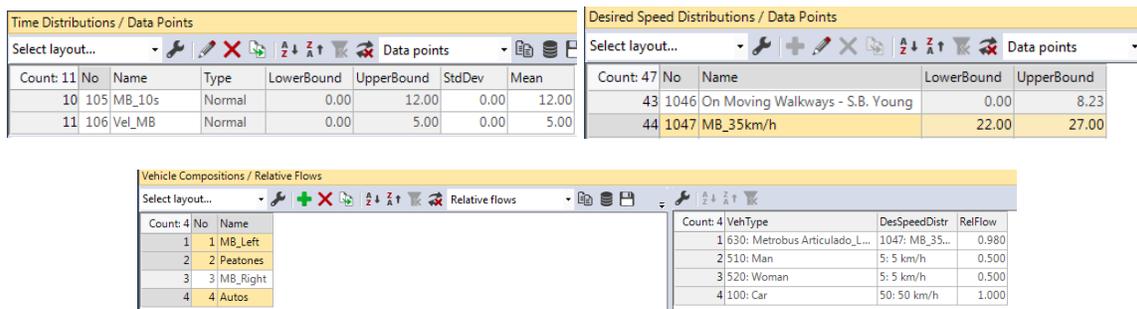


Figura 8.14: Distribuciones normales de tiempo / Velocidades de Metrobús, de automóviles y de peatones.

Fuente: Captura de pantalla del software VISSIM 11.

Para contar aproximadamente con los resultados de 8 unidades que logren recorrer el tramo completo en ambas direcciones dentro de la hora de simulación, se ingresaron 8 autobuses con sus capacidades prácticamente en su límite máximo y con los intervalos de tiempo que se visualiza en la Figura 8.15. Dichos intervalos son el resultado de promediar la entrada de unidades del Metrobús autobuses al sistema en campo y su valor se muestra en la misma figura.

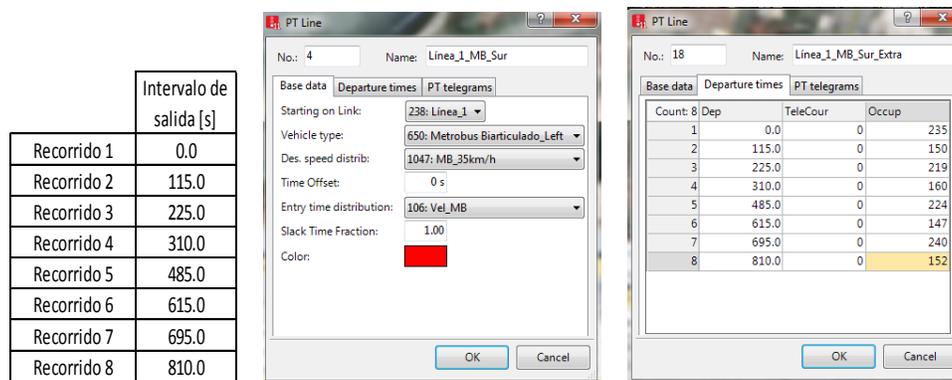


Figura 8.15: Número de camiones de la flota del Metrobús que entran al sistema con su intervalo de salida.

Fuente: Captura de pantalla del software VISSIM 11.

Todo vehículo tiene, al llegar a una intersección, varias posibilidades de movimientos. Para que dichos movimientos no sean aleatorios, se asignaron flujos relativos para las decisiones de ruta estáticas para vehículos. En la Figura 8.16 se ejemplifica esto. La decisión de ruta número 7 (NB_Insurg_Int.#13) cuenta con tres posibles movimientos que se encuentran seleccionados del lado derecho con los números 5, 6 y 7 los cuales están ligados a dicha decisión. En el extremo derecho podemos observar los flujos relativos asignados a cada uno de los tres movimientos. Cuando cien vehículos atraviesen la intersección, 14 de ellos optaran por el primer movimiento, 70 de ellos por el segundo mientras que los restantes 16 vehículos deberán optar por el último movimiento.

Static Vehicle Routing Decisions / Static Vehicle Routes															
Count	No	Name	Link	Pos	AllVehTypes	VehCla...	RouteChoi	Count	VehRoutDec	No	N...	F...	DestLink	DestPos	RelFlow(0)
4	4	NB_Insurg_Int#9	35: NB_Olivo_1	23.675	<input checked="" type="checkbox"/>		Static	3	NB_Insurg_Int#11	3			57: EB_...	13.123	0.120
5	5	NB_Insurg_Int#10	39: NB_Olivo_2	18.405	<input checked="" type="checkbox"/>		Static	4	NB_Insurg_Int#11	4			51: NB_...	19.137	0.820
6	6	NB_Insurg_Int#11	44: NB_Francia_1	26.983	<input checked="" type="checkbox"/>		Static	5	NB_Insurg_Int#13	1			74: EB_F...	35.849	0.140
7	7	NB_Insurg_Int#13	51: NB_José_Ma...	21.501	<input checked="" type="checkbox"/>		Static	6	NB_Insurg_Int#13	2			75: NB_...	8.769	0.700
8	8	NB_Insurg_Int#14	75: NB_Teatro_In...	10.971	<input checked="" type="checkbox"/>		Static	7	NB_Insurg_Int#13	3			10091:...	7.687	0.160
9	9	NB_Insurg_Int#15	75: NB_Teatro_In...	184.7...	<input checked="" type="checkbox"/>		Static	8	NB_Insurg_Int#14	1			82: EB_...	35.777	0.150
10	10	NB_Insurg_Int#17	77: NB_Rio_Chur...	8.891	<input checked="" type="checkbox"/>		Static	9	NB_Insurg_Int#14	3			75: NB_...	181.310	0.600

Figura 8.16: Flujos relativos para las decisiones de ruta estáticas para vehículos.

Fuente: Captura de pantalla del software VISSIM 11.

Cuando se ejecuta el programa y se inicia la simulación, las primeras dos unidades de Metrobús entran a la red en los extremos de la misma. A partir de ese momento, con los intervalos de tiempo establecidos, salen los restantes autobuses. Para que las condiciones de los tiempos de luz verde de los controladores de señal no sean siempre las mismas para dichas unidades, se realizaron 8 corridas en donde en cada una, se le suman 15 segundos a la salida de la flota. Esto se explica muy fácil: en la primera simulación los autobuses entran a la red en el tiempo 0.0 s, en la segunda simulación, entran a la red en el tiempo 15.0 s, en la tercera, en el tiempo 30.0 s y así sucesivamente hasta llegar al tiempo 120.0 s. Dichas simulaciones se efectúan para la hora pico de la mañana y para la hora pico de la tarde.

Los resultados de las 8 simulaciones por hora pico y por dirección se muestran a continuación en las Figuras 8.17 y 8.18:

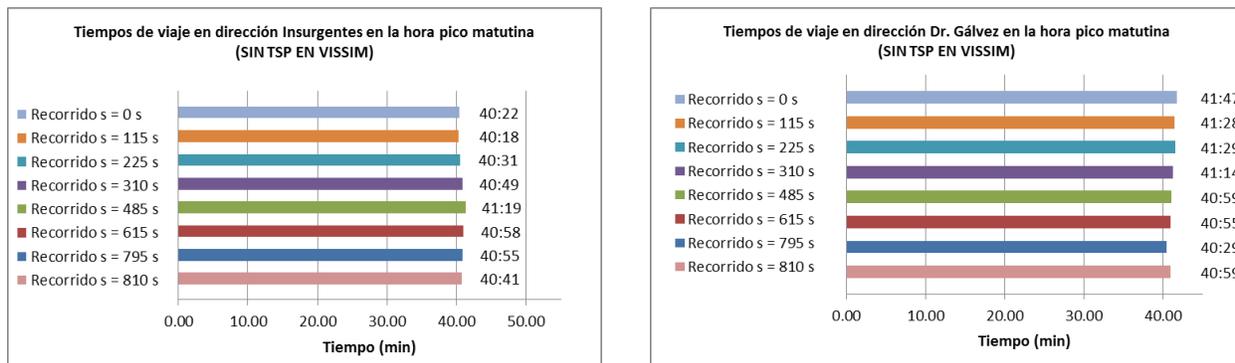


Figura 8.17: Resultados de los tiempos promedio de viaje en ambas direcciones en la hora pico AM.

Fuente: Elaboración propia.

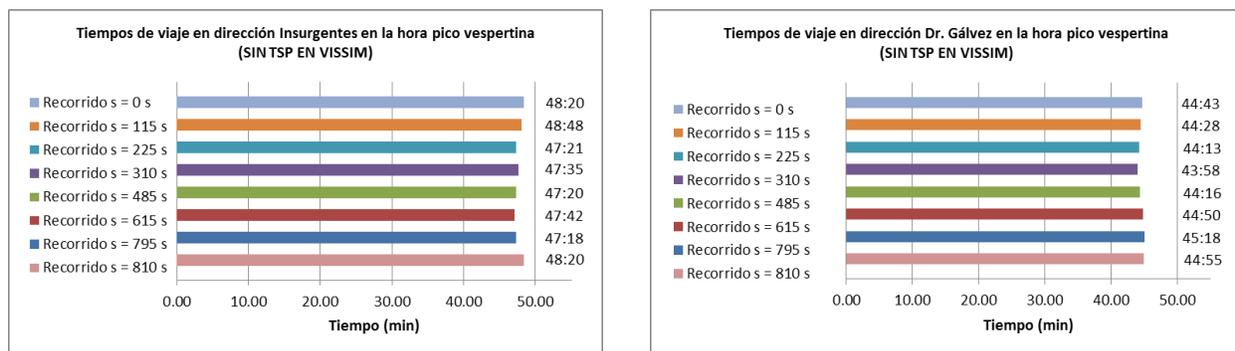


Figura 8.18: Resultados de los tiempos promedio de viaje en ambas direcciones en la hora pico PM.

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los resultados de los tiempos totales de viaje arrojados por las simulaciones se observa que, para ambos sentidos y ambas horas pico, estos se asemejan mucho a los trayectos realizados en campo. En la hora pico de la mañana los trayectos en campo en dirección Insurgentes tuvieron un promedio de 40.21 minutos aproximadamente y en dirección Dr. Gálvez se obtuvieron dos rangos de 41.17 y de 46.83 minutos. Para simplificar el análisis, solamente se considerará el primer rango. Durante la simulación los valores de tiempo de viaje fueron de 40.73 y 41.17 minutos respectivamente. Para la hora pico de la tarde, el promedio de viaje en campo en dirección Insurgentes fue de 48.1 minutos y en dirección Dr. Gálvez de 44.46 minutos mientras que al simular los valores promedios fueron de 47.67 y 44.55 minutos, respectivamente.

Una vez que se cuenta con los resultados simulados y observados, se prosigue a calcular las medidas de bondad de ajuste propuestas por Spiegelman C., Sug Park E. y Rilett L. en su libro *Transportation statistics and microsimulation*: error absoluto medio (MAE) (8.1), error absoluto

medio porcentual (MAPE) (8.2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) (8.3) por sus siglas en inglés.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - E_i| \quad (8.1)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|O_i - E_i|}{O_i} \quad (8.2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2} \quad (8.3)$$

donde:

- O_i Medidas de rendimiento (tiempos de viaje en este caso) observadas en campo.
- E_i Medidas de rendimiento (tiempos de viaje en este caso) estimadas al simular.
- N Número total de observaciones.

Al calcular las medidas de bondad de ajuste de los tiempos de viaje se creó la Tabla 8.7:

Hora pico	Dirección	MAE	MAPE	RMSE
AM	Insurgentes	1.93	5%	0.30
	Dr. Gálvez	3.06	7%	0.26
PM	Insurgentes	2.69	5%	0.22
	Dr. Gálvez	3.84	8%	0.28

Tabla 8.7: Resultados de las medidas de bondad de ajuste calculadas.

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los valores de las medidas de bondad de ajuste calculadas, el valor de la MAPE, que deriva del MAE, es el más sencillo a evaluar pues tiene un significado físico: estima el error como una proporción del promedio observado. Por otro lado, la RMSE es siempre positiva, y un valor de 0 indicaría un ajuste perfecto a los datos. En general, una RECM más baja es mejor que una más alta y como la misma se calcula respecto a la media, su valor indica que tanto los valores simulados se alejaron de ella. Así entonces, se observa que el modelo simulado difiere de lo real en 5%, 7%, 5% y 8% dependiendo la hora pico y la dirección, como se muestra en la Tabla 8.7. Al ser todos los porcentajes inferiores a 10%, teniendo RMSE cercanas a cero (existe una desviación de la media de aproximadamente 20 segundos) y teniendo en cuenta los factores que influyen dentro de los tiempos de viaje que fueron previamente mencionados, se concluye que el modelo es válido para continuar con la instalación del sistema TSP.

De igual forma, el programa proporciona el número de altos totales por dirección y por hora pico y a partir de ello se contabilizó el tiempo de espera en luz roja de las unidades del MB para poder comparar nuevamente dichos tiempos con los obtenidos en campo expuestos en las Figuras 8.7 y 8.8. En la Figura 8.19 se observa que los datos arrojados por el programa son muy parecidos a los de campo; son las mismas intersecciones entre las estaciones que presentan el mayor número de altos y por lo mismo el mayor tiempo muerto.

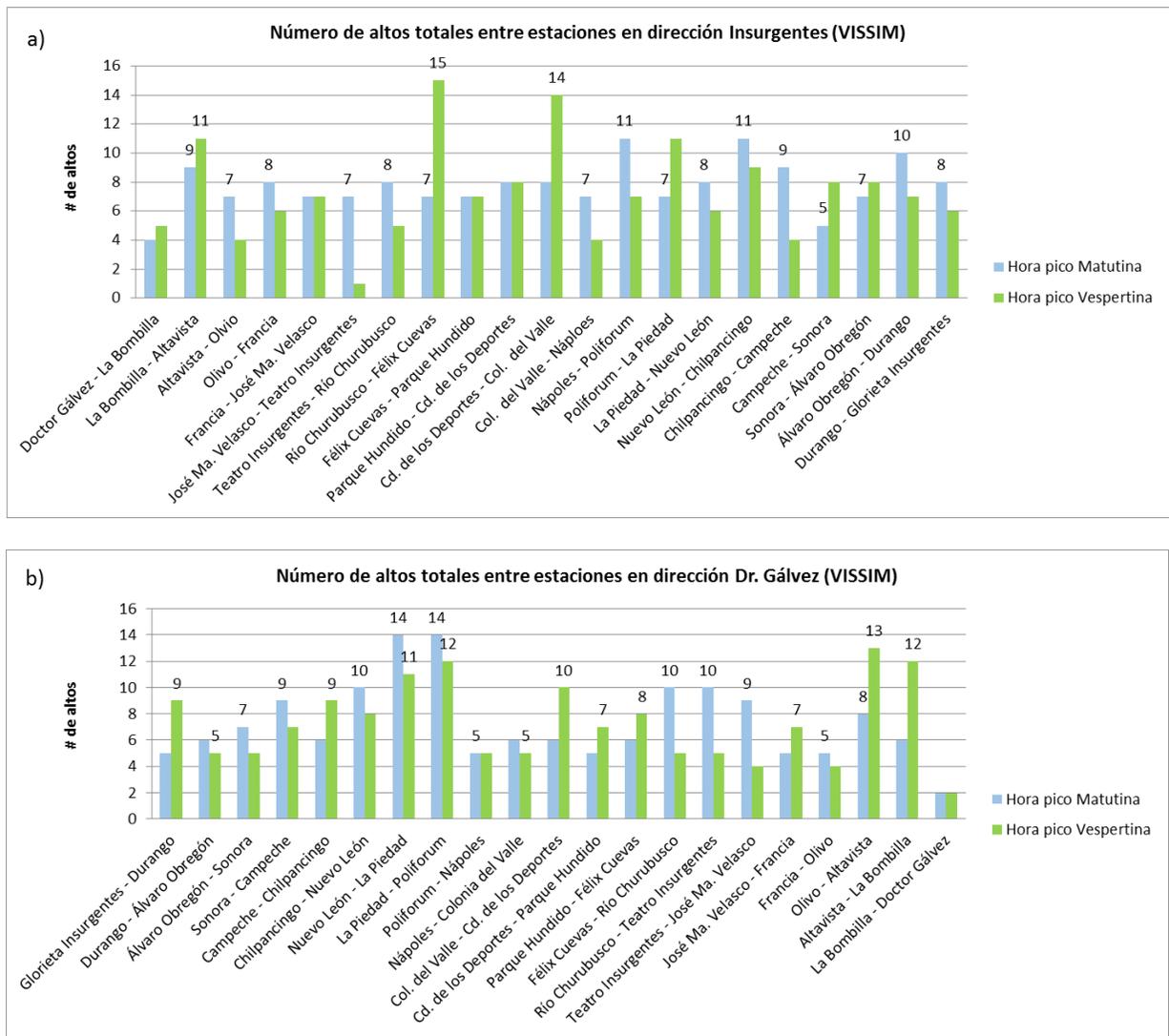


Figura 8.19: a) Número total de altos a lo largo del tramo en dirección Insurgentes en ambas horas pico.

b) Número total de altos a lo largo del tramo en dirección Dr. Gálvez en ambas horas pico.

Fuente: Elaboración propia.

Para los tiempos totales de espera en luz roja existen pequeñas variaciones con respecto a la realidad. La figura 8.20 muestra que, en dirección Insurgentes, el promedio simulado fue de 10 minutos con 58 segundos comparado con el de campo que fue de 12 minutos y 14 segundos. En dirección Dr. Gálvez los resultados fueron 9 minutos y 22 segundos contra 11 minutos con 54

segundos. Dicha diferencia puede relacionarse con la forma de conducción de los choferes. Hay ocasiones en las que el chofer acelera cuando el semáforo muestra el último segundo de luz ámbar y logra pasar pero dentro del programa, el chofer siempre respeta dicho señalamiento y se detiene.

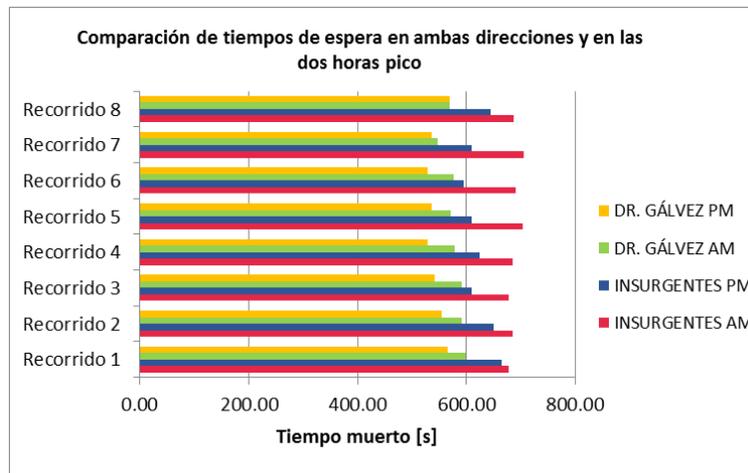


Figura 8.20: Comparación de tiempos de espera arrojados por VISSIM en ambas direcciones y en las dos horas pico.
Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de los escenarios, se hará uso de otros datos como lo son las emisiones de algunos GEI, la demora por automóvil y por usuario y la generación máxima de colas en el sistema. Por el momento no se muestran los resultados debido a que se realizarán comparaciones entre el primer escenario y los dos escenarios con prioridad por lo que los resultados se muestran más adelante. A continuación se explica brevemente cada rubro:

Dentro del análisis de nodos, VISSIM calcula las emisiones de CO y de NOX así como el consumo de combustible. Se debe aclarar que los resultados de las emisiones de CO y de NOX arrojados por el análisis de los nodos se basan en fórmulas estándar para valores de consumo de vehículos de TRANSYT 7-F, un programa para optimizar los tiempos de señal, así como datos sobre emisiones del Laboratorio Nacional de Oak Ridge del Departamento de energía de los EE. UU. Los datos se refieren a una flota de vehículos típica de este país y no se diferencian los tipos de vehículos individuales. Es por ello que dichos resultados se utilizaran únicamente para una comparación simple de las emisiones producidas en los diferentes escenarios.

Para que la comparación entre la demora de los usuarios que ocupan un automóvil y los que ocupan el metrobús sea la adecuada, se utiliza la demora por persona y no la demora por vehículo, en la cual se está considerando que un automóvil tiene un factor de ocupación de 1.5 mientras que un autobús articulado tiene un factor de 160 y uno biarticulado de 240.

Finalmente para conocer el impacto negativo que el sistema puede tener dentro del tránsito en general, se muestran los analizan las colas máximas generadas de 3 de las intersecciones más críticas para posteriormente compararlas con los dos escenarios de prioridad.

8.2.6 Experimentación

Una vez validado el modelo, se agregan 258 detectores del tipo “Standard” los cuales se ubicaron a distancias específicas para que los escenarios de extensión o truncamiento de 3 y 5 segundos se cumplieran. Se recuerda que los detectores pueden ser activados únicamente por las unidades de transporte público, en este caso, del Metrobús.

Ahora, los controladores, que anteriormente eran del tipo “tiempo fijo”, se cambiaron al tipo “VAP”. Para poder funcionar, este tipo de controladores necesita dos archivos. El primero, con extensión *.pua, contiene la información referente al señalamiento; es decir, toda la información de las fases de los controladores de tiempo fijo. Por otra parte, el segundo archivo, con extensión *.vap, contiene toda la lógica de control de la programación. Para generar a este último se utilizó la herramienta VisVAP (Visual VAP) que se basa en diagramas de flujo, funciones y comandos de la librería VAP.

Para generar los diagramas de flujo se tomaron dos tipos intersecciones base: intersecciones de dos fases y de más de dos fases. En ambos casos y debido a que existe un tiempo de desplazamiento de inicio de la luz verde (offset) entre las intersecciones y que los controladores VAP no toman en cuenta el parámetro offset, el cual si es respetado en los controladores de tiempo fijo, se optó por introducir dos variables (*Contador* y *Contador1*) y una condicional “*Init*” para resolver el problema. A partir de esto se logró contabilizar los ciclos de los semáforos y así lograr que el offset se cumpliera y que cuando una estrategia de prioridad fuera otorgada, los ciclos permanecieran en 120 segundos y no aumentaran o disminuyeran. Finalmente, se adecuaron los tiempos en cada diagrama de flujo y se verificó su funcionamiento para cada uno de los controladores de las 44 intersecciones.

Se explican brevemente las funciones y variables empleadas dentro de los diagramas y se recuerda que la jerarquización del diagrama de flujo siempre va de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha y que cada ejecución del diagrama corresponde a un segundo simulado.

Se empieza con la condicionante *Init=0* con el fin de que las variables *Contador* y *Contador(1)* inicien a contar desde un valor predeterminado equivalente al offset correspondiente y además permiten conocer cada segundo del ciclo. Una vez iniciados los contadores, se le asigna a la variable *Init* el valor de uno; por lo que en el resto de la simulación, la condicionante siempre va a ser negativa. La función de la librería VAP que permiten inicializar desde cero las variables es *Start(<Timer>)* mientras que *Start_at(<Timer_var>, <Value>)* permite inicializar a las variables desde un valor deseado.

Se continua con otra condicionante que pregunta el estado actual de la señal mediante la función *Current_State*(*<no>*,*<display>*) donde *<no>* representa el número de la fase dentro del controlador y *<display>* la indicación de señal; por ejemplo, verde. Para la duración de las fases y la activación de algún detector se emplean condicionantes donde se introducían expresiones con las funciones *Contador>=DuraciónFase* para preguntar si la variable *Contador* ha superado el valor asignado a una fase y *Detection*(*<no>*) donde *<no>* hace referencia al número de puerto del detector. La expresión para un detector funciona de manera muy simple: se activa cuando una unidad de MB se encuentra encima del detector.

Finalmente se utilizan asignaciones colocadas después de una condicionante las cuales, mediante un rectángulo, indican el cambio de una fase a otra con las funciones *Set_sg_direct*(*<no>*,*<display>*) e *Interstage*(*<fromStage>*,*<toStage>*). La primera cambia la señal de la fase número *<no>* a la señal *<display>* directamente (sin pasar por la señal de ámbar) mientras que la segunda indica el cambio entre dos fases. Por último, el reinicio de los ciclos a cero se logra con la función *Start_at*(*<Timer_var>*,*<Value>*) en donde se le asigna el valor *<Value>* a la variable deseada.

Las Figuras 8.21 y 8.22 muestran los diagramas de flujo de ambos casos.

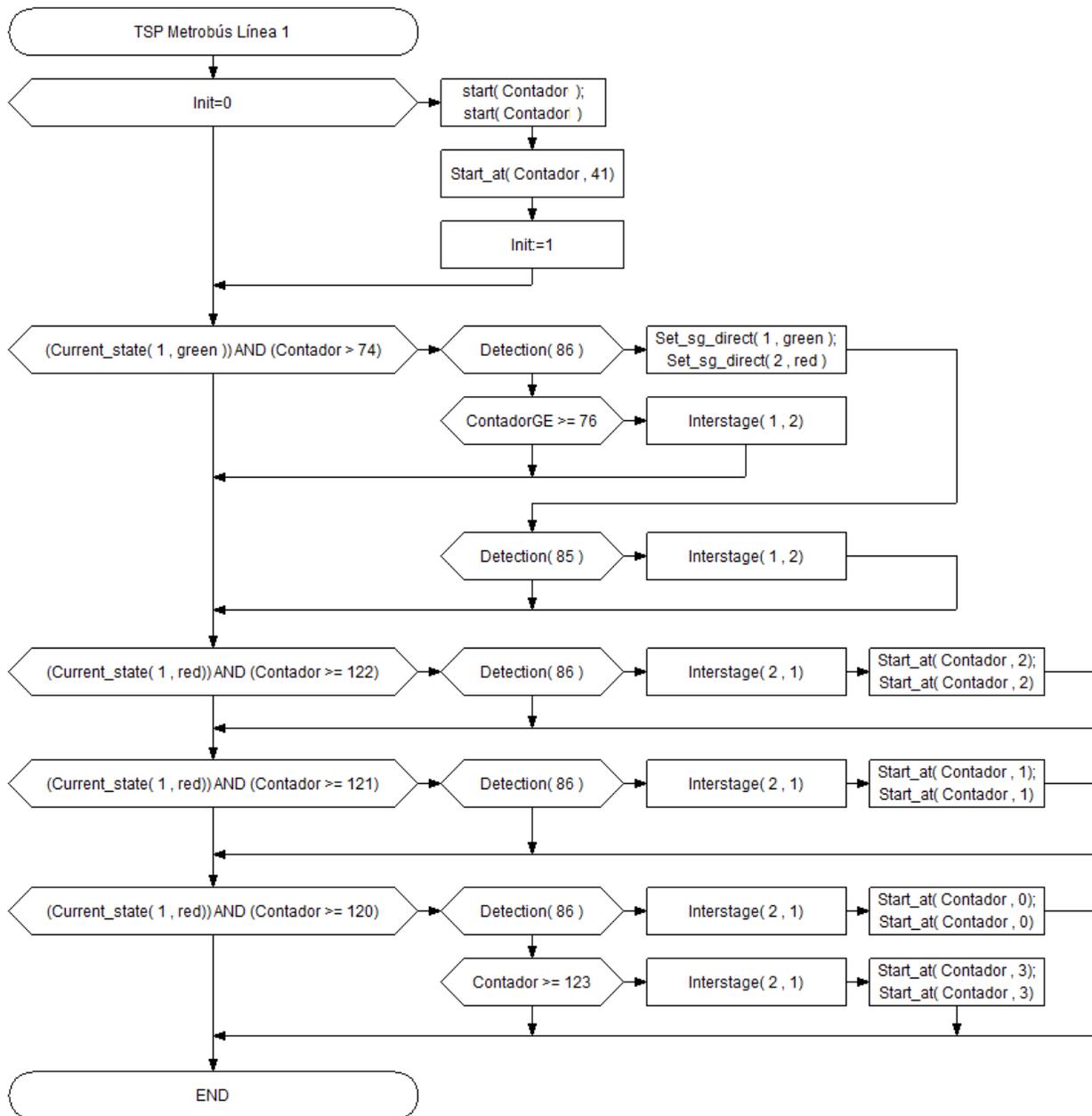


Figura 8.21: Diagrama de flujo para dos fases.
Fuente: Elaboración propia a partir de VisVAP.

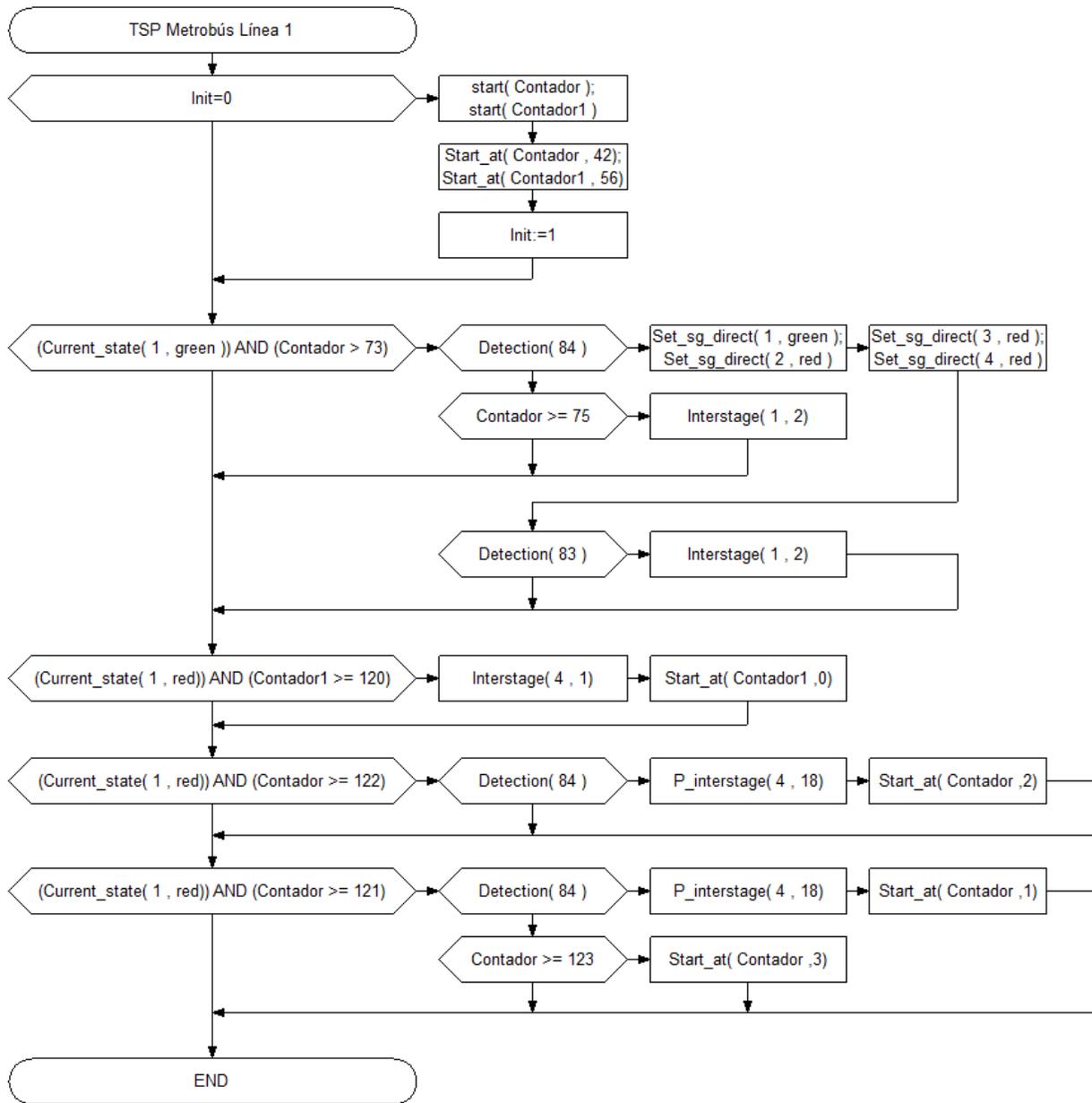


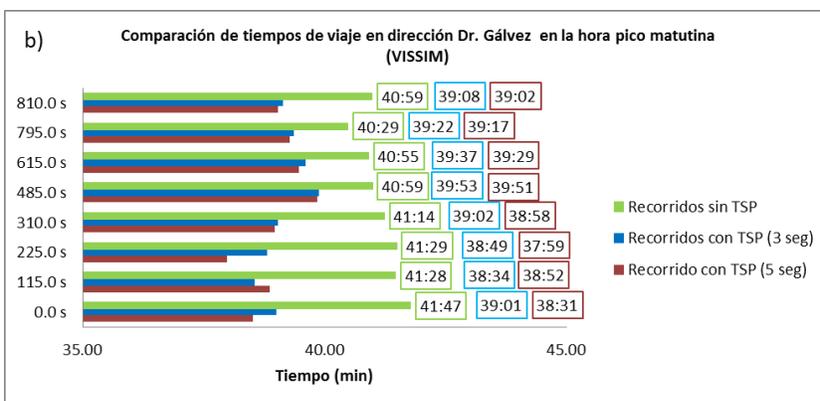
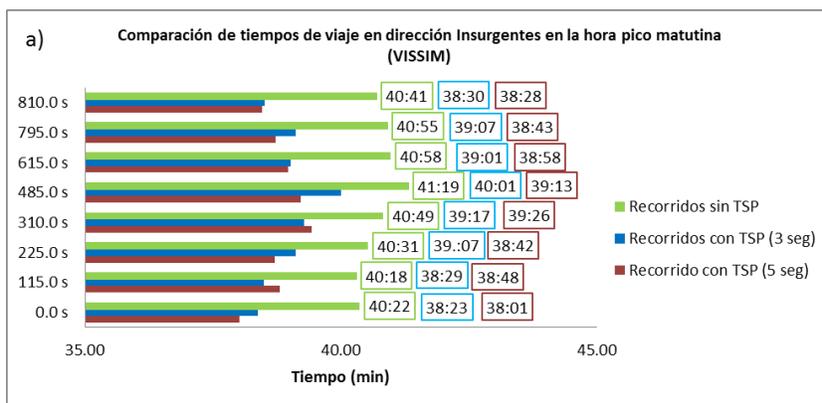
Figura 8.22: Diagrama de flujo para más de dos fases.
Fuente: Elaboración propia a partir de VisVAP.

8.2.7 Interpretación

Una vez instalado el sistema TSP en el tramo de estudio y validado su funcionamiento, se corrió el programa nuevamente ocho veces por dirección y por hora pico. Los resultados con sus análisis correspondientes se muestran divididos según las evaluaciones de las estrategias de control de prioridad en: desempeño del autobús respecto a sus tiempos de viaje, a sus tiempos de espera en intersección debido a luz roja, a su velocidad y a sus emisiones de gases y otros compuestos. También se evalúa el desempeño del tránsito en general valorando el impacto negativo que puede existir a partir de la demora por vehículo y por pasajero. Para cerrar, se describe una breve evaluación económica y evaluación en la calidad del servicio.

TIEMPOS DE VIAJE

Los resultados obtenidos se dividen en cuatro gráficos, contenidos en las Figuras 8.23 y 8.24, según la hora pico y la dirección de recorrido.



AHORRO DEL TIEMPO DE VIAJE EN AMBOS ESCENARIOS EN HORA PICO MATUTINA		
Dirección Insurgentes		
Intervalo de salida	Tiempo ahorrado promedio (TSP 3 SEG) [s]	Tiempo ahorrado promedio (TSP 5 SEG) [s]
0.0 s	119.01	140.94
115.0 s	108.40	90.14
225.0 s	84.68	109.24
310.0 s	91.81	83.25
485.0 s	78.46	125.73
615.0 s	116.92	119.41
795.0 s	107.12	131.34
810.0 s	131.50	133.66
PROMEDIO	104.74	116.71

AHORRO DEL TIEMPO DE VIAJE EN AMBOS ESCENARIOS EN HORA PICO MATUTINA		
Dirección Dr. Gálvez		
Intervalo de salida	Tiempo ahorrado promedio (TSP 3 SEG) [s]	Tiempo ahorrado promedio (TSP 5 SEG) [s]
0.0 s	166.60	195.69
115.0 s	174.72	156.54
225.0 s	160.34	210.20
310.0 s	132.59	136.86
485.0 s	66.53	68.69
615.0 s	78.08	86.07
795.0 s	67.60	72.08
810.0 s	111.13	116.89
PROMEDIO	119.70	130.38

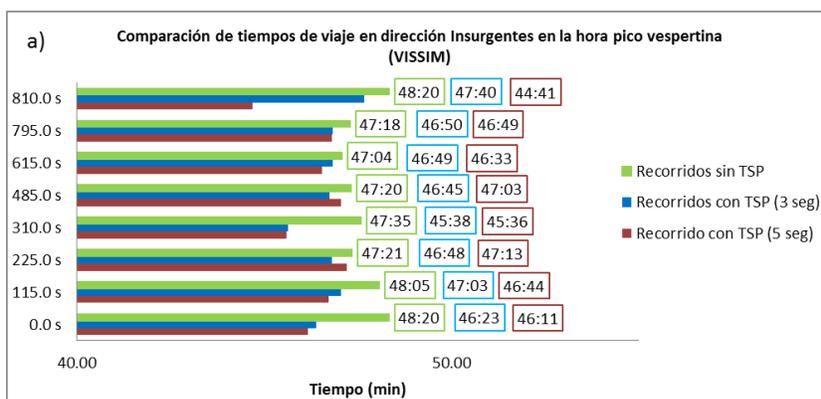
Figura 8.23: a) Comparación de tiempos de viaje en dirección Insurgentes en la hora pico matutina (VISSIM).
 b) Comparación de tiempos de viaje en dirección Dr. Gálvez en la hora pico matutina (VISSIM).

Tabla 8.8: Ahorros en los tiempos de viaje en ambos sentidos en la hora pico matutina.

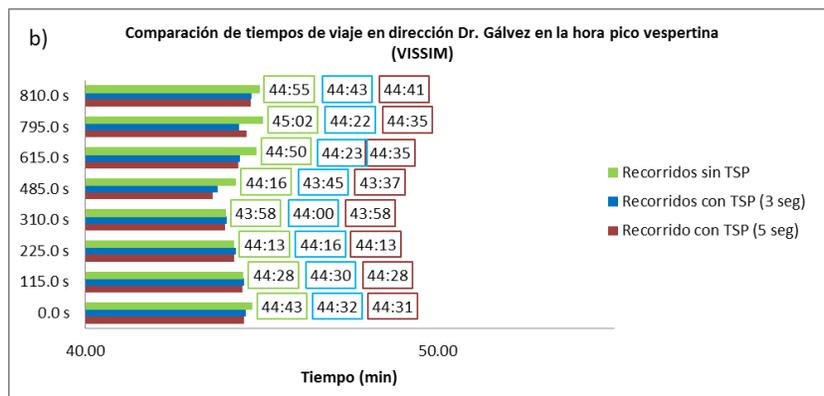
Fuente: Elaboración propia.

Para la hora pico de la mañana en dirección Insurgentes se obtuvo un promedio en el tiempo total de viaje de 41:10 mientras que para los dos escenarios de prioridad se obtuvieron tiempos de viaje de 39:11 y 39:00 respectivamente. Calculando el ahorro en el tiempo de viaje para los escenarios “CON TSP 3 SEG” y “CON TSP 5 SEG”, y como se puede leer en la tabla superior derecha, con el escenario de prioridad de 3 segundos se redujeron los tiempos de viaje en 104.74 segundos aproximadamente mientras que para el segundo escenario con prioridad de 5 segundos, los tiempos se redujeron hasta los 116.71 segundos.

En dirección Dr. Gálvez los promedios del tiempo total de viaje para los escenarios “SIN TSP”, “CON TSP 3 SEG” y “CON TSP 5 SEG” fueron de 40:44, 38:59 y 38:47, respectivamente. Se calculó nuevamente el ahorro en el tiempo de los viajes y se obtuvo lo siguiente: al implementar la prioridad de 3 segundos, se ahorran 119.7 segundos mientras que con 5 segundos de prioridad el ahorro aumenta hasta los 130.38 segundos.



AHORRO DEL TIEMPO DE VIAJE EN AMBOS ESCENARIOS EN HORA PICO VESPERTINA		
Dirección Insurgentes		
Intervalo de salida	Tiempo ahorrado promedio (TSP 3 SEG) [s]	Tiempo ahorrado promedio (TSP 5 SEG) [s]
0.0 s	117.22	129.35
115.0 s	62.19	81.50
225.0 s	33.10	8.26
310.0 s	117.17	119.24
485.0 s	35.13	17.24
615.0 s	14.99	31.36
795.0 s	27.92	28.77
810.0 s	40.68	47.71
PROMEDIO	56.05	57.93



AHORRO DEL TIEMPO DE VIAJE EN AMBOS ESCENARIOS EN HORA PICO VESPERTINA		
Dirección Dr. Gálvez		
Intervalo de salida	Tiempo ahorrado promedio (TSP 3 SEG) [s]	Tiempo ahorrado promedio (TSP 5 SEG) [s]
0.0 s	10.60	12.54
115.0 s	-1.68	0.51
225.0 s	-2.39	0.04
310.0 s	-2.24	-0.04
485.0 s	30.88	39.38
615.0 s	26.32	29.60
795.0 s	39.72	26.74
810.0 s	11.98	13.83
PROMEDIO	14.15	15.33

Figura 8.24: a) Comparación de tiempos de viaje en dirección Insurgentes en la hora pico vespertina (VISSIM).

b) Comparación de tiempos de viaje en dirección Dr. Gálvez en la hora pico vespertina (VISSIM).

Tabla 8.9: Ahorros en los tiempos de viaje en ambos sentidos en la hora pico vespertina.

Fuente: Elaboración propia.

Para la hora pico de la tarde en dirección Insurgentes se obtuvieron promedios en el tiempo total de viaje de 47:40, 46:44 y 46:21 para cada uno de los tres escenarios. Calculando el ahorro en el tiempo de viaje para los escenarios “CON TSP 3 SEG” y “CON TSP 5 SEG”, se encontraron reducciones de 56.05 segundos y 57.93 segundos, respectivamente.

En dirección Dr. Gálvez los promedios del tiempo total de viaje para los escenarios “SIN TSP”, “CON TSP 3 SEG” y “CON TSP 5 SEG” fueron de 44:33, 44:19 y 44:18, respectivamente. Al calcular el ahorro en el tiempo de los viajes se encontró que al implementar la prioridad de 3 segundos, se disminuye en 14.15 segundos el viaje mientras que con 5 segundos de prioridad el viaje se reduce en 15.33 segundos.

Es posible que los ahorros en los tiempos de viaje no sean exactamente los mismos a los que se leen en los promedios de tiempos totales de viaje. Esto se debe a que todos los valores mostrados son resultado de promediar todos los resultados de las simulaciones. Existe también la posibilidad, como se presentó en los intervalos 310.0 s y 115.0 s en la mañana y en los intervalos 485.0 s y 225.0 s en la tarde, que el escenario “CON TSP 5 SEG” presente mayores tiempos de viaje que el escenario “CON TSP 3 SEG” y eso se debe a que las unidades de Metrobús del segundo escenario llegaron a ciertas intersecciones unos segundos después que las unidades del tercer escenario, pero justo en el momento que se otorgaba el derecho de paso por lo que no tuvieron que realizar un freno total; mientras que las unidades que llegaron primero, si lo tuvieron, provocando la diferencia en los tiempos de viaje.

Al calcular los porcentajes del ahorro en el tiempo de viaje con respecto a los tiempos totales de viaje, se obtienen reducciones en la hora pico vespertina en dirección Insurgentes de 1.96% con el escenario “CON TSP 3 SEG” y de 2.77% con el escenario “CON TSP 5 SEG” y de 0.53% y 0.57% en dirección Dr. Gálvez respectivamente. Para la hora pico matutina se reducen los tiempos en 4.29% y 4.78% en dirección Insurgentes para los dos escenarios y en dirección Dr. Gálvez los ahorros rondan los valores de 4.85% y 5.28%, respectivamente. Estos valores se presentan en la Tabla 8.10.

AHORRO PORCENTUAL DEL TIEMPO TOTAL DE VIAJE EN HORA PICO MATUTINA			AHORRO PORCENTUAL DEL TIEMPO TOTAL DE VIAJE EN HORA PICO VESPERTINA		
Escenario	CON TSP 3 SEG	CON TSP 5 SEG	Escenario	CON TSP 3 SEG	CON TSP 5 SEG
Dirección Insurgentes	4.29%	4.78%	Dirección Insurgentes	1.96%	2.77%
Dirección Dr. Gálvez	4.85%	5.28%	Dirección Dr. Gálvez	0.53%	0.57%

Tabla 8.10: Ahorro porcentual del tiempo total de viaje para ambas horas pico.

Fuente: Elaboración propia.

TIEMPOS DE ESPERA EN INTERSECCIÓN DEBIDO A LUZ ROJA

Para cuantificar la disminución del tiempo en que las unidades del MB pasan en luz roja, se comparan y se ilustran los tres escenarios para la hora pico de la mañana en la Figura 8.25 y sus valores en la Tabla 8.11. Como se lee en la tabla, los escenarios 2 y 3 en dirección Insurgentes representan disminuciones en los tiempos muertos de 61 s y 83 s, respectivamente. En dirección Dr. Gálvez, los ahorros suben a 98 s y 106 s. Dichos valores, comparados con los ahorros en los tiempos totales de viajes al implementar el sistema TSP, representan aproximadamente de un 50% a 80%.

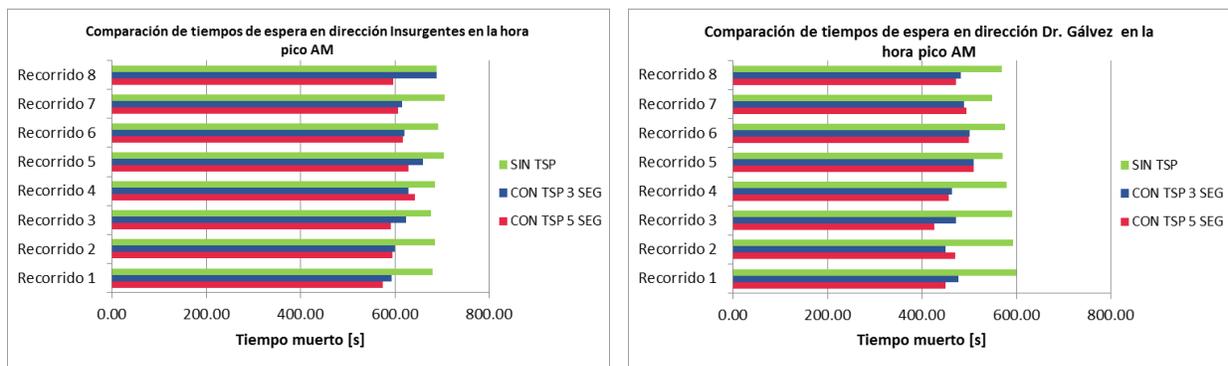


Figura 8.25: Comparación de tiempos de espera en ambas direcciones en la hora pico matutina.

Fuente: Elaboración propia.

COMPARACIÓN DE TIEMPOS DE ESPERA EN HORA PICO MATUTINA						
Dirección	INSURGENTES			DR. GÁLVEZ		
	Tiempo promedio de espera [s]			Tiempo promedio de espera [s]		
Escenario	SIN TSP	CON TSP 3 SEG	CON TSP 5 SEG	SIN TSP	CON TSP 3 SEG	CON TSP 5 SEG
Promedio	689.28	628.16	606.27	578.13	480.22	471.98
Ahorro [s]		61.13	83.02		97.91	106.14

Tabla 8.11: Comparación de tiempos de espera en ambas direcciones en la hora pico matutina.

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, para la hora pico de la tarde (Figura 8.26), las disminuciones en los tiempos muertos de los escenarios 2 y 3 en dirección Insurgentes representan de 43 s y 46 s, respectivamente. En dirección Dr. Gálvez, los ahorros rondan los 6 s y 9 s. Dichos valores, comparados con los ahorros en los tiempos totales de viajes al implementar el sistema TSP, representan aproximadamente de un 40% a 80% y se observan en la Tabla 8.12.

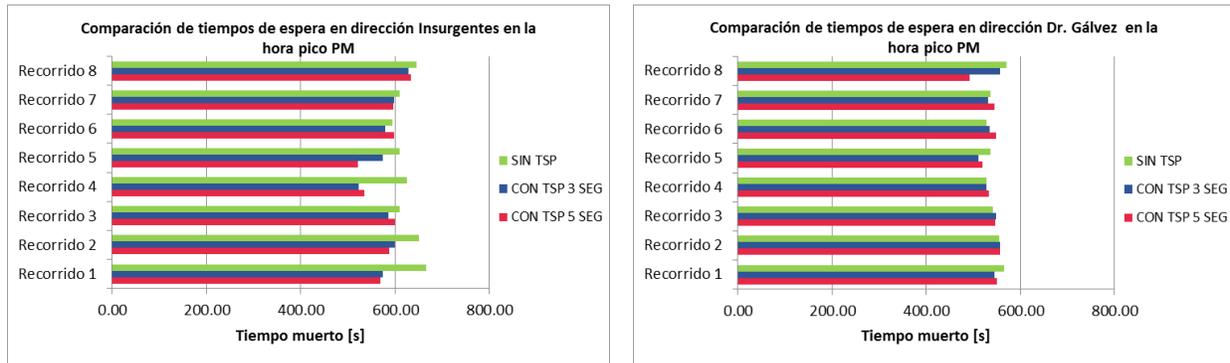


Figura 8.26: Comparación de tiempos de espera en ambas direcciones en la hora pico vespertina.

Fuente: Elaboración propia.

COMPARACIÓN DE TIEMPOS DE ESPERA EN HORA PICO VESPERTINA						
Dirección	INSURGENTES			DR. GÁLVEZ		
	Tiempo promedio de espera [s]			Tiempo promedio de espera [s]		
Escenario	SIN TSP	CON TSP 3 SEG	CON TSP 5 SEG	SIN TSP	CON TSP 3 SEG	CON TSP 5 SEG
Promedio	625.86	582.65	579.89	544.95	539.05	536.42
Ahorro [s]		43.22	45.97		5.91	8.53

Tabla 8.12: Comparación de tiempos de espera en ambas direcciones en la hora pico vespertina.

Fuente: Elaboración propia.

VELOCIDADES

Para entender el cambio en el comportamiento de la velocidad de las unidades del Metrobús antes y después de la implementación del sistema TSP, se muestran las gráficas de velocidad contra distancia recorrida en las Figuras 8.27 y 8.28. Como el comportamiento de las tres curvas es muy similar en todos los recorridos, se muestran solamente dos de ellas en donde se puede apreciar en color azul el escenario “SIN TSP”, en color rojo el escenario “CON TSP 3 SEG” y, por último, el escenario “CON TSP 5 SEG” en color verde. Adicionalmente se muestran dos acercamientos de las curvas donde se puede observar claramente como la velocidad se mantiene constante en los escenarios con TSP mientras que en el escenario sin TSP, la velocidad cae.

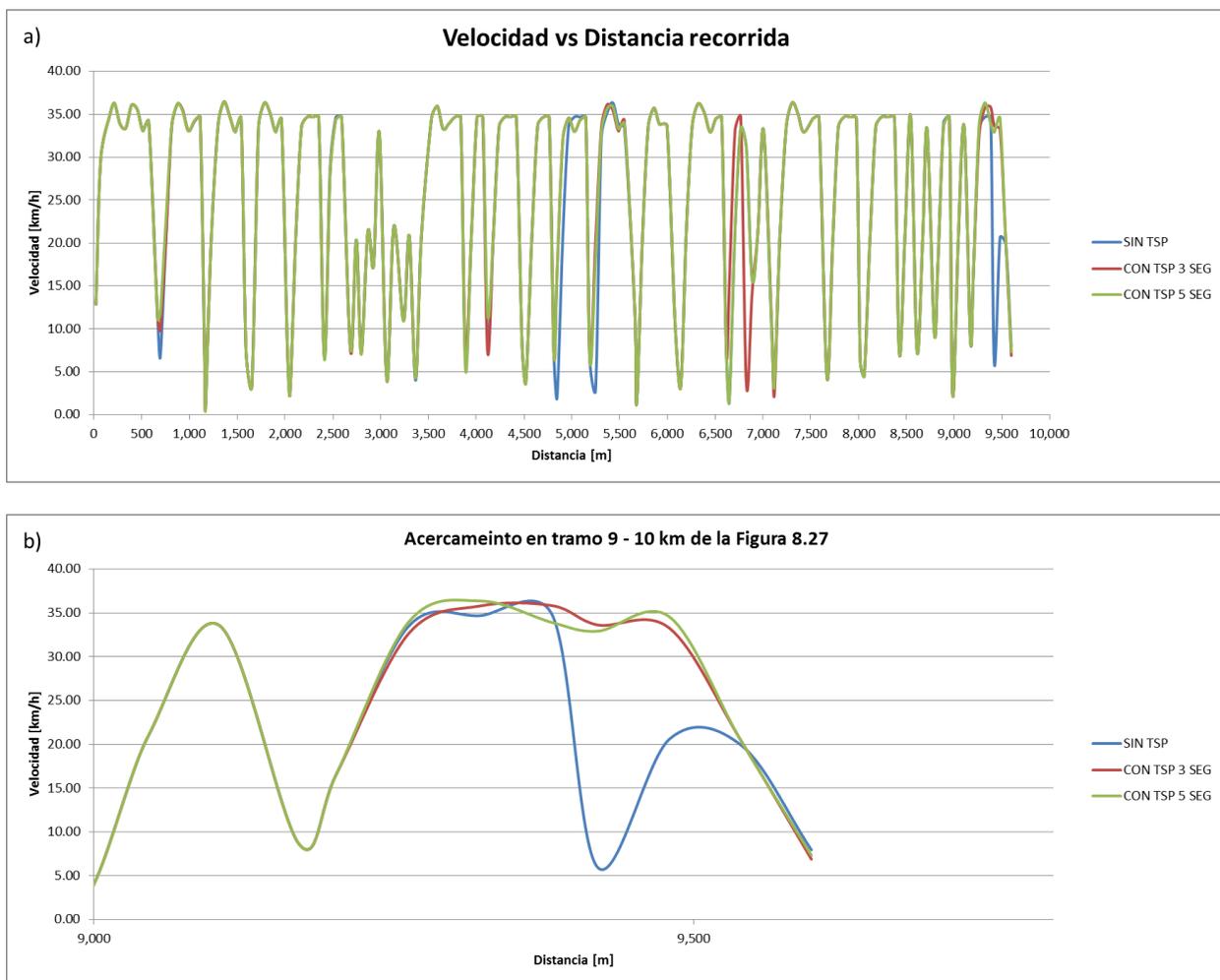


Figura 8.27: a) Gráfica velocidad vs distancia para los tres escenarios del recorrido 1 en dirección Insurgentes en la hora pico matutina. b) Acercamiento en el tramo de 9,000 m a 9,800 m de la grafica a).

Fuente: Elaboración propia.

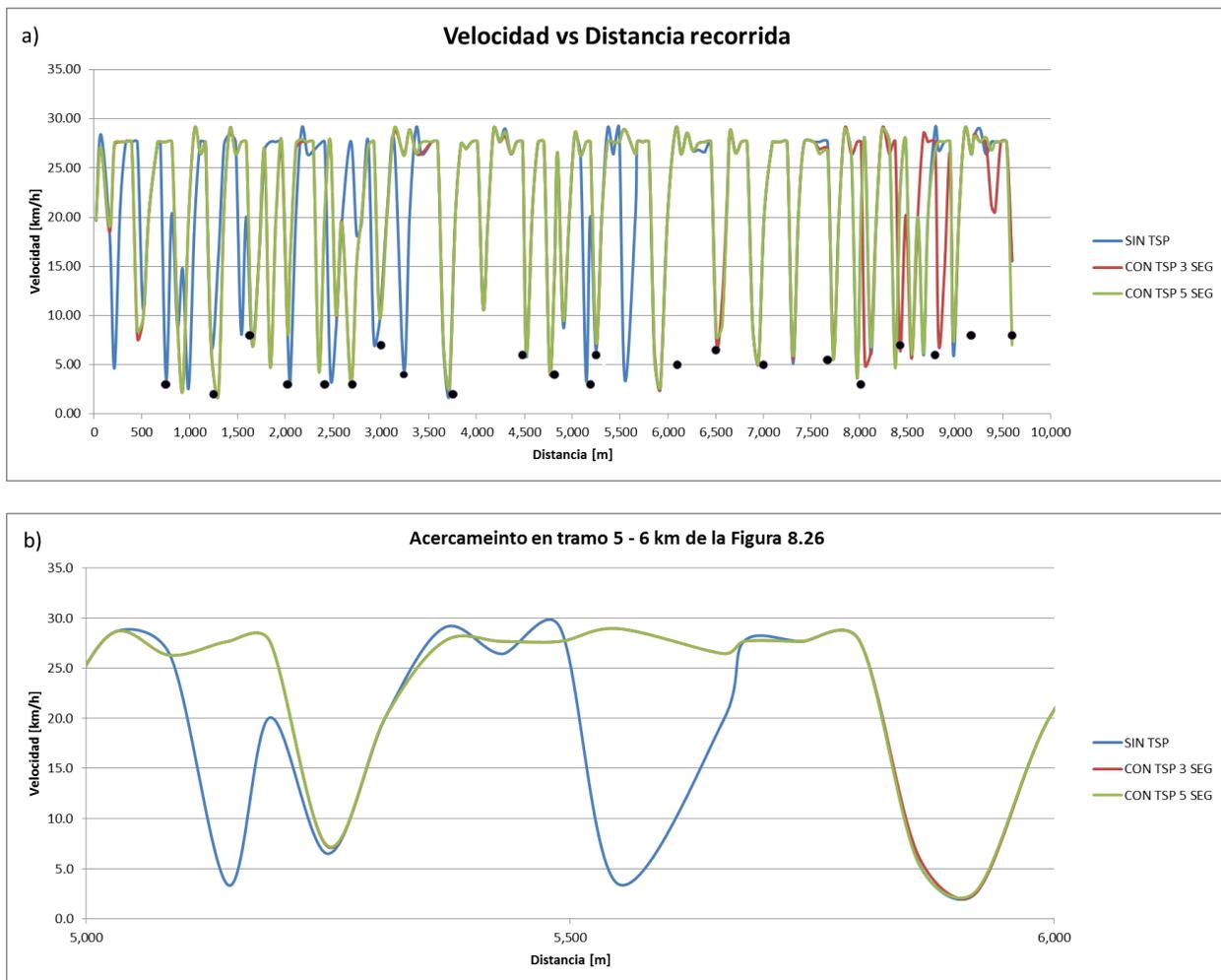


Figura 8.28: a) Gráfica velocidad vs distancia para los tres escenarios del recorrido 4 en dirección Dr. Gálvez en la hora pico vespertina. b) Acercamiento en el tramo de 5,000 m a 6,000 m de la grafica a).

Fuente: Elaboración propia.

Todas las curvas presentan un comportamiento de picos superiores e inferiores. Los primeros representan los máximos niveles de velocidad alcanzados durante el recorrido mientras que los segundos representan la disminución de la velocidad debida a los altos realizados por los autobuses en las estaciones o en las intersecciones semaforizadas. Puesto que todas las unidades paran en todas las estaciones, estos picos siempre son los mismos para las tres curvas y están marcados con un círculo negro. Es en los demás picos inferiores en los que se observa cómo, al implementar el sistema TSP, los autobuses pueden no presentar ciertos picos y mantienen una velocidad constante o en su defecto, el pico no es tan marcado. Cuando el pico no es tan marcado, esto significa que el autobús si se detuvo en la intersección pero que el mismo arranco 3 o 5 segundos antes que aquellos dentro del escenario “SIN TSP”. Cuando el pico desaparece, esto indica que el autobús no tuvo que realizar un alto en dicha intersección.

Estas gráficas están directamente relacionadas con los tiempos muertos anteriormente ilustrados; por lo que cuando estos tiempos disminuyen, las velocidades se van a mantener constantes o no van a disminuir a valores tan bajos como se presentaron en el primer escenario.

EMISIONES DE GASES Y OTROS COMPUESTOS

Para cuantificar la disminución de las emisiones de los gases y compuestos liberados al quemar el combustible, se realizó una comparación de los TRES escenarios. De dicha comparación se obtuvo que implementando el sistema con prioridad de 3 segundos se reduce en un 0.99% las emisiones de CO, NO_x y VOC y así mismo se disminuye en 0.99% el consumo de combustible. Al implementar al sistema con una prioridad de 5 segundos, la disminución de los mismos gases y del consumo de combustible aumenta a 1.06%; es decir, que existe una mejora del 0.07%.

Para entender mejor dichos porcentajes, se explican con cantidades reales. Bien se ha mencionado que cuando un usuario decide dejar estacionado su vehículo privado y opta por utilizar el Metrobús, está disminuyendo sus emisiones de 261 gCO₂/km a 12.3 gCO₂/km. Con el escenario de prioridad de 3 segundos, las emisiones se disminuyen en un 0.99% y con el de 5 segundos, en 1.06%. Si se aplica este porcentaje a los 12.3 gCO₂ se obtiene una disminución de 0.122 gCO₂ y 0.13 gCO₂ por usuario respectivamente. Sabiendo que una unidad biarticulada transporta a 240 pasajeros, se disminuiría en un 29.2 gCO₂ y 31.3gCO₂ por kilómetro recorrido. De igual forma funcionaría el cálculo con la disminución de NO_x y VOC.

DEMORA POR VEHÍCULO Y POR USUARIO

Se ha mencionado que la implementación del sistema puede traer consigo un impacto negativo en el movimiento del tránsito general. Para poder conocer si existe dicho impacto y cuantificarlo, se utilizaron las herramientas de demora por vehículo y demora por persona. Más adelante se considera también la demora por alto y la longitud máxima de cola. Todos estos parámetros se calculan dentro de la evaluación de nodos en VISSIM. La demora por vehículo se calcula restando el tiempo actual del vehículo al tiempo ideal o teórico del mismo; es decir, aquel tiempo que se hubiera alcanzado sin que existieran otros automóviles que no permitiesen su paso o sin la interacción con los semáforos. La demora por usuario, como su nombre lo dice, es aquella demora que tiene cada usuario según su modo de transporte. Este se calcula multiplicando la demora del vehículo por la cantidad de pasajeros (1.5 cuando se trata de un vehículo privado, 160 para un Metrobús articulado y 240 para un Metrobús biarticulado).

Se debe aclarar que por la gran cantidad de automóviles que circulan durante las horas pico, la demora por vehículo privado es mucho mayor que la demora por camión de Metrobús. Pero al multiplicar dichas demoras por el factor de ocupación, se demuestra que la demora por usuario transportado en el Metrobús es menor que la de un usuario transportado en un automóvil. A continuación se muestra la comparación de los tres escenarios para dos intersecciones que se consideran críticas, para conocer si las demoras aumentaron, se quedaron iguales o

disminuyeron. Cada renglón de la Tabla 8.13 muestra un movimiento diferente realizado donde en la columna extrema izquierda se lee el origen y el destino del movimiento.

a) NODO 20: AV. PORFIRIO DIAZ							
Movimiento	Demora por vehiculo	DemoraVeh CON TSP 3 SEG	Aumento de demora	Disminución de demora	DemoraVeh CON TSP 5 SEG	Aumento de demora	Disminución de demora
NB - NB	1.21	1.38	Aumento	Disminución	1.18	Aumento	Disminución
NB - EB	1.91	1.50			1.33		
TOTAL NB	3.11	2.88		0.23	2.50		0.61
SB - SB	1.45	0.38			0.25		
SB - WB	0.22	0.48			0.36		
TOTAL SB	1.67	0.86		0.81	0.61		1.06
WB - SB	27.13	20.21			24.91		
WB - NB	8.96	23.90			27.90		
WB - WB	25.07	22.44			15.50		
WB - SD	11.39	11.72			14.77		
WB - NB	1.24	10.48			16.32		
WB - EB	12.01	9.15			13.69		
TOTAL WB	85.81	97.91	12.10		113.09	27.28	
LINEA 1 MB NB	0.84	0.76			0.42		
LINEA 1 MB SB							
TOTAL MB	0.84	0.76		0.08	0.42		0.43
Demora por vehiculo		AUTO =	12.10	1.04	AUTO =	27.28	1.67
		MB =		0.08	MB =		0.43
Demora por usuario		AUTO =	18.15	1.56	AUTO =	40.92	2.50
		MB =		19.21	MB =		102.67

a) NODO 38: EJE 2 AV. YUCATAN							
Movimiento	DemoraVeh SIN TSP	DemoraVeh CON TSP 3 SEG	Aumento de demora	Disminución de demora	DemoraVeh CON TSP 5 SEG	Aumento de demora	Disminución de demora
NB - NB	36.00	34.00			34.15		
NB - EB	35.40	32.64			32.41		
TOTAL NB	71.40	66.64		4.76	66.56		4.84
SB - SB	2.29	1.47			1.08		
SB - WB	1.71	2.49			0.37		
TOTAL SB	4.00	3.96		0.04	1.45		2.55
EB - NB	46.74	41.29			43.17		
EB - NB	32.45	33.73			35.51		
EB - EB	29.44	28.35			29.88		
EB - EB	37.64	36.79			40.38		
EB - EB	8.77	71.79			70.42		
EB - EB	0.00	0.00			0.00		
TOTAL EB	155.04	211.95	56.91		219.36	64.32	
LINEA 1 MB NB	29.18	27.96			26.78		
LINEA 1 MB SB							
TOTAL MB	29.18	27.96		1.22	26.78		2.40
Demora por vehiculo		AUTO =	56.91	4.80	AUTO =	64.32	7.39
		MB =		1.22	MB =		2.40
Demora por usuario		AUTO =	85.37	7.21	AUTO =	96.48	11.09
		MB =		293.14	MB =		576.00

Tabla 8.13: a) Comparación entre las demoras por vehículo y por persona del nodo 20 en hora pico AM.
 b) Comparación entre las demoras por vehículo y por persona del nodo 38 en hora pico AM.

Fuente: Elaboración propia.

En ambos casos se observa que las demoras de los coches con dirección este (EB) u oeste (WB) aumentan, puesto que se les ha quitado tiempo de luz verde en las intersecciones. Por el contrario, las demoras en direcciones norte (NB) y sur (SB) para los coches y el Metrobús disminuyen, ya que han ganado tiempo de luz verde. Al final de cada tabla se hace un resumen total del nodo donde se ha calculado la demora por vehículo y por usuario para demostrar que aunque se afecte una cantidad mucho mayor de coches, la disminución de las demoras por usuario en dirección norte-sur supera al aumento de las demoras por usuario en dirección este-oeste. Como ejemplo se explica el escenario “CON TSP 3 SEG” del nodo 38: cuando se implementa el segundo escenario, los coches en dirección norte y sur disminuyen sus demoras en 4.76 y 0.04 segundos respectivamente mientras que el Metrobús lo hace en 1.22 segundos pero los coches en dirección este aumentan sus demoras por 56.91 segundos. Al multiplicar las demoras por el factor de ocupación se obtiene lo siguiente: en dirección norte y sur se disminuyen las demoras 7.21 segundos por usuario de coche y 293.14 por usuario de Metrobús mientras que las demoras en dirección este aumentan tan solo a 85.37 segundos por usuario.

DEMORA POR ALTO Y LA LONGITUD MÁXIMA DE COLA

La demora por alto es aquel tiempo perdido cuando la velocidad de los vehículos es nula debido a que se encuentran atorados en una cola. La cola generada por la luz roja en una intersección aumenta en las calles y avenidas que cruzan Insurgentes debido a la prioridad otorgada a las unidades del Metrobús. A continuación, en las Tablas 8.14 y 8.15, se muestra el aumento de las colas máximas generadas al implementar el sistema TSP y el aumento en la demora por alto que esto genera. Esto último se estudia nuevamente en dos intersecciones diferentes a las anteriores.

a)	NODO 24: GEORGIA / PASADENA					NODO 24: GEORGIA / PASADENA				
	MaxCola SIN TSP	MaxCola CON TSP 3 SEG	Aumento de cola	MaxCola CON TSP 5 SEG	Aumento de cola	Retraso de alto SIN TSP	Retraso de alto CON TSP 3 SEG	Aumento de retraso de cola	Retraso de alto CON TSP 5 SEG	Aumento de retraso de cola
NB - NB	0.01	0.05	0.04	0.08	0.07	4.19	5.21	1.02	8.04	3.85
SB - SB	0.13	4.65	4.52	4.82	4.70	0.54	0.35	-0.19	0.59	0.05
WB - SB	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	9.60	11.36	1.76	11.40	1.80
WB - NB	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	10.62	10.62	0.00	14.58	3.96
WB - NB	1.00	34.56	33.57	35.34	34.34	14.75	15.25	0.50	19.75	5.00
TOTAL WB	1.00	34.70	33.70	35.47	34.47	34.97	37.23	2.26	45.74	10.76
EB - SB	1.00	34.56	33.57	35.34	34.34					
MB NB	0.00	9.27	9.27	7.70	7.70					
MB SB	13.03	13.03	0.00	13.03	0.00	3.63	3.57	-0.06	3.02	-0.61

Tabla 8.14: Comparación entre las colas máximas generadas y las demoras por alto del nodo 24 en hora pico PM.

Fuente: Elaboración propia.

Movimiento	NODO 31: TEHUANTEPEC				NODO 31: TEHUANTEPEC					
	MaxCola SIN TSP	MaxCola CON TSP 3 SEG	Aumento de cola	MaxCola CON TSP 5 SEG	Aumento de cola	Retraso de alto SIN TSP	Retraso de alto CON TSP 3 SEG	Aumento de retraso de cola	Retraso de alto CON TSP 5 SEG	Aumento de retraso de cola
NB - NB	137.65	142.00	4.35	136.19	-1.47	75.98	35.24	-40.75	33.21	-42.78
NB - EB	137.65	142.00	4.35	136.19	-1.47	53.57	31.65	-21.93	30.13	-23.44
TOTAL NB	275.30	283.998	8.70	272.37	-2.93	129.56	66.88	-62.68	63.33	-66.22
SB - SB	40.04	38.5212	-1.52	37.76	-2.28	7.12	6.97	-0.15	6.80	-0.32
EB - SB	163.55	163.55	0.00	163.56	0.00	46.99	48.02	1.03	52.79	5.80
EB - EB	163.55	163.55	0.00	163.56	0.00	46.18	46.66	0.48	49.77	3.58
EB - NB	58.89	58.89	0.00	58.89	0.00	13.53	13.80	0.27	31.61	18.08
EB - EB	58.89	58.89	0.00	58.89	0.00	16.23	16.92	0.69	17.40	1.17
TOTAL EB	444.88	444.87	0.00	444.88	0.00	122.93	125.40	2.47	151.57	28.64
MB NB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
MB SB	28.23	28.30	0.07	28.32	0.09					

Tabla 8.15: Comparación entre las colas máximas generadas y las demoras por alto del nodo 31 en hora pico PM.

Fuente: Elaboración propia.

Nuevamente se observa que, como era lo esperado, el tránsito en general se ve afectado. Al analizar las colas máximas generadas y la demora por alto las direcciones este y oeste son las más afectadas aumentando sus colas hasta 34 metros para este nodo y sus demoras desde 2 hasta 29 segundos.

EVALUACIÓN ECONÓMICA

Algunos autores prefieren evitar la evaluación económica al implementar un sistema TSP debido a su complejidad. Dentro de este trabajo se considerarán solamente aquellos aspectos básicos que el sistema aportaría o algunos otros que afectarían y, a partir de ellos, y con el uso de la estimación del valor social del tiempo para México en 2019, poder cuantificar el ahorro monetario. Como ya se mencionó anteriormente, los resultados arrojan disminuciones en los tiempos de viaje, en las emisiones de gases a la atmósfera y en el consumo de combustible, pero también representan aumentos en las colas máximas generadas y en las demoras. La disminución en los valores de los primeros tres aspectos representa un ahorro monetario para el gobierno. A continuación, se calcula un aproximado a partir de los resultados obtenidos:

El disminuir los tiempos de viaje permite que los usuarios destinen una menor cantidad de su tiempo para transportarse lo cual disminuye la pérdida de horas-hombre así como su nivel de estrés. El IMT calcula el valor del tiempo de los pasajeros para el total de la población ocupada con ingreso por entidad federativa en 2019, siendo este en la CDMX de 67.56 \$/h. Esto quiere decir que con los ahorros obtenidos en los tiempos de viaje, se ahorraría en promedio \$2.35 por usuario por un viaje completo del tramo en la hora pico matutina y \$0.28 en la hora pico vespertina. Ahora bien si se considera a un autobús biarticulado lleno, los ahorros aumentan hasta \$563.17 y \$66.38 respectivamente.

Dentro de las emisiones de gases a la atmósfera, el contribuir con su disminución es una acción inmediata para mejorar la calidad del aire en la CDMX y disminuye los costos dentro del área de

salud ya que en muchos casos, la mala calidad del aire en la ciudad afecta directamente en la salud de los habitantes. Y finalmente, el ahorro del combustible de 0.99% para el segundo escenario y de 1.06% para el tercero equivale directamente a un ahorro de un viaje por cada cien.

Pensando en el impacto negativo, es claro que el consumo de combustible de los vehículos privados aumentaría pero tomando en cuenta la demora por usuario y no la demora por vehículo, el balance monetario con respecto a los tiempos de viaje sería positivo. Además que uno de los objetivos al implementar el sistema es que los usuarios de los vehículos privados opten mejor por utilizar el Metrobús u otro modo de transporte público.

EVALUACIÓN EN LA CALIDAD DEL SERVICIO.

Hasta este punto del trabajo no se puede realizar una evaluación en la calidad de servicio ya que esta se debería realizar mediante una encuesta al usuario donde se evalúe, desde su punto de vista, todas las mejoras del funcionamiento del Metrobús con la implementación del sistema TSP.

8.2.8 Documentación

Por fines de extensión del trabajo, los resultados se resumieron lo mejor posible pero la documentación y los archivos arrojados por la simulación se guardaron por si el modelo fuese utilizado en una próxima oportunidad por el mismo analista o por si fuese requerido por terceros.

CAPÍTULO IX

Conclusiones y comentarios

Dentro del Plan Estratégico de Movilidad 2019, se buscan soluciones y se proponen metas a la ineficiencia y a la fuerte inequidad en los tiempos de traslado del sistema de transporte público de la Ciudad de México. Las estrategias de su Eje 2, buscan una movilidad con eficiencia y accesibilidad. Más a fondo, las estrategias que se beneficiarían con los resultados de este trabajo son: el rescate y la mejora del transporte público con la implementación de carriles exclusivos para incrementar las velocidades de los autobuses, la gestión del tránsito mediante la integración de sistemas automatizados de semáforos y el impulso a la innovación y mejora tecnológica a partir de la creación de un Centro de Control e Innovación de la Movilidad con un control centralizado del sistema integrado de semáforos automatizados.

Se demostró en campo que los altos tiempos de espera en las intersecciones semaforizadas provocan que, aunque el Metrobús cuente con su propio carril, los tiempos de viaje sean elevados. Dicho tiempo muerto representa un poco más de la cuarta parte del tiempo total del viaje y, en promedio, cada unidad se detiene en la mitad de las intersecciones a lo largo del tramo.

El sistema de prioridad semafórico (TSP), clasificado dentro de los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), ha sido aplicado en corredores BRT de países como Estados Unidos y China. A partir de la microsimulación se validó la hipótesis del trabajo y se demostró que el sistema TSP podría representar otro caso de éxito aplicado a la línea 1 del Metrobús de la CDMX. Se debe recordar que los resultados se limitan solamente a los tiempos de señal obtenidos en campo en las horas pico 7:00 – 9:00 y 18:00 – 20:00 y para las condiciones de operación descritas dentro de este trabajo las que incluyen los intervalos de salida propuestos para la flota de Metrobús.

Como era de esperarse, la implementación del sistema TSP disminuyó considerablemente los tiempos de viaje. La hora pico matutina presentó ahorros más significativos que la vespertina, siendo los ahorros porcentuales del tiempo total de viaje de 4.5% y de 1.5%, respectivamente. La diferencia entre las dos horas pico pudo deberse a la duración de las fases de los semáforos. El ahorro de tiempo de los dos escenarios (CON TSP 3 SEG y 5 SEG) no es proporcional al tiempo en que se otorga prioridad, ya que la diferencia entre ellos no es muy significativa. El otorgar tres segundos de prioridad puede significar un ahorro del 5% del tiempo de viaje pero cuando la prioridad se incrementa a cinco segundos, el valor aumenta solamente en un 10% del ahorro anterior y no en el 66% que debería de corresponder.

De los ahorros del tiempo de viaje, su gran mayoría (de 50% a 80%) se ganan de los tiempos de espera en las intersecciones. Esto conlleva a que el número de paradas disminuya con el mismo porcentaje.

Los beneficios sociales, económicos y ambientales mostraron buenos resultados. Las emisiones de GEI, así como el consumo de combustible, disminuyeron 1% para el segundo escenario. El último escenario, volvió a presentar la misma tendencia: el incremento en el ahorro fue mínimo. Como el ahorro monetario depende directamente del ahorro en el tiempo de viaje, la tendencia fue la misma. En el segundo escenario, los valores de las colas máximas generadas y de la demora por alto son menores que en el tercer escenario. Esto refuerza la elección del segundo escenario sobre el tercero, ya que el impacto negativo que se podría presentar disminuye. Por ello, se recomienda al segundo escenario sobre el tercero.

Por la extensión del trabajo, no se le logró analizar a dos de los beneficios citados en el inicio del mismo. Estos son la disminución de la flota del Metrobús, ya que se logra transportar la misma cantidad de usuarios en un menor tiempo, y la mejora en la adherencia a los horarios establecidos ya sea dentro de las horas pico o fuera de las mismas. Queda la invitación a continuar con el tema de investigación en esos temas.

Fuera del análisis técnico, se hacen dos comentarios finales. El primero es la amplia recomendación del uso del software VISSIM 11 cuando se trate de realizar microsimulaciones en ingeniería de tránsito, ya que ofrece una gama muy amplia de parámetros que permiten simular la realidad y cualquier duda de su uso se puede aclarar con su manual de uso, el cual está muy bien explicado. El único problema con el programa, como ya se mencionó anteriormente, fue al momento de utilizar el parámetro offset dentro de los controladores de tipo VAP, ya que este no fue respetado por lo que se tuvieron que modificar los diagramas de flujo. Fuera de ello, todo funcionó correctamente.

El segundo comentario es sobre la educación vial que se debería tener. Todos los usuarios de los sistemas de transporte, ya sean conductores privados, conductores de transporte público, usuarios del mismo, ciclistas, peatones etc. deben de prestar más atención a su educación vial. Muchos de los problemas a los que estamos sujetos dentro del campo del transporte se deben en gran medida a que no se respetan los reglamentos y las indicaciones, lo que hace aún más caótico al sistema. Si cada usuario del sistema empieza a respetar y a hacer lo que le toca, las problemáticas van a ser sin duda mucho más sencillas de abordar y resolver.

Referencias

- [1] Advanced Traffic Management System (ATMS), Advanced Public Transportation System (APTS) and Intelligent Transportation Society of America (ITS America). *An Overview of Transit Signal Priority*. Estados Unidos, 2002, pp. 1 – 36.
- [2] Alvarado V. y Macías V. (2018). Corredores de transporte público: una acción para reducir CO2 dentro de la ZMVM. *El Poder del Consumidor*, México, pp. 3 – 4.
- [3] CAF Banco de Desarrollo de América Latina. (2011). Desarrollo urbano y movilidad en América Latina. Pp. 173 – 185.
- [4] Cal y Mayor, Rafael y Cárdenas, James. *Ingeniería de tránsito: Fundamentos y Aplicaciones*. Octava edición, Alfaomega Grupo Editor, México, CDMX, 2007.
- [5] Dora C., Hosking J., Mudu P., Fletcher E. (2011). Transporte Urbano y Salud. Módulo 5g. Transporte Sostenible. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Alemania, pp. 1 – 17.
- [6] EMBARQ, 2006. Metrobús: Welcome Aboard. Sustainable Mobility, vol. 1, octubre de 2006. Gobierno de la Ciudad de Nueva York (2013). 34th Street Select Bus Service. Nueva York: Informe del Gobierno Local de la Ciudad de Nueva York.
- [7] Gobierno de la CDMX. (2019). Red de Transporte de Pasajeros. [citado 2019-03-05]. [En línea]. Disponible en: <https://www.rtp.cdmx.gob.mx/dependencia/acerca-de>.
- [8] Gobierno de la CDMX. (2019). Metrobús. [citado 2019-04-24]. [En línea]. Disponible en: <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/>.
- [9] Haitham Al-Deek, Adrian Sandt, Ahmad Alomari & Omar Hussain (2017) A technical note on evaluating the effectiveness of bus rapid transit with transit signal priority, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 21:3, 227-238, DOI: 10.1080/15472450.2017.1286987.
- [10] Hernández Chávez P. S. (2014). Sistemas Inteligentes de Transporte: Situación actual y prospectiva. Tesis de licenciatura en ingeniería civil, Universidad Nacional Autónoma de México, México, pp. 4 - 20.
- [11] IMT. (2012). Movilidad de pasajeros en México: Implicaciones ambientales y económicas. Querétaro, México, pp. 5 – 14.

- [12] ITDP México. (2018). Transporte Público Masivo en la Zona Metropolitana del Valle de México: Proyecciones de demanda y soluciones al 2024. Ciudad de México, México, pp. 170.
- [13] Kimley Horn. (2017). Implementation of TSP on the Murfreesboro Pike Corridor. Concept of Operations. Nashville MTA, Tennessee, Estados Unidos, 2017, pp. 118.
- [14] Llanes Ayala J. M. (2014). Estimación del flujo de saturación en intersecciones semaforizadas seleccionadas de la ciudad de México. Tesis de licenciatura en ingeniería civil, UNAM, México, pp. 25 - 49.
- [15] Lozano A., Guzmán A., Camacho G., Miranda M. (2018) Herramienta 1 para identificar la relevancia de cada modo de transporte. Instituto de Ingeniería UNAM. Ciudad de México, México. [citado 2019-06-21]. [En línea]. Disponible en: <http://giitral.iingen.unam.mx/Estudios/EOD-Estadisticas-02.html>
- [16] L. Zhou, Y. Wang, Y. Liu. Active Signal Priority Control Method for Bus Rapid Transit Based on Vehicle Infrastructure Integration. International Journal of Transportation Science and Technology (2017), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.06.001>
- [17] Miramontes García E., Vidaña Bencomo J. O., Rodríguez Esparza A. (2015). Análisis y Evaluación de Intersecciones Urbanas. En: CULCyT//Mayo-Agosto, 2015. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México, p. 10.
- [18] Moreno Galván R. J. (2019). El papel de la semaforización en la Ingeniería de Tránsito. Posgrado de Ingeniería, UNAM. México, pp 1 – 1.
- [19] Ngan Vikki W.K. (2000). A Comprehensive Strategy for Transit Signal Priority. Tesis de maestría en Ingeniería, Universidad de British Columbia, Canadá, pp. 3 - 40.
- [20] O'Brien, W. (2000). Design and Implementation of Transit Priority at Signalized Intersections: A Primer for Transit Managers and a Review of North American Experience. Canadian Urban
- [21] Transit Association STRP Report 15, Toronto, Canada, 2000, p.31.
- [22] OPTICOM. (2016). Soluciones de prioridad de señales de tránsito. [citado 2019-03-29]. [En línea]. Disponible en: http://www.gtt.com/wp-content/uploads/Transit_Overview_final_Spanish.pdf.
- [23] Paredes A., Velázquez M. (2017). Nivel de satisfacción de los usuarios de transporte eléctrico de la ciudad de México. XXII Congreso Internacional de Contaduría, Administración e Informática. Ciudad Universitaria UNAM, México, pp. 1 -1.
- [24] PTV Group (2018). Manual PTV VISSIM 11. Alemania, p. 1219.

- [25] PTV Group (2016). PTV VISSIM First Steps Tutorial. Alemania, p. 34.
- [26] SEDESOL. (2008). Capítulo 7: Semáforos. Ciudad de México, México, pp. 243 – 250.
- [27] SEMOVI. (2019). Plan Estratégico de movilidad de la Ciudad de México 2019. Ciudad de México, México. Pp. 3 – 22.
- [28] SEMOVI. (2012). Anuario Estadístico de Transportes y Vialidad en la Ciudad de México 2012. Ciudad de México, México, p. 42.
- [29] SCT. (2016). Manual para Proyectos de Sistemas Inteligentes de Transporte [ITS] en Carreteras. Subsecretaría de Infraestructura. Primer Edición, México, pp. 21 - 56.
- [30] Smith Brian. (2005). Developing and Using a Concept of Operations in Transportation management Systems. United States Department of Transportation, Estados Unidos, 2005, p. 186.
- [31] Smith H., Brendon H., Miomir I., Gannett F. (2005). Transit Signal Priority (TSP). A Planning and Implementation Handbook. United States Department of Transportation, Estados Unidos, 2005, pp. 3 – 41.
- [32] Solís J.C., y Shienbaum C. (2016). Consumo de energía y emisiones de CO2 del autotransporte en México y escenarios de mitigación. Instituto de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México, México, pp. 8, 11 y 15.
- [33] STC Metro. (2017). Diagnóstico sobre el servicio y las instalaciones del sistema de transporte colectivo 2013-2018. Ciudad de Mexico, México, pp. 4 – 26.
- [34] Transportation Research Board of the National Academies of Science. (2000). Highway Capacity Manual. Washington, D.C., pp. 13, 23, 24 y 25.
- [35] Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2311, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2012, pp. 176–185. DOI: 10.3141/2311-17.

Anexos

Intersección	Tiempo de luz verde [s]		Tiempo de luz roja [s]	
	H.P. AM	H.P. PM	H.P. AM	H.P. PM
Dr. Gálvez	84.0	75.0	33.0	42.0
2	84.0	75.0	33.0	42.0
3	56.0	56.0	61.0	61.0
4	68.0	70.0	49.0	47.0
5	66.0	65.0	51.0	52.0
6	60.0	61.0	57.0	56.0
7	70.0	70.0	47.0	47.0
8	60.0	60.0	57.0	57.0
9	60.0	60.0	57.0	57.0
10	70.0	70.0	47.0	47.0
11	59.0	59.0	58.0	58.0
12	60.0	67.0	57.0	50.0
13	65.0	72.0	52.0	45.0
14	60.0	57.0	57.0	60.0
15	54.0	53.0	63.0	64.0
16	64.0	57.0	53.0	60.0
17	64.0	64.0	53.0	53.0
18	51.0	51.0	66.0	66.0
19	60.0	69.0	57.0	48.0
20	70.0	60.0	47.0	57.0
21	70.0	51.0	47.0	66.0
22	66.0	51.0	51.0	66.0
23	66.0	51.0	51.0	66.0
24	50.0	51.0	67.0	66.0
25	60.0	58.0	57.0	59.0
26	58.0	57.0	59.0	60.0
27	58.0	58.0	59.0	59.0
28	66.0	62.0	51.0	55.0
29	55.0	65.0	62.0	52.0
30	40.0	56.0	77.0	61.0
31	56.0	60.0	61.0	57.0
32	56.0	56.0	61.0	61.0
33	52.0	60.0	65.0	57.0
34	52.0	61.0	65.0	56.0
35	68.0	69.0	49.0	48.0
36	70.0	74.0	47.0	43.0
37	68.0	71.0	49.0	46.0
38	69.0	70.0	48.0	47.0
39	48.0	60.0	69.0	57.0
40	48.0	60.0	69.0	57.0
41	60.0	61.0	57.0	56.0
42	54.0	63.0	63.0	54.0
43	69.0	67.0	48.0	50.0
Insurgentes	69.0	69.0	48.0	48.0

Anexo 1: Tiempos de luz verde y de luz roja para cada intersección empezando en la estación de Metrobús Dr. Gálvez y terminando en la estación Insurgentes.

Nota: El periodo de luz ámbar es siempre de 3 segundos.

Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Descripción	Cantidad
Link	Para carriles de Av. de los Insurgentes Sur	162
Link	Para carriles de calles o avenidas que cruzan Av. de los Insurgentes Sur	55
Link	Como conectores	307
Link	Para carriles exclusivos del Metrobús	2
Link	Como cruces peatonales	48
Link	Total	574
Controladores de señal	De tipo "tiempo fijo"	44
Semáforo	Para carriles del Metrobús	89
Semáforo	Para carriles de vehículos privados	387
Semáforo	Para cruces peatonales	96
Semáforo	Total	572
Paradas de Transporte Público	Exclusivas para el Metrobús	44
Líneas de Transporte Público	A lo largo de todo el tramo	4
Líneas de Transporte Público	Dentro del tramo	21
Líneas de Transporte Público	Total	25
Metrobús articulado	Partiendo desde uno de los dos extremos del tramo	20
Metrobús biarticulado	Partiendo desde uno de los dos extremos del tramo	20
Metrobús articulado	Partiendo desde algún punto dentro del tramo	10
Metrobús biarticulado	Partiendo desde algún punto dentro del tramo	10
Metrobús	Total	60
Áreas	De salida de peatones	27
Áreas	De espera antes de abordar	26
Áreas	De plataforma para la salida de los usuarios	44
Áreas	Peatonal	44
Áreas	Total	141
Rampas	Desde el nivel de suelo hasta 1.2 m de altura en cada estación	27
Entardas de peatones	Para cada una de las áreas de salida de peatones	27
Entardas de vehículos	Peatones que cruzan Av. de los Insurgentes Sur	48
Entradas de vehículos	Automóviles que salen de calles o avenidas que cruzan o conectan con Av. de los Insurgentes	55
Entradas de vehículos	Total	103
Decisiones de ruta estáticas para peatones	Ruta desde área de salida de peatones hacia área de espera antes de abordar	52
Decisiones de ruta estáticas para peatones	Ruta desde área de plataforma para la salida de los usuarios hacia área de salida de peatones	52
Decisiones de ruta estáticas para peatones	Total	104
Decisiones de ruta estáticas para vehículos	Abarca todos los diferentes movimientos que los automóviles pueden realizar	254
Medidores de tiempo de viaje para vehículos	Toman el tiempo de los vehículos que recorren la totalidad del tramo en cualquier sentido	2
Medidores de tiempo de viaje para vehículos	Toman el tiempo de los Metrobuses que recorren la totalidad del tramo en cualquier sentido	2
Medidores de tiempo de viaje para vehículos	Toman el tiempo de los Metrobuses entre cada estación en cualquier sentido	42
Medidores de tiempo de viaje para vehículos	Total	46
Detectores de tipo Standar	Total	258

Anexo 2: Componentes del sistema desglosados por elemento y sus cantidades.
Fuente: Elaboración propia.

	DISMINUCIÓN % DE GEI CON TSP 3 SEG				DISMINUCIÓN % DE GEI CON TSP 5 SEG			
	Emisiones CO	Emisiones Nox	Emisiones VOC	Consumo combustible	Emisiones CO	Emisiones Nox	Emisiones VOC	Consumo combustible
Int#1	-1.77%	-1.77%	-1.77%	-1.76%	-0.50%	-0.50%	-0.50%	-0.50%
Int#2	3.77%	3.77%	3.77%	3.77%	-1.84%	-1.84%	-1.84%	-1.84%
Int#3	-8.53%	-8.53%	-8.53%	-8.53%	-5.69%	-5.69%	-5.69%	-5.69%
Int#4	4.11%	4.11%	4.11%	4.11%	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%
Int#5	6.25%	6.25%	6.25%	6.25%	17.88%	17.88%	17.88%	17.88%
Int#6	-4.93%	-4.93%	-4.93%	-4.93%	-13.37%	-13.37%	-13.37%	-13.37%
Int#7	42.80%	42.80%	42.80%	42.80%	36.97%	36.97%	36.97%	36.97%
Int#8	21.17%	21.17%	21.17%	21.17%	5.66%	5.66%	5.66%	5.66%
Int#9	8.88%	8.88%	8.88%	8.88%	8.50%	8.50%	8.50%	8.50%
Int#10	3.88%	3.88%	3.88%	3.88%	2.05%	2.05%	2.05%	2.05%
Int#11	5.43%	5.43%	5.43%	5.43%	4.14%	4.14%	4.14%	4.14%
Int#12	0.78%	0.78%	0.78%	0.78%	0.01%	0.01%	0.01%	0.00%
Int#13	2.62%	2.62%	2.62%	2.62%	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%
Int#14	0.66%	0.66%	0.66%	0.66%	0.83%	0.83%	0.83%	0.83%
Int#15	13.41%	13.41%	13.41%	13.41%	13.79%	13.79%	13.79%	13.79%
Int#16	1.84%	1.84%	1.84%	1.84%	2.72%	2.72%	2.72%	2.72%
Int#17	-0.61%	-0.61%	-0.61%	-0.61%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%
Int#18	-1.09%	-1.09%	-1.09%	-1.09%	-1.45%	-1.45%	-1.45%	-1.45%
Int#19	-2.28%	-2.28%	-2.28%	-2.28%	-0.95%	-0.95%	-0.95%	-0.95%
Int#20	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%	-0.08%	-0.08%	-0.08%	-0.08%
Int#21	0.93%	0.93%	0.93%	0.93%	1.26%	1.26%	1.26%	1.26%
Int#22	4.04%	4.04%	4.04%	4.04%	9.50%	9.50%	9.50%	9.50%
Int#24	2.33%	2.33%	2.33%	2.33%	11.18%	11.18%	11.18%	11.18%
Int#25	0.22%	0.22%	0.22%	0.22%	-4.37%	-4.37%	-4.37%	-4.37%
Int#26	-5.64%	-5.64%	-5.64%	-5.64%	-3.41%	-3.41%	-3.41%	-3.41%
Int#27	-0.72%	-0.72%	-0.72%	-0.72%	-0.62%	-0.62%	-0.62%	-0.62%
Int#28	-3.60%	-3.60%	-3.60%	-3.59%	-2.78%	-2.78%	-2.78%	-2.78%
Int#29	3.23%	3.23%	3.23%	3.23%	2.77%	2.77%	2.77%	2.77%
Int#30	-8.49%	-8.49%	-8.49%	-8.49%	-9.45%	-9.45%	-9.45%	-9.45%
Int#31	-5.01%	-5.01%	-5.01%	-5.01%	-2.66%	-2.66%	-2.66%	-2.66%
Int#32	-1.54%	-1.54%	-1.54%	-1.54%	-2.06%	-2.06%	-2.06%	-2.06%
Int#33	0.69%	0.69%	0.69%	0.69%	0.81%	0.81%	0.81%	0.81%
Int#34	1.95%	1.95%	1.95%	1.95%	-0.80%	-0.80%	-0.80%	-0.80%
Int#35	29.51%	29.51%	29.51%	29.51%	34.47%	34.47%	34.47%	34.47%
Int#36	-90.62%	-90.62%	-90.62%	-90.62%	-95.67%	-95.67%	-95.67%	-95.67%
Int#37	-0.63%	-0.63%	-0.63%	-0.64%	-2.73%	-2.73%	-2.73%	-2.73%
Int#38	-14.64%	-14.64%	-14.64%	-14.64%	-14.24%	-14.24%	-14.24%	-14.24%
Int#39	-3.53%	-3.53%	-3.53%	-3.53%	-0.70%	-0.70%	-0.70%	-0.70%
Int#40	4.11%	4.11%	4.11%	4.11%	-3.71%	-3.71%	-3.71%	-3.71%
Int#41	3.27%	3.27%	3.27%	3.27%	8.16%	8.16%	8.16%	8.16%
Int#42	-31.63%	-31.63%	-31.63%	-31.63%	-30.11%	-30.11%	-30.11%	-30.11%
Int#43	1.30%	1.30%	1.30%	1.30%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%
Int#44	-12.92%	-12.92%	-12.92%	-12.92%	-11.11%	-11.11%	-11.11%	-11.11%
TOTAL	0.99%	0.99%	0.99%	0.99%	1.06%	1.06%	1.06%	1.06%

Anexo 3: Disminución porcentual de gases, compuestos y consumo de combustible a partir de la instalación del sistema TSP en los dos escenarios con prioridad.

Fuente: Elaboración propia.