

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

MAESTRÍA EN FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA.

*Cambio Tecnológico en una flota vehicular de transporte urbano,
orientado a una Mejora Energética. Obtención de indicadores para la toma
de decisiones. Caso de estudio: Metrobús línea 1. Corredor Insurgentes.*

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

PRESENTA

FREDY VELÁZQUEZ JIMÉNEZ

Director de tesis

Mtro. Raúl Amilcar Santos Magaña

México, D. F. agosto de 2015.

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

UACM3 TDV324

JURADO ASIGNADO:

- Presidente: M. en I. Raúl Amilcar Santos Magaña, UACM
Secretario: Dr. Carlos Chávez Baeza, UACM
Vocal: Dra. Manuela Azucena Escobedo Izquierdo, UNAM
1^{er}. Suplente: Dra. Ma. Claudia Roldán Ahumada, UACM
2^{do}. Suplente: Mtra. Joanna Juárez Michua, UAM

Lugar donde se realizó la tesis:

PLANTEL DEL VALLE, UACM.

DIRECTOR DE TESIS:

M. en I. Raúl Amilcar Santos Magaña

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por esta invaluable oportunidad.

A todos los participantes del Programa de Energía por todo lo aprendido y sobre todo por la calidad humana que hay en cada uno de ustedes.

A mis amigos de Metrobús por su incondicional apoyo a este sueño.

A Lilí, Oscar y Sebastián porque cuando más dura es la lluvia más se juntan para cubrirme.

A mis papás por convertir mis sueños en realidades, por hacerme sentir que uno cuenta por dos.

A ti Melisa... mi pequeña bujía.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	ii
INDICE	iii
RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVOS	15
CAPÍTULO 1.ANTECEDENTES	16
1.1. Ascenso tecnológico en el transporte.....	16
1.2. Movilidad en la Ciudad de México.....	17
1.3. Modelos de transporte público de pasajeros.....	19
1.3.1. <i>Modelo de transporte concesionado</i>	19
1.3.2. <i>Modelo de corredor de transporte</i>	21
1.3.3. <i>Modelo de transporte "Bus Rapid Transit" (BRT)</i>	22
1.4. Autobuses para transporte urbano.....	26
1.4.1. <i>Autobuses utilizados en el modelo de transporte concesionado</i>	26
1.4.2. <i>Autobuses utilizados en el Modelo BRT</i>	28
1.4.2.1. <i>Autobuses Diesel</i>	28
1.4.2.2. <i>Autobuses Híbridos (Diesel – Eléctrico)</i>	35
1.4.2.3. <i>Autobuses Eléctrico Híbrido</i>	38
1.4.2.4. <i>Autobuses Eléctricos</i>	41
CAPÍTULO 2.SISTEMA BRT EN LA CIUDAD DE MÉXICO.....	44
2.1. Sistema de Corredores Metrobús.....	44
2.2. Corredores de Metrobús	46
2.3. Corredor Insurgentes	46
CAPÍTULO 3.METODOLOGÍA.....	52
3.1. Cálculo de la flota vehicular en operación.....	52

3.1.1.	<i>Flota vehicular en transporte concesionado</i>	53
3.1.2.	<i>Flota vehicular en el sistema BRT con diferentes tecnologías</i>	54
3.2.	Consumo energético	55
3.2.1.	<i>Consumo energético en el transporte concesionado</i>	55
3.2.2.	<i>Consumo energético en el sistema BRT con tecnología diesel</i>	57
3.2.3.	<i>Consumo energético en el sistema BRT con diferentes tecnologías</i> .	57
3.3.	Costos al usuario.....	58
3.3.1.	<i>Costo al usuario en transporte concesionado</i>	58
3.3.2.	<i>Costo al usuario en el sistema BRT</i>	58
3.4.	Generación de emisiones de GEI.....	62
3.5.	Cálculo del número de usuarios	64
CAPÍTULO 4. RESULTADOS		65
4.1.	Proyección de flota vehicular	65
4.1.1.	<i>Proyección de flota vehicular en el sistema de Transporte Concesionado</i>	65
4.1.2.	<i>Proyección de flota vehicular en el sistema de Transporte BRT</i>	67
4.1.2.1.	<i>Flota vehicular actual con autobuses diesel, Corredor Insurgentes</i>	69
4.1.2.2.	<i>Flota vehicular en el sistema BRT con tecnología híbrida</i>	75
4.1.2.3.	<i>Flota vehicular en el sistema BRT con tecnología híbrida</i>	75
4.1.2.4.	<i>Flota vehicular en el sistema BRT con tecnología eléctrica</i>	76
4.2.	Consumo energético	78
4.2.1.	<i>Consumo energético del transporte concesionado</i>	78
4.2.2.	<i>Consumo energético en el sistema BRT con tecnología diesel</i>	79
4.2.3.	<i>Consumo energético en el sistema BRT con tecnología híbrida (Diesel-Eléctrico)</i>	80

4.2.4.	<i>Consumo energético en el sistema BRT con tecnología eléctrica híbrida</i>	81
4.2.5.	<i>Consumo energético en el sistema BRT con tecnología eléctrica</i>	81
4.3.	<i>Costo al Usuario</i>	82
4.3.1.	<i>Costo al usuario del Transporte Concesionado</i>	82
4.3.2.	<i>Costo al usuario del sistema BRT con tecnología diesel</i>	83
4.3.3.	<i>Costo al usuario del sistema BRT con tecnología híbrida (Diesel-eléctrico)</i>	85
4.3.4.	<i>Costo al usuario del sistema BRT con tecnología eléctrica híbrida</i>	87
4.3.5.	<i>Costo al usuario del sistema BRT con tecnología eléctrica</i>	89
4.4.	<i>Emisiones de GEI</i>	92
4.4.1.	<i>Emisiones de GEI en el transporte concesionado</i>	92
4.4.2.	<i>Emisiones de GEI en el sistema BRT con tecnología diesel</i>	93
4.4.3.	<i>Emisiones de GEI en el sistema BRT con tecnología híbrida</i>	94
4.4.4.	<i>Emisiones de GEI en el sistema BRT con tecnología eléctrica híbrida</i>	94
4.4.5.	<i>Emisiones de GEI en el sistema BRT con tecnología eléctrica diesel</i>	95
4.5.	<i>Cantidad de usuarios transportados, Corredor Insurgentes</i>	95
4.6.	<i>Tabla resumen</i>	96
4.7.	<i>Comparativo de resultados</i>	97
4.7.1.	<i>Indicador de Energía Consumida por Usuario (MJ/Usuario)</i>	99
4.7.2.	<i>Indicador de Costo por Usuario (\$/Usuario)</i>	100
4.7.3.	<i>Indicador de Generación de GEI por Usuario (kg CO₂eq/Usuario)</i>	102
4.7.4.	<i>Indicador del Consumo energético por km recorrido (MJ/km)</i>	103
4.8.	<i>Etapas para la introducción de nuevas tecnologías</i>	104
CONCLUSIONES		110

SUGERENCIAS	113
INDICE DE TABLAS.....	115
INDICE DE FIGURAS.....	116
REFERENCIAS.....	117

RESUMEN

En el presente trabajo se establecen un conjunto de indicadores en materia de eficiencia energética basados en la experiencia obtenida a lo largo de 10 años en el Sistema de Corredores del Metrobús de la Ciudad de México. Con la finalidad de mostrar los cambios y progresos alcanzados a partir del cambio tecnológico y modificación del modelo operativo de transporte en la avenida Insurgentes, se realizó una evaluación de estas mejoras en el transporte público de pasajeros, debido al recientemente interés por los sistemas de autobús de tránsito rápido (*Bus Rapid Transit* en inglés, BRT), y en gran medida por los innumerables problemas de movilidad urbana presente en muchas ciudades de la República Mexicana, en donde se observa que los resultados obtenidos por el Metrobús pueden ser una oportunidad para mejorar las condiciones de movilidad.

Asimismo, este trabajo expone los avances en la eficiencia energética a partir de introducir mejoras en el funcionamiento operativo del sistema de transporte público de pasajeros, así como por el ascenso tecnológico de su flota vehicular.

En los resultados, se resalta una notable reducción del consumo de energía a medida que se incorpora un ascenso tecnológico en el transporte público de pasajeros; y por ende, una disminución de los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos al ambiente; sin embargo, a mayor ascenso tecnológico mayor costo, los cuales son transferidos al usuario del sistema de transporte público de pasajeros.

Con respecto a los indicadores propuestos, estos cuantifican el grado de mejora al combinar el ascenso tecnológico y el cambio en el esquema operativo, pero también resalta un incremento sustancial de costo; por lo cual se incluye en este trabajo las etapas requeridas para el lograr un ascenso tecnológico en el transporte público de pasajeros.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (Congreso de la Unión, 2008), la Eficiencia Energética se define de la siguiente manera:

“Todas las acciones que conlleven a una reducción económicamente viable de la cantidad de energía necesaria para satisfacer las necesidades energéticas de los servicios y bienes que requiere la sociedad, asegurando un nivel de calidad igual o superior y una disminución de los impactos ambientales negativos derivados de la generación, distribución y consumo de energía. Queda incluida dentro de esta definición, la sustitución de fuentes no renovables de energía por fuentes renovables de energía.”

Esta definición se puede interpretar como la adecuada administración de la energía, reduciendo el consumo de energía, pero sin afectar los niveles de desempeño de los usos finales de la misma.

La faceta del uso eficiente de la energía, nace a partir de la crisis petrolera, en la cual se generó un gran esfuerzo para desvincular el consumo de combustible del progreso económico en los países más industrializados, lo anterior mediante el desarrollo de tecnologías que produjeran los mismos o mejores resultados con menos recursos energéticos utilizados.

A la cabeza de esta revolución tecnológica estuvieron: Canadá, Estados Unidos de América, Alemania, Japón y Francia.

Existen tres factores detonantes principales para el implemento de una estrategia de Eficiencia Energética.

- a) Por ahorro económico.
- b) Por agotamiento de los recursos no renovables.
- c) Por razones ambientales.

El concepto de Eficiencia Energética es una contribución al desarrollo sustentable, combinando el uso racional de recursos, la energía requerida para el crecimiento económico y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En un sentido más amplio, la eficiencia energética puede incluir, la conservación de la energía, la reducción de la demanda y el uso racional de la energía.

Un punto importante en una política para alcanzar una eficiencia energética, es la reducción del consumo específico, sin afectar la calidad de vida o el proceso productivo.

De acuerdo al Balance Nacional de Energía 2012, la producción mundial de energía primaria en el 2011 superó los 550,000 PJ (ver Figura 1). De este monto, los países con mayor consumo energético fueron China con 18.3% y Estados Unidos con 16.9% del total, seguidos por India, Rusia y Japón con el 5.5%, 5.1% y 3.5%, respectivamente (Secretaría de Energía, 2012). Estos cinco países en conjunto consumieron 49.4% de la energía a nivel global, siendo el petróleo el mayor generador de energía, México ocupó el décimo sexto lugar a nivel mundial en el consumo de energía con 8,800.00 PJ (1.6% del total de energía producida).

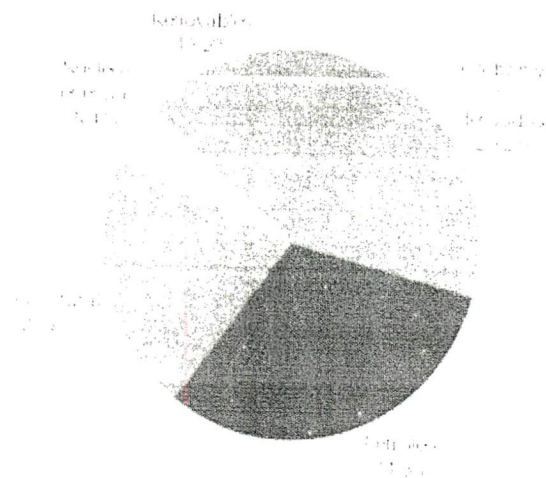


Figura 1 Producción mundial de energía primaria, 2011

552.731.580 PJ

Fuente: Balance Nacional de Energía 2012.

En relación al consumo por sector, el principal consumidor a nivel mundial fue la industrial con un gasto superior a los 107,000 PJ representando el 28.7% del total de energía producida, seguido por el transporte con un gasto cercano a los 102,300 PJ representando el 27.4% del total de energía producida y el residencial con 86,784 PJ con el 23.2% del total de energía producida (ver Figura 2).

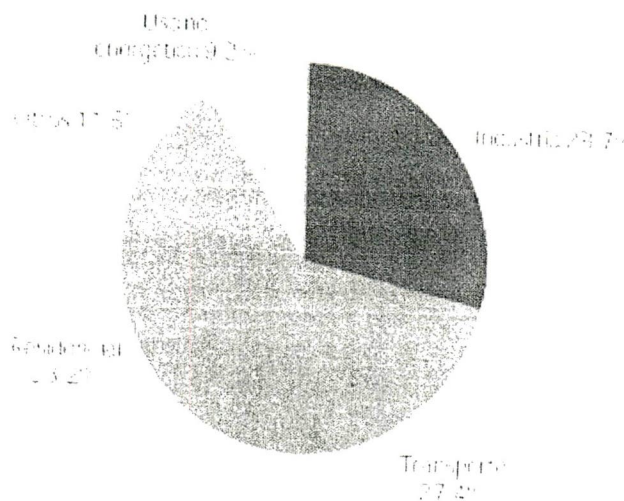


Figura 2 Consumo mundial de energía por sector, 2011.

552,731.580 PJ

Fuente: Balance Nacional de Energía 2012.

Para el caso de México, la energía destinada a los procesos y actividades económicas, así como la que se emplea para satisfacer las necesidades energéticas de la sociedad alcanzó un consumo de 4,900 PJ, donde el sector con mayor gasto energético se encuentra situado en el Transporte, consumiendo 27.4% del total de energía utilizada, 2,282.35 PJ (Secretaría de Energía, 2012).

Ahora bien, al desglosar la energía consumida por el Transporte en México, encontramos el siguiente análisis (ver Tabla 1):

Tabla 1. Consumo de energía en el sector transporte, 2011

Sector	Consumo(PJ)	Porcentaje (%)
Transporte	2,282.35	100
✓ Autotransporte	2,098.21	91.93
✓ Aéreo	121.19	5.31
✓ Marítimo	32.67	1.43
✓ Ferroviario	26.38	1.16
✓ Eléctrico	3.91	0.17

Fuente: Balance Nacional de Energía 2012.

Como se puede observar, el consumo de energía por parte del Autotransporte es claramente dominante, con el 43% de la energía consumida en el país, esto nos lleva a entender que una política de eficiencia energética en este sector significa el trabajar sobre casi la mitad del consumo energético total en el país.

Hablando del autotransporte, podemos identificar un punto de atención en el transporte público de pasajeros; donde además de una importante problemática energética, las deficiencias de movilidad y la problemática social enmarcan una condición caótica para este sector (Molinero, Situación Actual del Transporte Urbano en México, 2014).

La necesidad de movilidad de los habitantes detonó una problemática en las grandes urbes; el desarrollo y planeación de las áreas urbanas ha tomado gran importancia en la actualidad, los especialistas afirman que cada vez es necesario alejarse más de la ciudad para encontrar "el medio natural" y así, poco a poco, nos tropezamos con otra ciudad y la totalidad del territorio queda urbanizado.

Las condiciones de movilidad en las grandes y medianas ciudades tienden a incrementarse en la medida de la diversificación de las actividades de la población y de un inadecuado modelo de ordenamiento urbano. Ejemplo significativo es la Zona Metropolitana del Valle de México, en la que se realizan más de 30 millones de

viajes/persona/día, de los cuales el 73% usan transporte colectivo (Molinero, Situación Actual del Transporte Urbano en México, 2014).

La calidad de vida en las ciudades está determinada, entre muchos otros factores, por la eficiencia del transporte público, ya que el mal funcionamiento de los sistemas de transporte urbano genera problemas de excesivo consumo energético, congestión vehicular, accidentes y graves problemas de contaminación atmosférica, problemática que es enfrentada hoy en día por la Ciudad de México, donde sus pobladores invierten hasta tres horas en sus viajes cotidianos, esto producto de recorridos largos con mayor consumo energético.

En la Ciudad de México, la mayoría de los viajes en transporte público de pasajeros se hacen en microbuses y autobuses, con una sobre oferta de unidades, vehículos inadecuados, rutas mal planeadas, originando un sistema de transporte altamente ineficiente (Molinero, Situación Actual del Transporte Urbano en México, 2014).

Uno de los sistemas de transporte público de pasajeros que opera en la Ciudad de México, es el transporte concesionado, el cual opera con diversos niveles de integración; existen algunas rutas organizadas como empresa, sin embargo, la mayor parte de este sistema de transporte público de pasajeros aun opera sobre un esquema hombre – camión. Este tipo de transporte público se caracteriza por contar con vehículos contaminantes, energéticamente ineficientes y una nula administración operativa, con una autocompetencia inexplicable. Es cotidiano observar dos o tres vehículos con los mismos destinos, tratando de acaparar usuarios, lo que da lugar a un alto consumo energético, tanto por una total ausencia de conducción económica, como por la operación de un número mayor de unidades necesarias.

Aunado a lo anterior, la tarifa establecida para este sistema de transporte está asignada por la Secretaría de Movilidad del Distrito Federal (SEMOVI), fijado de acuerdo al recorrido realizado, lo que ocasiona disminución de los gastos asignados al mantenimiento al ir aumentando el costo de las refacciones, dando paso a una

ausencia de programas de mantenimiento produciendo unidades altamente contaminantes y energéticamente ineficientes.

Mecanismo como la Revista Vehicular realizada por la Secretaría de Transporte y Vialidad del Distrito Federal (SETRAVI, 2014) y la Verificación Vehicular por parte de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SEDEMA, 2014), están orientadas a lograr mejores condiciones mecánicas de las unidades, entre ellas las destinadas al transporte público de pasajeros, desgraciadamente no se encontraron mecanismos orientados a un correcto consumo energético en el transporte público de pasajeros.

La avenida de los Insurgentes en la Ciudad de México, ha sido una muestra del avance tecnológico en el transporte público de pasajeros, cambiando de un sistema de transporte concesionado a un sistema de transporte bajo el concepto "*Bus Rapid Transit*" (BRT), establecido bajo el nombre de Metrobús. Este sistema se encuentra próximo a cumplir 10 años de operación, tiempo en el cual se ha acumulado experiencia e información para generar importantes análisis de desempeño; es por ello que surge la inquietud de tomar el Corredor Insurgentes como caso de estudio para este trabajo con los datos generados durante el año 2014.

Bajo el entendido del siguiente diagrama:

SI NO SE MIDE, NO SE CONTROLA.

SI NO SE CONTROLA, NO SE ADMINISTRA

SI NO SE ADMINISTRA, NO SE AHORRA.

Para el caso de este estudio, buscamos resaltar los beneficios energéticos al mejorar la tecnología en los autobuses utilizados, sin embargo todo esto debe realizarse bajo lo establecido en la definición de eficiencia energética, mantener o superar el nivel de calidad, que para nuestro caso se establece en el número de

usuarios transportados y esto acompañado de una disminución en los impactos ambientales negativos.

Este trabajo consta de cuatro capítulos; en el primero está destinado a describir los Conceptos Generales tales como:

- Conceptos del transporte público de pasajeros de basados en autobuses.
- Tecnología disponible para operar en el transporte público de pasajeros.
- Mantenimiento necesario para las diferentes tecnologías disponibles.

El Capítulo 2 describe el concepto BRT, el cual fue implementado en nuestro caso de estudio, marcando la pauta para un ascenso tecnológico de la flota vehicular y uso adecuado del equipo.

El Capítulo 3 arroja los datos generados por nuestro caso de estudio, siendo la materia prima para realizar un análisis del consumo energético, de los costos, de las características operativas, emisiones de GEI y cálculo del parque vehicular necesario para cubrir las necesidades de servicio que imperan actualmente en el Corredor Insurgentes.

El Capítulo 4 aporta la parte más importante de este trabajo, ya que es en esta sección donde se establecen los resultados para las diferentes tecnologías propuestas, con la intención de otorgar una herramienta a los tomadores de decisiones y diseñadores de transporte, para incentivar el mejoramiento en la eficiencia energética en el transporte público de pasajeros, a través de un uso adecuado de los recursos y un ascenso tecnológico, manteniendo siempre el nivel de capacidad para transportar usuarios.

Finalmente los resultados, donde se busca plasmar de forma sintetizada los beneficios otorgados por el análisis realizado en este trabajo, buscando incentivar el ascenso tecnológico conjugando una visión energética, ambiental y económica.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Proponer indicadores que permitan evaluar la eficiencia energética en el transporte público urbano.
- Identificar los beneficios de la evolución tecnológica a través del análisis a los indicadores propuestos para mejorar la eficiencia energética en la movilidad urbana.
- Sugerir las etapas a superar al introducir nuevas tecnologías para lograr mejores resultados en el consumo energético, costo y emisiones de GEI que los obtenidos con las tecnologías que se intentan sustituir.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Identificar la oferta tecnológica disponible en el transporte público de pasajeros y analizar sus características.
- Analizar el consumo energético en el caso de estudio de las diferentes tecnologías y realizar un análisis comparativo.
- Calcular los costos de operación en el caso de estudio de las diferentes tecnologías y realizar un comparativo del costo transferido al usuario por el uso de mejores vehículos.
- Determinar la cantidad de emisiones de GEI en el caso de estudio de las diferentes tecnologías y realizar un análisis.
- Establecer el modelo operativo de cada una de las tecnologías disponibles para establecer el material rodante necesario.
- Identificar la cantidad de usuarios transportados en el Corredor Insurgentes con la tecnología actual para mantener la calidad del servicio con diferentes tecnologías.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1. Ascenso tecnológico en el transporte

De acuerdo a lo planteado por Chávez, en su Tesis Doctoral bajo el título “Estudio Energético-Ambiental del Sector Transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México” (Chávez, 2014), en donde se expresa lo siguiente:

“La movilidad urbana sostenible se define en función de la existencia de un sistema y estándares de transporte capaces de proporcionar los medios y oportunidades para cubrir las necesidades económicas, ambientales y sociales, de manera eficiente y equitativamente, evitando los innecesarios impactos negativos y sus costos asociados.”

Es notoria la necesidad de una transformación en el transporte público hacia un horizonte sustentable; es por ello que este estudio parte de un esfuerzo realizado por el Gobierno del Distrito Federal para mejorar la movilidad de la ciudad y donde se encuentra un caudal de oportunidades para incentivar la inclusión de mejores tecnologías en vehículos destinados al transporte público de pasajeros.

Países como Colombia, han aceptado el reto de transformar la flota de vehicular destinada al transporte público de pasajeros bajo los siguientes tres ejes rectores.

- A. La racionalización de los viajes (y distancias recorridas) en vehículos motorizados.
- B. La mejora y promoción del uso de sistemas de transporte masivo.
- C. La mejora de la tecnología del parque vehicular, incluyendo la elevación de la calidad ambiental de los combustibles utilizados.

Como en muchas ciudades del mundo, el crecimiento del parque vehicular en Colombia ha acumulado vehículos con viejas tecnologías, generando una alta cantidad de GEI a la atmósfera; situación que han planteado disminuir a través del

Plan de Ascenso Tecnológico (Gobierno de la Ciudad de Bogotá, 2013), además de designar a la Ciudad de Bogotá, ciudad laboratorio y banco de pruebas para nuevas tecnologías del transporte.

En una primera etapa se insertaron 400 autobuses híbridos (Diesel-Eléctrico) a las calles de Bogotá y continuar con esta política pública para el resto del transporte urbano, el proyecto pretende retirar en esta primera etapa 2,000 autobuses con tecnología a Diesel y consumir 30% menos combustible (Gómez Y. , 2014).

Afortunadamente Colombia no es el único país que ha iniciado estas acciones en aras de lograr una movilidad sustentable, la Ciudad de Milton Keynes, Inglaterra, es otro espacio donde la inserción de nueva tecnología en el transporte urbano ha ocupado un espacio importante (Miles & Potter, 2014), esta ciudad Inglesa implemento a inicios del 2014 un servicio con autobuses eléctricos; este proyecto fue diseñado para contar con puntos de recarga a lo largo de la ruta y con ello disminuir el tamaño del paquete de baterías, lo que paralelamente da un menor costo de esta tecnología.

Así mismo, otras ciudades de Europa como Tel-Aviv (BYD, 2013), han iniciado proyectos de esta índole, sin embargo, cada uno de estos proyectos aun se encuentran en periodo de maduración y lejos de poder cubrir las condiciones que imperan en la Ciudad de México.

1.2. Movilidad en la Ciudad de México

La Ciudad de México, lo mismo que muchas ciudades atraviesan por una grave crisis de movilidad, estos problemas requieren una solución a futuro, pues el crecimiento acelerado de las zonas urbanas va complicando con mayor celeridad. Los modelos de transporte público de pasajero a base de autobuses utilizados actualmente en la Ciudad de México, presentan múltiples problemas relacionados

con la movilidad y la salud, entre los cuales podemos mencionar el deterioro del parque vehicular, el congestionamiento de las vías, alto consumo energético, el ruido, la contaminación ambiental, así como los accidentes de tránsito.

Podemos decir que la Ciudad de México tiene en el transporte público de pasajeros uno de los problemas más difíciles y onerosos de solventar, pero al mismo tiempo impostergable.

De acuerdo al Anuario 2012 de la Secretaría de Transporte y Vialidad del Distrito Federal (SETRAVI, 2012), la Ciudad de México contaba con 4.46 millones vehículos registrados; sin embargo la cantidad de unidades que transitan en la ciudad es mayor, debido al uso de vehículos con placas de los estados contiguos al Distrito Federal. El transporte público de pasajeros de la Ciudad de México tiene 28,600 vehículos operando bajo el esquema de concesionario (FIMEVIC, S.F.), una cantidad significativamente menor comparada con la cantidad de vehículos particulares, esta baja cantidad de vehículos destinados al transporte urbano, el pésimo mantenimiento a estos vehículos y los modelos operativos obsoletos, han generado el aumento del uso del automóvil particular, acción totalmente contraria a las prácticas de mejora a la movilidad como lo es el cambio modal.

El cambio modal se entiende como la capacidad que tiene una ciudad para incentivar a sus habitantes en realizar sus traslados en transporte público, abandonando el uso del automóvil particular; para el caso de la eficiencia energética esta política puede ser su mejor aliado, ya que un autobús mediano tiene la capacidad de transportar a la misma cantidad de gente que 76 automóviles particulares, pues la tasa de ocupación de un vehículo particular en el distrito federal es de 1.2 pasajeros por vehículo (SEDEMA, 2006).

Sin embargo, para lograr resultados alentadores en con respecto al cambio modal, es necesario contar con un sistema de transporte eficiente, un requerimiento impostergable para la Ciudad de México; ahora bien, es necesario mejorar el modelo operativo de transporte público de pasajeros de la Ciudad de México, acompañado

de un ascenso tecnológico, lo cual dará como resultado beneficios energéticos, ambientales, así como una mejora en la movilidad de la ciudad, otorgando a los habitantes una mejor calidad de vida.

Con base en lo descrito anteriormente surge la intención de generar parámetros comparativos para evaluar los beneficios de un ascenso tecnológico en el transporte público de pasajeros; se ha encontrado información acerca del consumo energético y emisión de GEI a la atmósfera para diferentes tecnologías, sin embargo, en ningún punto se menciona si las tecnologías investigadas conservan la calidad del servicio, que en este caso se enfoca en la capacidad de usuarios transportados.

La avenida de los Insurgentes en la Ciudad de México, ha marcado la pauta en el mejoramiento del transporte urbano, realizando un cambio tecnológico en el material rodante y un mejoramiento en el modelo de operación sustituyendo un sistema de transporte concesionado por un modelo de operación bajo el concepto *Bus Rapid Transit* (BRT).

1.3. Modelos de transporte público de pasajeros

1.3.1. Modelo de transporte concesionado

El actual transporte Público Concesionado de Pasajeros se remonta a los "tolerados", donde el dueño de la concesión era el dueño del taxi (hombre – taxi), el servicio de transporte colectivo en ciertas partes de la Ciudad, en realidad eran taxis a los que les resultaba más rentable su negocio si ofrecían este servicio. Este servicio lo ofrecían aprovechando las deficiencias de oferta de las líneas camioneras existentes en esos días.

Las primeras organizaciones de taxistas lograron su reconocimiento obteniendo la explotación de rutas fijas, por lo que se denominaron "Taxis Colectivos con ruta fija".

A inicios de 1980, la Alianza de Camioneros desaparece y se crea el organismo público descentralizado Autotransportes Urbanos de Pasajeros Ruta-100 (Hernández, 2007). Paralelamente se incorporan al servicio las "combis", sustituyendo a los antiguos taxis. Esta es una de las primeras acciones de cambio tecnológico que existió en este tipo de transporte e incluyendo la avenida de los Insurgentes, con la cual se aumentó la capacidad de usuarios a transportar.

Posteriormente se presenta nuevamente un cambio en la oferta de servicio, cuando se incorpora el concepto microbús, el cual era un vehículo de carga adaptándolo al transporte de pasajeros y pese a la falta de condiciones necesarias para ser utilizados en el transporte público de pasajeros, dio lugar al crecimiento desmedido de este tipo de transporte, trayendo consigo una sobreoferta de servicio.

El modelo operativo de este tipo de transporte está estructurado de la siguiente manera:

- El recaudo se lleva a cabo a través del chofer del autobús.
- El chofer recibe el importe por el viaje del usuario.
- La tarifa se establece a partir de la distancia a recorrer y el tipo de unidad.
- Los ingresos cubren:
 - Pago al concesionario.
 - Pago al Chofer.
 - Pago al despachador.
 - Pago al ayudante del chofer.
 - Pago de tarjeta (Pago a la Ruta).
 - Combustible.

Este modelo contribuye a la ineficiencia del transporte público de pasajeros, debido a que el operador cobra de acuerdo al número de usuarios que transporta, conviviendo diariamente con la sobreoferta que obliga a cada chofer a ser partícipe de la guerra del centavo, la cual se entiende como la competencia en todo momento con el resto de las unidades por captar más usuarios. Estas prácticas llevan a un

nulo uso de técnicas de conducción económica y defensiva, lo que hace a este tipo de transporte ineficiente energéticamente, aunado a lo anterior es común la operación de un mayor número de unidades de las requeridas.

Al quedar en manos del dueño de la concesión el modelo económico, nunca se contempla el mantenimiento del vehículo y mucho menos la sustitución.

1.3.2. Modelo de corredor de transporte

Los corredores de transporte público de pasajeros es un concepto que ha tomado importancia en los últimos años para la Ciudad de México, ha sido un esfuerzo para tratar de cambiar el arcaico modelo de hombre-camión. Su operación puede ser de manera convencional como lo realiza el transporte concesionado o bien sobre carriles preferenciales.

En relación a la operación sobre carriles preferenciales, encontramos a los Corredores Cero Emisiones operados por el Sistema de Transportes Eléctricos del Distrito Federal, los cuales operan con trolebuses.

Por otro lado, están aquellos corredores que operan sobre tránsito mixto. En donde uno de los beneficios encontrados en este concepto ha sido la sustitución del parque vehicular, la generación de empresas para sustituir el modelo de hombre-camión y pequeños indicios para realizar un uso eficiente del equipo; este concepto ha estado respaldado por la Secretaría de Movilidad del Distrito Federal, tratando de obtener un transporte sustentable, contando con el número correcto de unidades para dar servicio a los usuarios que ocupan la ruta donde se establecerá el corredor, ordenar a los concesionarios en una empresa para establecer esquemas organizacionales, permitiendo contar con personal de mantenimiento y operación necesarios para establecer programas de mantenimiento y dar seguimiento a los parámetros

operativos, tales como consumo de combustible, medición de índices de GEI y control de la flota.

Desgraciadamente podemos identificar en los Corredores de Transporte implementados recientemente, que la sustitución del parque vehicular solo ha renovado la flota y no ha existido un avance tecnológico en los nuevos autobuses; carrocerías montadas en chasis de carga son la imagen del parque vehicular en estos nuevos corredores, con transmisiones estándar, carentes de sistemas de apoyo para el frenado, suspensiones mecánicas, motores con tecnología de emisiones obsoleta, entre otros tantos puntos. Es normal observar estas unidades con las mismas características mecánicas, operar ya sea en zonas montañosas que en planicies, en rutas suburbanas de alta velocidad, como en áreas con condiciones críticas de tránsito.

Sin embargo, es importante resaltar que estos sistemas han comenzado por tratar de implementar modelos operativos para un uso correcto de la flota vehicular, que sin ser su objetivo, han generado menores consumos de energía, tanto por la renovación del parque vehicular, como por un uso correcto de estos vehículos.

1.3.3. Modelo de transporte “Bus Rapid Transit” (BRT)

El concepto de Autobús de Rápido Tránsito (BRT) fue desarrollado en los años 70’s, retomando el concepto de “*busways*” o carriles exclusivos para autobuses de transporte público de pasajeros que inició en la década de 1930 en Estados Unidos, el “*busways*” se implementó por primera vez, en el año 1939, en la ciudad de Chicago, Illinois (Alcaldía Municipal del Distrito Central de Honduras, S.F.).

En Europa, se desarrolló un concepto parecido, al crear el sistema de autobuses guiados para agilizar el tránsito del transporte público de pasajeros. Entre otras

ciudades, los sistemas guiados funcionaron en Essen, Alemania y Adelaide, Australia.

Aunque lograron velocidades promedio más altas, estas experiencias no alcanzaron el éxito que se esperaba porque la capacidad de pasajeros era limitada, haciendo que siguieran siendo considerados como de baja capacidad.

Superando las experiencias de Europa y Estados Unidos, la ciudad de Curitiba, Brasil, desarrolló un nuevo concepto que iba más allá del derecho de vía exclusivo en la calle, implementado este modelo de transporte como una herramienta para fomentar el desarrollo. En el año 1972, Curitiba incorporó una red de vías exclusivas para autobuses y estimuló el desarrollo del suelo de alta densidad y usos mixtos a lo largo de los cinco corredores de transporte principales (Institute for transportation&Development policy, 2007). La gestión pública de tendencia sustentable de Curitiba se fundamenta en principios similares como facilitar el uso del sistema de transporte público de pasajeros masivo.

Una característica de este concepto de transporte es la organización de los concesionarios en empresas operadoras para cambiar el concepto de hombre-camión a sociedades, que permiten estructurar un organigrama para alcanzar una administración adecuada con el correcto manejo del parque vehicular.

El BRT es una opción de transporte público de pasajeros innovador que por su naturaleza pretende alcanzar el máximo aprovechamiento de sus equipos, combina la eficiencia y la calidad del metro, con la flexibilidad y el bajo costo de los autobuses. Este concepto alcanza niveles de velocidad, capacidad y comodidad comparables con los sistemas ferroviarios, pero se puede construir en una fracción de su costo y tiempo. Las ventajas en su funcionalidad y eficiencia con respecto a otros medios de transporte son significativas centrándonos en cuestiones de movilidad.

En los últimos años el sistema BRT ha logrado resultados alentadores en diferentes ciudades mexicanas, proyectos como: Metrobús en la Ciudad de México; Optibús en

León; Mexibús en el Estado de México; Macrobus en Guadalajara; así como recientemente, Ecovía en la Monterrey y RUTA en Puebla, en donde han logrado movilizar a los habitantes de estas ciudades dentro de panoramas totalmente adversos, consiguiendo sobre ponerse a problemas de diferente índole.

Las ciudades de América Latina han liderado la implementación de Sistemas de Transporte Público Masivo de Autobuses tipo BRT, un modo de transporte que generalmente se caracteriza por el desarrollo de infraestructura que dan prioridad al transporte público de pasajeros en relación con el transporte de otros tipos de vehículos, ofrece la posibilidad de pagar la tarifa antes de tomar el autobús y permite un rápido acceso al mismo (ver Figura 3).

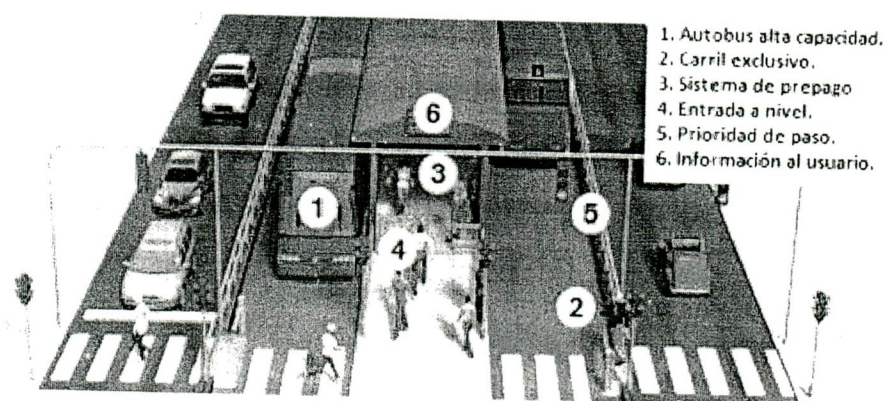


Figura 3 Soluciones de transporte.

Fuente: www.volvobuses.com

En la Ciudad de México el modelo BRT fue adoptado bajo el nombre de Metrobús, iniciando operaciones a mediados de 2005 con el Corredor Insurgentes.

Un transporte sustentable, debe incluir un seguimiento puntual a la eficiencia energética, como lo menciona el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo., 2012); donde se menciona la necesidad de fomentar la eficiencia energética en tres niveles diferentes. Hay potencial para lograr una mayor eficiencia energética de los vehículos individuales (eficiencia de los vehículos) y de los viajes (eficiencia de los viajes), así como del sistema completo de transporte (eficiencia del sistema).

El Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo plantea tres niveles de eficiencia energética en el transporte, con tres estrategias básicas para mejorarla.

- Evitar el aumento de actividad del transporte y reduciendo la demanda actual de transporte.
- Cambiar la demanda a modos más eficientes de transporte.
- Mejorar los vehículos y los combustibles utilizados.

Lo anterior bajo los principios de *Evitar – Cambiar – Mejorar (ECM)*, todo esto orientado a generar un sistema de transporte sustentable, donde cada estrategia aborda un nivel diferente dentro de la eficiencia energética.

- Evitando / Reduciendo la demanda de transporte se mejora la eficiencia energética.
- Cambiando la demanda, se aumenta la eficiencia de los viajes.
- Mejorando los vehículos y combustibles, se incrementa la eficiencia del vehículo.

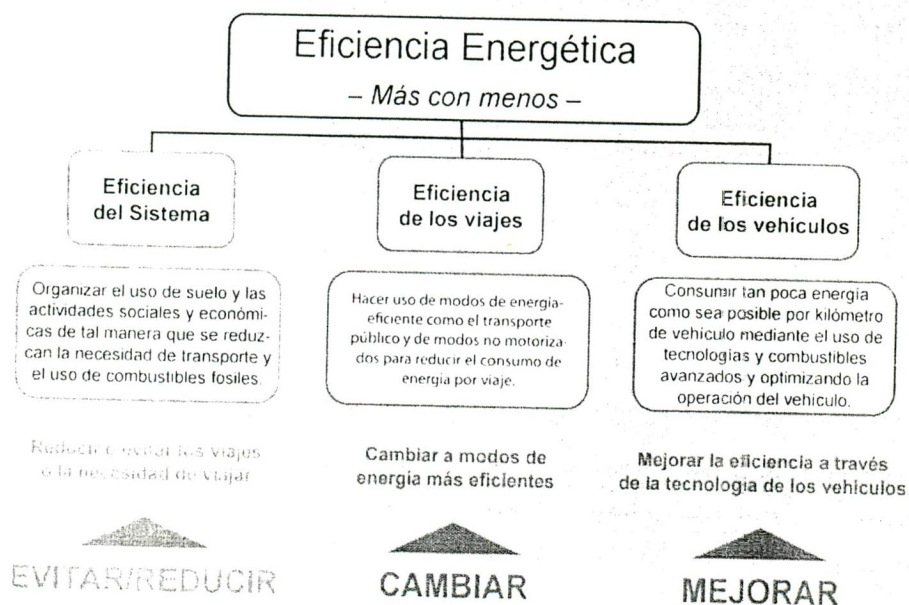


Figura 4 Eficiencia Energética en el Transporte.

Fuente: El Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo.

Se piensa que la introducción del concepto BRT en la Avenida de los Insurgentes cumple con lo planteado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo, como se menciona a continuación.

1. Se ha promovido la eficiencia del sistema a través de la generación de una red de transporte, buscando satisfacer los requerimientos de origen-destino de los habitantes, con lo cual se redujo el tiempo y la distancia de los viajes.
2. Al contar con un órgano regulador, cuenta con una administración de viajes, con lo cual se elimina una sobredemanda del servicio y por ende un transporte energéticamente más eficiente, así como promover es cambio modal de usuarios que han dejado el vehículo particular para utilizar el transporte público de pasajeros.
3. Se ha apostado por un avance tecnológico para reducir el consumo energético y transporta la mayor cantidad de usuarios.

Es por ello se ha tomado el Corredor Insurgentes como caso de estudio.

1.4. Autobuses para transporte urbano

1.4.1. Autobuses utilizados en el modelo de transporte concesionado

Como se ha mencionado dentro de este capítulo el transporte público de pasajeros concesionado está constituido en su mayoría por unidades de pequeña y mediana capacidad, vagonetas, microbuses y autobuses, constituyen el parque vehicular de este medio de transporte, para este estudio contemplamos dos tipos de unidades las

cuales han sido utilizadas para la renovación del parque vehicular en muchas rutas de la Ciudad de México.

a) El Midibús.

De acuerdo a la NOM-067-SCT-2/SECOFI-1999, se entiende por Midibús al vehículo automotor de seis o más llantas, conformado por un chasis que incluye el tren motriz, suspensión, sistema de frenos neumáticos, equipo y accesorios para su operación, al cual se le ensambla una carrocería con capacidad mínima de 16 y máxima de 30 personas. La introducción de este vehículo tiene la intención de sustituir al concepto Microbús y en fechas recientes ha tomado importancia en el transporte de la Ciudad; desgraciadamente el Midibús solo aporta a la sustitución de flota, pero carece de avance tecnológico al omitir mejoras tanto de accesibilidad como de mejora en el consumo energético y reducción de de GEI al ambiente (ver Figura 3).



Figura 5 Midibús Ram 4000

Fuente: www.vanetesa.com.mx

b) Autobús tipo Bóxer.

El autobús tipo Bóxer es el concepto de vehículo con mayor presencia en el modelo de transporte concesionado; el diseño de esta unidad obedeció a brindar un autobús

económico y rentable, por lo cual se basó en un chasis de camión de carga con una carrocería para transporte de pasajeros. Desafortunadamente al igual que el Midibús solo aporta a la sustitución de flota y carece de avance tecnológico para la mejora del consumo energético y reducción de GEI al ambiente (ver Figura 4).

Boxer 40
MBO 1019/44

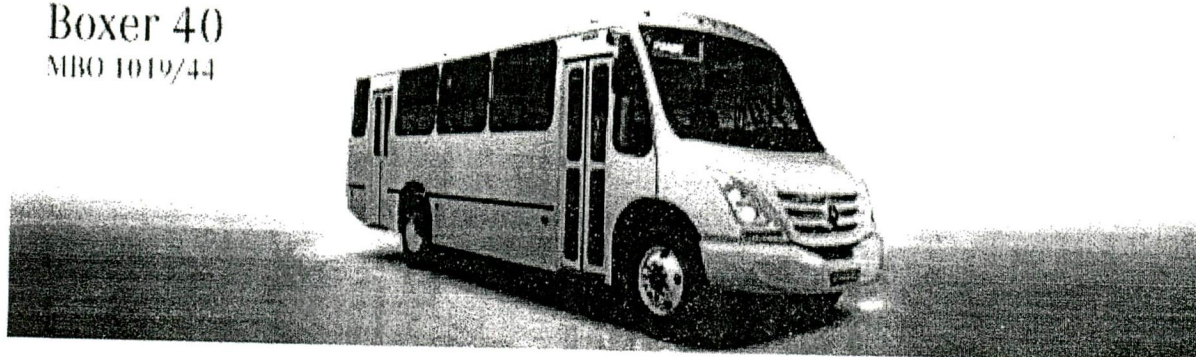


Figura 6 Autobús Bóxer.

Fuente: www.autobusesmercedesbenz.com.mx

1.4.2. Autobuses utilizados en el Modelo BRT

1.4.2.1. Autobuses Diesel

En este apartado se menciona la oferta de autobuses a tecnología Diesel disponibles en el país, con las características necesarias para operar bajo el concepto BRT y en específico para nuestro caso de estudio, el Corredor Insurgentes.

Durante el desarrollo de este estudio, se observó la presencia de todas las ofertas de autobuses a Diesel disponibles en el país con las características necesarias para operar en Avenida de los Insurgentes, dicha oferta está constituida por las siguientes marcas:

- Autobús articulado Scania (ver Figura 6).



Figura 7 Autobús Scania.

Fuente: www.scania.com

- Autobús articulado Mercedes Benz (ver Figura 7).

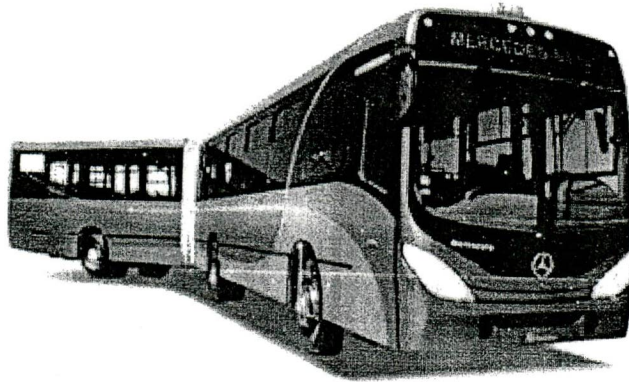


Figura 8 Autobús Articulado Mercedes Benz.

Fuente: www.autobusesmercedesbenz.com.mx

- Autobús articulado Dina (ver Figura 7).

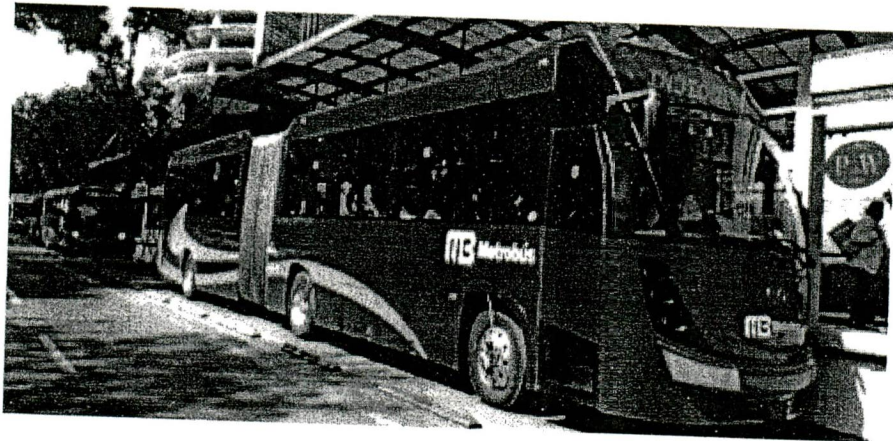


Figura 9 Autobús Articulado Dina.

Fuente: www.dina.com.mx

- Volvo, Modelo 7300 (ver Figura 9).



Figura 10 Autobús biarticulado Volvo.

Fuente: www.volvo.com.mx

Como se ha mencionado anteriormente, el concepto BRT es adaptable a diferentes necesidades de movilidad en la ciudad, sin embargo, esto también requiere de autobuses adaptables a estas características.

a) *Mantenimiento de Autobús Diesel*

Cada una de las empresas fabricantes de autobuses publican sus requerimientos de mantenimiento con características que se ajustan a las necesidades de sus productos; en la mayoría de los casos, estos mantenimientos son cíclicos y se enfocan principalmente en los cambios de elementos básicos de desgaste continuo, tales como, aceite, filtros de aire, filtro de aceite, refrigerantes, etc. Como se ha mencionado, las empresas fabricantes de autobuses para el transporte urbano y en este caso de estudio, para el concepto BRT, han generado sus programas de mantenimiento preventivo, los cuales se solicita sean realizados cabalmente para asegurar una operación correcta de los autobuses cuando se encuentren operando, sin embargo, se ha observado que los autobuses en el concepto BRT dejan de operar por fallas en los siguientes (ver Figura 10):

- Puertas.
- Motor.
- Sistema de enfriamiento.
- Sistema neumático.
- Suspensión.
- Sistema eléctrico.

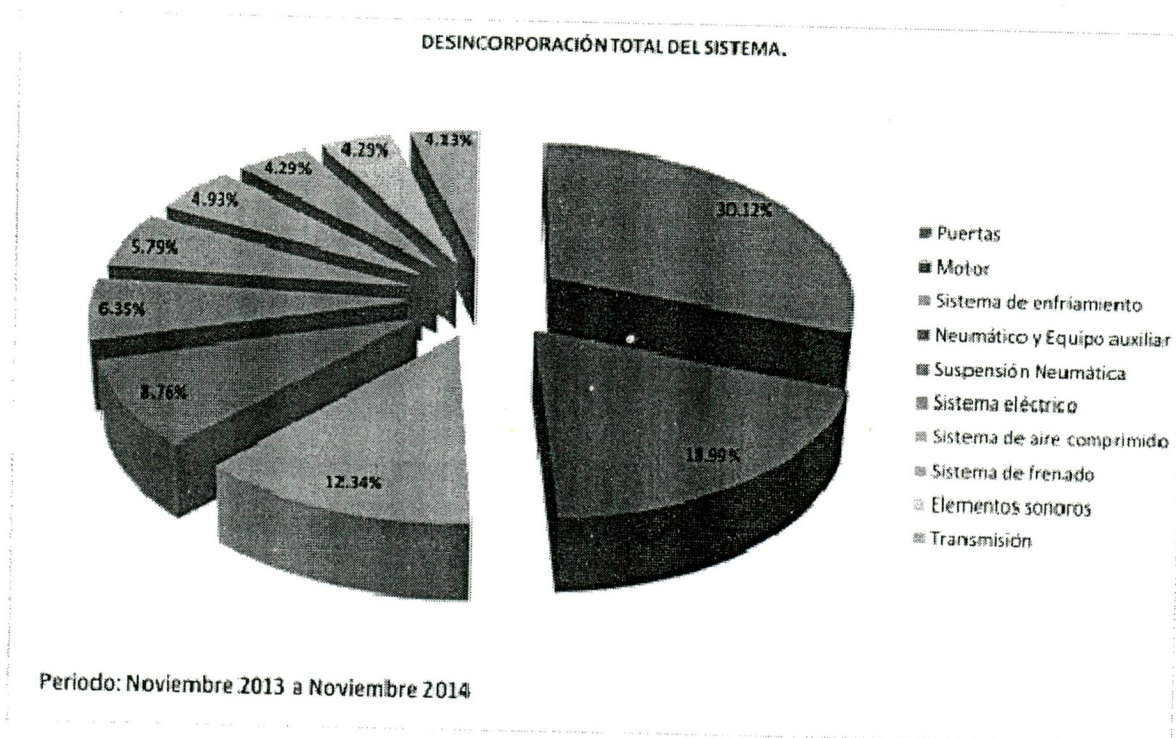


Figura 11 Desincorporación total del sistema.

Fuente: Gerencia Técnica de Metrobús.

Cada uno de los problemas mencionados provoca la pérdida de unidades en servicio, dando como resultado una menor oferta de espacios y con ello un transporte con una eficiencia energética menor, controlar las fallas que generan la pérdida de unidades en operación, ha llevado a estudiar innumerables opciones de mantenimiento para mejorar el rendimiento de los autobuses en servicio.

Las áreas encargadas del mantenimiento, están enfocados a mantener en las mejores condiciones a cada uno de los autobuses, desgraciadamente están desligadas de los problemas energéticos que producen las malas prácticas de mantenimiento; un autobús fuera de la operación somete a un desgaste mayor al resto de la flota en servicio, ya que se requiere absorber la oferta de lugares perdidos por el autobús que presentó alguna falla, esto ocasiona dejar de consumir combustible con el vehículo que salió de servicio, pero origina un consumo con los autobuses que seguirán operando.

En el mismo orden de ideas, es necesario contar con autobuses dedicados a sustituir a los autobuses en operación que serán sometidos a mantenimiento, de acuerdo a los datos con los que cuenta el área operativa de Metrobús, es necesario contar con un 12% adicional de autobuses para atender estas tareas; este dato cobra una especial relevancia al momento de realizar un modelo económico donde será absorbido el costo de estas unidades extras.

b) Conducción de Autobús Diesel

El esquema operativo de un corredor de transporte bajo el concepto BRT requiere un constante uso del sistema de frenos, generando una fuerte pérdida energética, cada que es frenado el autobús pierde energía cinética, la cual tendrá que ser aportada más tarde por el motor.

Una constante en este estudio, ha sido el identificar el uso de cada recurso para mejorar la movilidad de los usuarios y esto es entendible al tratarse de un proyecto de transporte; para el caso de la conducción no es una excepción, en donde los operadores obedecen a la seguridad de los usuarios, utilizando técnicas de manejo defensivo y mínimas acciones de manejo económico.

El manejo defensivo consiste en una serie de técnicas que ayudan al conductor a identificar riesgos potenciales en la conducción y a saber cómo evitarlos, basándose en un manejo para salvar vidas, tiempo y dinero a pesar de las condiciones existentes y/o de las acciones de otras personas.

La productividad y la necesidad de cumplir con los requisitos de tiempos de recorrido no están en conflicto con la seguridad y el consumo energético adecuado; se busca el que todo buen conductor pueda ser tanto productivo, como seguro, situación que será muy importante para la evolución tecnológica en el transporte.

De acuerdo a lo observado durante la recopilación de este trabajo, podemos expresar que una parte importante de una eficiencia energética en el transporte público de pasajeros recae en el operador, quien es el encargado de optimizar las características del vehículo para reducir altos consumos de combustible, tratando de potenciar las ventajas de los autobuses.

El consumo "normal" de combustible para un autobús en un concepto BRT depende del tipo de vehículo y características de la ruta; para nuestro caso de estudio nos referimos a autobuses articulados operando en el Corredor Insurgentes. Diferentes factores pueden influenciar en el consumo del combustible, las principales razones son el peso, el diseño del tren motriz y la velocidad del vehículo.

Los factores influyentes en el consumo de combustible, se pueden dividir en 4 categorías.

- La especificación del vehículo.
- Mantenimiento del autobús.
- La Ruta del vehículo.
- Las condiciones de tránsito, la cual varía de día a día.

La energía en un tren motriz bajo tecnología Diesel se distribuye de la siguiente forma (Holmberg, 2014):

- 30 % se pierde en los gases de escape.
- 20 % desaparece en el refrigerante de motor.
- 3 % se pierde en elementos como poleas.
- 47 % se transforma en energía mecánica.
 - 13.5 % se pierde en cuestiones aerodinámicas.
 - 33.5 % es utilizado para vencer la fricción de elementos mecánicos, frenos y neumáticos.

Una vez analizada la distribución de energía disponible del combustible, se establece que solo el 34 % es utilizado para mover el autobús.

Por tanto, es importante concientizar al operador para cuidado del consumo de combustible.

1.4.2.2. Autobuses Híbridos (Diesel – Eléctrico)

La Ciudad de México cuenta en el Sistema Metrobús con 8 autobuses híbridos, al hablar de un autobús híbrido nos referimos a una tecnología Diesel-Eléctrico; estos autobuses tienen una dimensión diferente a los autobuses utilizado la Avenida de los Insurgentes; Los vehículos utilizados en Insurgentes tienen una longitud de 18 y 25 metros, mientras los autobuses híbridos que opera Metrobús tienen una longitud de 12 metros.

La capacidad de las unidades es proporcional a su longitud.

- Autobús Articulado de 18 metros con capacidad de 160 pasajeros.
- Autobús Biarticulado de 25 metros con capacidad de 245 pasajeros.
- Autobús Corto Híbrido con capacidad de 90 pasajeros.

Para la Ciudad de México, sólo se cuenta con datos de comportamiento de autobuses híbridas de 12 metros, los cuales han operado desde abril del 2012 (ver Figura 11); ahora bien, la operación del Corredor Línea 1 de Metrobús requiere no solo autobuses articulados híbridos, por lo cual es necesario contar con unidades de doble articulación con capacidad de usuarios no menor a 245 personas. De acuerdo a la investigación realizada en este trabajo, en el mercado no existe una gran variedad de unidades de esta capacidad con tecnología híbrida, se encontró que solo la marca VOSSLOH cuenta con autobuses de doble articulación con tecnología híbrida (Vossloh Kiepe, S.F.).

Se puede proyectar consumos de combustible 30% menores para esta tecnología con respecto a los autobuses diesel convencionales, esto en una operación de transporte público de pasajeros (Lajunen, 2014).

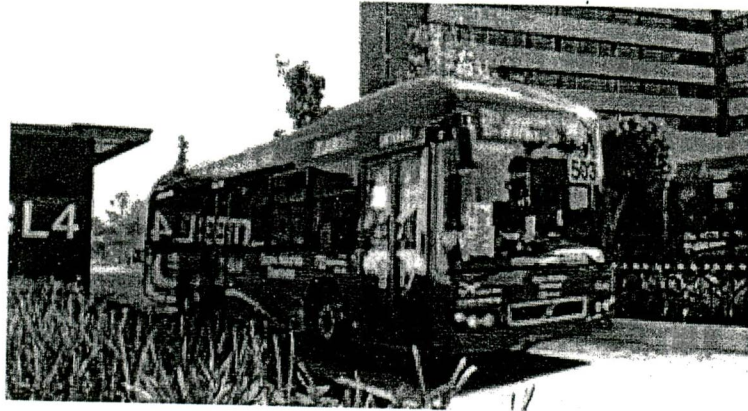


Figura 12 Autobús Volvo híbrido 12 metros

Fuente: www.volvo.com

a) Mantenimiento de Autobús Híbrido.

En este caso, además de las necesidades de mantenimiento detalladas para autobuses a Diesel, se insertan los mantenimientos necesarios para un sistema de propulsión eléctrico, en donde se resaltan elementos como:

- Motor – Generador Eléctrico.
- Transmisión.
- Sistema de almacenamiento de energía.
- Conversor de CA/CC.
- Sistema de enfriamiento para equipo eléctrico.
- Sistema electrónico para modo Híbrido.

Como se observa, un autobús híbrido (Diesel-Eléctrico) requerirá un proceso de mantenimiento más extenso, al contar con dos sistemas a los cuales se tiene que

atender; los promotores de esta tecnología mencionan que al ser el motor eléctrico un elemento más eficiente requiere de un mantenimiento menor y que el motor Diesel es utilizado menos horas en operación. Lo descrito anteriormente da como resultado, procesos de mantenimiento más extendidos y una mayor cantidad de autobuses en reserva técnica produciendo costos mayores, es por ello que una flota de autobuses híbridos no puede tener una reserva técnica menor al 15 % de la cantidad de vehículos que estarán en operación, esto para hacerle frente a los diferentes procesos de mantenimiento y conservación de la flota.

De acuerdo a la práctica, esta tecnología aún no se encuentra totalmente asentada, por lo que los autobuses bajo esta tecnología requieren un proceso de maduración, para reducir costos y preparar personal técnico especializado.

b) Conducción de Autobús Híbrido

El inciso de conducción en autobuses diesel fue muy extenso para dejar claro las características necesarias del manejo de autobuses con tecnología Diesel, para las siguientes dos tecnologías se cuentan con aporte de energía cinética a partir de un motor de combustión interna alimentado por Diesel.

La virtud de un autobús híbrido (Diesel-Eléctrico) se centra en aprovechar el rompimiento del reposo a partir de un motor eléctrico, así como recuperar energía durante la acción de frenado del autobús, sin embargo, si no contamos con energía disponible en el banco de baterías nos es imposible utilizar el motor eléctrico al arranque de la unidad, es por ello que un consumo reducido de combustible, acompañado de una correcta recuperación de energía, nos ofrece en este ciclo cogenerativo un área de oportunidad para mejorar la eficiencia energética en el transporte urbano.

Ahora bien, un conductor de autobús híbrido debe recuperar la mayor capacidad de energía disponible durante el frenado, es por ello que en las ocasiones que se accionado el sistema de frenado, este debe ser orientado a una recuperación energética, a través de la recuperación de energía mediante el generador eléctrico con el que cuentan los autobuses híbridos; por tanto un ***operador capacitado para el manejo de esta tecnología debe entender que en cuanto mayor sea su capacidad de prever un alto total, mayor será su capacidad para recuperar energía.***

1.4.2.3. Autobuses Eléctrico Híbrido

El Autobús Eléctrico Híbrido es una tecnología en desarrollo, actualmente se encuentran pocas referencias a nivel mundial con sistemas de transporte operando con esta tecnología. La principal diferencia entre un autobús híbrido y un autobús eléctrico híbrido se encuentra en la capacidad de almacenaje de energía, con lo cual podemos operar en el modo eléctrico por distancias mayores en el caso del autobús híbrido eléctrico en comparación a un autobús híbrido.

El proceso de funcionamiento está basado en una conjunción entre un autobús híbrido y un trolebús; el autobús requiere puntos de recarga a través de un pantógrafo, ubicados estratégicamente a lo largo de la ruta para almacenar energía y utilizarla posteriormente (Kühne, 2010).

Este concepto de eléctrico híbrido ofrece la capacidad de utilizar las ventajas de los motores eléctricos, minimizando el aporte de energía por parte del motor de combustión interna y eliminando la catenaria necesaria para la operación de un trolebús.

Ahora bien, como se menciona anteriormente, la catenaria no es necesaria para la operación de esta tecnología, sin embargo, es indispensable contar con

adecuaciones en la infraestructura para ofrecer puntos de recargar al vehículo que permitan recargar el paquete de baterías, los cuales constan de pantógrafo de recarga, transformador y cargador, en cada uno de los puntos de recarga seleccionados.

El autobús eléctrico híbrido abre una enorme ventana para la reducción de consumo energético, ya que debido a sus características, tiene la posibilidad de ajustarse a los requerimientos operativos de un sistema BRT, con la capacidad de funcionar la distancia requerida totalmente en modo eléctrico. Estos medios de transporte aún se encuentran en proceso de incubación y bajo condiciones operativas muy diferentes a las que imperan en la Ciudad de México.

Se espera en corto plazo se pueda contar con esta tecnología en Latinoamérica.

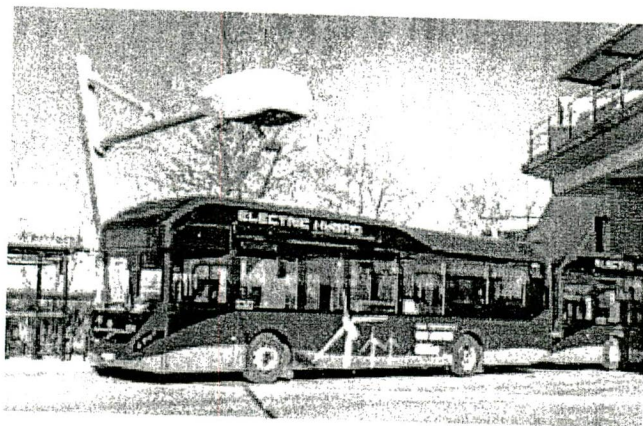


Figura 13 Autobús eléctrico híbrido.

Fuente: www.abb.com.mx

a) *Mantenimiento de Autobús Eléctrico Híbrido*

Un autobús Eléctrico-Híbrido funciona bajo el mismo concepto de un autobús híbrido, con la salvedad que esta tecnología cuenta con una mayor capacidad de almacenamiento de energía, por lo cual puede operar distancia mayores en modo eléctrico, mejorando con ello la eficiencia energética del sistema, disminuyendo la emisión de gases efecto invernadero y reduciendo los índices de sonoridad; sin embargo, estas ventajas tienen un costo, y en este caso estas ventajas son cobradas al incluir equipos de recarga de energía eléctrica a lo largo de la ruta.

Esta tecnología requiere elementos de infraestructura eléctrica, por lo cual ahora se tendrá que atender los siguientes elementos adicionales:

- Pantógrafo para recarga eléctrica.
- Transformador.
- Equipos de control.

Ahora bien, los procesos de mantenimiento aún son hipotéticos debido a que esta tecnología se encuentra en proceso de prueba, por lo cual no se pueden establecer programas de mantenimiento definitivos; sin embargo, una ruta con autobuses bajo esta tecnología requerirá de por lo menos un 20% de autobuses adicionales para atender los requerimientos de mantenimiento y un costo de mantenimiento mayor al contar con elementos adicionales para ser atendidos como lo es el pantógrafo para recarga.

b) *Conducción de Autobús Eléctrico Híbrido*

A medida que mejoramos el ámbito tecnológico, será menor la dependencia del operador; para la operación de un vehículo Eléctrico-Híbrido la intervención del motor eléctrico será mayor, sin embargo ahora no solo se alimentará de la energía

recuperada, sino tendrá la posibilidad de recargar las baterías en los puntos de recarga, no obstante, la recuperación de energía en el frenado y el aprovechamiento de la energía almacenada durante el funcionamiento del motor eléctrico estará totalmente a cargo del conductor.

1.4.2.4. Autobuses Eléctricos

Los autobuses eléctricos representan la mayor oportunidad de incorporar fuentes de energía renovables en el transporte público de pasajeros, en donde no solo se pueden alcanzar menores consumos energéticos, sino una operación con niveles de sonoridad muy bajos en relación con otras tecnologías y como se mencionará más adelante la eliminación de los gases efecto invernadero en el lugar de implementación del sistema de transporte.

Existen diferentes tecnologías aplicadas a lograr un autobús eléctrico, tales como:

- Celdas de combustible.
- Baterías de descarga profunda, mediante CA.
- Carga inductiva.
- Baterías de carga rápida, mediante CC.
- Trolebús.

Cada marca de autobuses ha seleccionado lo que a su parecer es la mejor tecnología para alcanzar un autobús eléctrico, sin superar aun el proceso de incubación para cada una de estas tecnologías.

Actualmente existe poca experiencia con algún sistema de transporte que opere con una flota total de autobuses eléctricos, las referencias que existen están enfocadas en pruebas con autobuses prototipos (Miles & Potter, 2014).

En el caso de la Ciudad de México, los antecedentes que existen en relación con autobuses eléctricos se encuentran en el Sistema de Transportes Eléctricos (STE), quienes fueron los encargados de continuar con el sistema de tranvías existente a mediados del siglo pasado; así mismo, en años recientes repotenciaron su presencia con la puesta en operación de los dos Corredores Cero Emisiones (SETRAVI, 2012).

Iniciativas como Zero Emission Urban System (European Union, 2014) han impulsado la incorporación de autobuses eléctricos en sistemas de transporte, lo que acerca cada vez más esta tecnología a la movilidad de las ciudades.



Figura 14 Autobús eléctrico.

Fuente: <http://www.vitrassa.es>

a) Mantenimiento de Autobús Eléctrico

En relación a los autobuses eléctricos, es complicado establecer los requerimientos necesarios para realizar las actividades de mantenimiento, al ser una tecnología en proceso de maduración aún no se cuenta con información para generar programas definitivos de mantenimiento. Un autobús eléctrico, tendrá que empezar por establecer un esquema de proveeduría de elementos de recambio; como se mencionó en los incisos anteriores, empresas como BYD han apostado a este cambio tecnológico, estableciendo las siguientes áreas para la capacitación del personal destinado a tareas de mantenimiento (BYD, S.F.).

- Familiarización de la operación.
- Familiarización del sistema mecánico.
- Implementación de técnicas de mantenimiento para el equipo de recarga.
- Capacitación supervisor de mantenimientos preventivos.
- Energía almacenada de propulsión y sistemas de control.
- Suspensión, Frenos, Dirección, Suspensión y Chasis.
- Sistema de bajo voltaje, sistema multiplexado, Sistema de Control Básico.
- Conocimiento de Software de Control, Programación, Almacenamiento de Datos y Análisis.
- Capacitación extra.

Aunado a lo anterior, es necesario contar con personal altamente calificado en vehículos eléctricos y una flota no menor a 25 % para reserva técnica de acuerdo a las previsiones tomadas por el área operativa del Sistema BRT en el Distrito Federal.

b) Conducción de Autobús Eléctrico

Como explicamos anteriormente, al tratarse de una tecnología en periodo de prueba, aun esta es una etapa muy temprana para establecer características operativas, sin embargo como en las anteriores tecnologías, los conductores deberán tener una alta capacitación para el manejo, ya sea utilizando autobuses eléctricos con carga inductiva, de descarga profunda o de carga rápida.

CAPÍTULO 2.SISTEMA BRT EN LA CIUDAD DE MÉXICO

2.1. Sistema de Corredores Metrobús

La necesidad de mejorar el transporte público de pasajeros en la Ciudad de México, incentivó a buscar diferentes modelos operativos.

En el año 2002 se firmó un acuerdo con el gobierno de la Ciudad de México para la incentivar el Transporte Sustentable en la Ciudad de México (Metrobús, 2015).

En ese mismo año el gobierno del Distrito Federal comienza a bosquejar la introducción de un concepto BRT, tomando como experiencia el sistema implantado en Bogotá bajo el nombre de Transmilenio.

En 2003 el gobierno del Distrito Federal buscando dar prioridad al transporte público de pasajeros a través de carriles confiados, comienza a analizar diferentes vialidades para la implementación de este sistema; en este análisis se revisaron vías como Avenida Insurgentes, Eje 8 Sur, Canal de Miramontes, Eje Central y Miguel Ángel de Quevedo. De éstos se seleccionaron los corredores de Avenida Insurgentes y Eje 8 Sur, optando finalmente por la implementación de este sistema en la Avenida de los Insurgentes (Metrobús, 2015).

Las características para la prestación del Corredor Insurgentes bajo el concepto BRT deberían ser las siguientes:

- a. El Corredor operaría con carriles confinados en el tramo comprendido entre Indios Verdes y las inmediaciones de Ciudad Universitaria.
- b. Se establecerían 34 estaciones intermedias y dos terminales.
- c. Se contaría con un sistema de recaudación para realizar el pago previo a la entrada al sistema.
- d. Se establecería un fideicomiso que concentrará los recursos que ingresen al sistema.

- e. El parque vehicular total requerido para la operación sería de 80 autobuses articulados
- f. La regulación, supervisión y control de la operación del Corredor del Transporte Público de Pasajeros Insurgentes quedaría a cargo del organismo público descentralizado.

En diciembre de 2004 comenzaron las obras de construcción del Corredor Insurgentes (Metrobús, 2015).

El 9 de marzo de 2005 Andrés Manuel López Obrador, Jefe de Gobierno del Distrito Federal en ese momento, publicó en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el decreto para la creación del organismo público descentralizado Metrobús:

"... Se crea el Organismo Público Descentralizado de la Administración Pública del Distrito Federal con personalidad jurídica, patrimonio propio y autonomía técnica y administrativa denominado Metrobús, el cual estará sectorizado a la Secretaría de Transportes y Vialidad del Distrito Federal... El Metrobús tendrá por objeto: La planeación, administración y control del Sistema de Corredores de Transporte Público de Pasajeros del Distrito Federal Metrobús..." (Jefatura de Gobierno, 2005).

El 19 de junio de 2005 Andrés Manuel López Obrador, en una ceremonia efectuada en la estación Reforma, inauguró formalmente el servicio del Corredor Insurgentes entre las estaciones Indios Verdes y Dr. Gálvez (Metrobús, 2015).

2.2. Corredores de Metrobús

Para diciembre de 2014 el Sistema Metrobús contaba con las siguientes Líneas.

- Línea 1 Corredor Insurgentes.
- Línea 2 Corredor Eje 4 Sur.
- Línea 3 Corredor Vallejo.
- Línea 4 Corredor Centro Histórico – Aeropuerto.
- Línea 5 Corredor Eje 3 Oriente.

Con un parque vehicular total de 441 autobuses (Metrobús, 2015).

- 54 autobuses de 12 metros.
- 355 autobuses articulados.
- 32 autobuses biarticulados.

2.3. Corredor Insurgentes

Como se mencionó en la Introducción a este trabajo, el Corredor Insurgentes se encuentra próximo a cumplir 10 años de operación, actualmente tiene un total de 46 estaciones (ver Figura 14), por lo cual el autobús debe realizar por lo menos 92 acciones de "STOP and GO" durante una vuelta completa; sin embargo debido a las condiciones de tránsito del Corredor, un operador que realizar esta acción en promedio 138 veces, pero en 240 ocasiones el autobús tiene que frenar sin llegar al alto total, esto para evitar obstáculos como lo son ciclistas, peatones sobre el carril confinado, vehículos en cruces, entre otros, lo que implica un constante uso de energía para romper el reposo de los autobuses, que en la mayoría de las ocasiones se encuentran a una alta ocupación de usuarios.





1		Indios Verdes	24		Nápoles
2		Deportivo 18 de Marzo	25		Col. del Valle
3		Euzkaro	26		Cd. de los Deportes
4		Potrero	27		Parque Hundido
5		La Raza	28		Félix Cuevas
6		Círculo	29		Río Churubusco
7		San Simón	30		Teatro Insurgentes
8		Manuel Gonzalez	31		José María Velasco
9		Buenavista	32		Francia
10		El Chopo	33		Olivo
11		Revolución	34		Altavista
12		Plaza de la República	35		La Bombilla
13		Reforma	36		Doctor Gálvez
14		Hamburgo	37		Ciudad Universitaria
15		Glorieta Insurgentes	38		Centro Cultural Universitario
16		Durango	39		Perisur
17		Álvaro Obregón	40		Villa Olímpica
18		Sonora	41		Corregidora
19		Campeche	42		Ayuntamiento
20		Chilpancingo	43		Fuentes Brotantes
21		Nuevo León 1	44		Santa Úrsula
22		La Piedad	45		La Joya
23		Poliforum	46		El Caminero

Figura 15 Estaciones Corredor Insurgentes

Fuente: www.metrobús.df.gob.mx

Ahora bien, es complicado para los operadores poder aprovechar la inercia de las unidades, ya que en muchas ocasiones los autobuses no pueden alcanzar una velocidad alta, esto debido a la cultura vial que impera en la Ciudad de México, donde es difícil el respeto a una vía preferencial como lo es el carril de Metrobús; esto no solo por parte de los automovilistas, sino por ciclistas, vendedores ambulantes y en muchos casos hasta personal de Seguridad Pública priorizando el flujo de los vehículos particulares y en segundo plano el transporte público de pasajeros; situación por la cual resulta complicado alcanzar mejoras energéticas cuando las externalidades afectan gravemente estos factores. Aun en contra de estas condiciones, el Corredor Insurgentes ha sido capaz de realizar un ascenso de tecnología en los vehículos destinados al transporte público de, que si bien estos cambios estuvieron orientados a una mejora en la movilidad de la ciudad, también entregaron beneficios a la eficiencia energética y el cuidado al ambiente.

Cabe mencionar que el concepto BRT implementado en Metrobús, aporta beneficios a la eficiencia energética por el cambio tecnológico en los vehículos, además del uso racional de los equipos a través del modelo operativo.

Las empresas que operan sus vehículos en el Corredor Insurgentes son las siguientes:

- Corredor Insurgentes S.A. (CISA).
- Vanguardia y Cambio S.A. (VYCSA).
- Red de Transporte Público (RTP).
- Corredor Eje 4 – 17 de Marzo (CE4-17M).
- Rey Cuauhtémoc S.A. (RECSA).

El Corredor Insurgentes comenzó operaciones con una flota de 80 autobuses, con dos Empresas Operadoras CORREDOR INSURGENTES S.A. (CISA) con 60 autobuses Volvo y la Red de Transporte Público (RTP) con 20 autobuses Scania; este parque vehicular vino en sustitución de los vehículos que operaban previo al proyecto, los cuales eran 368 vehículos divididos en la siguiente forma (Metrobús, 2015):

- 106 Autobús a Diesel pertenecientes a la Red de Transporte Público (RTP).
- 29 Autobús a Diesel pertenecientes a la Ruta 2.
- 174 Microbús a Gasolina pertenecientes a la Ruta 2.
- 52 Microbús a LPG pertenecientes a la Ruta 2.
- 7 Microbús a CNG pertenecientes a la Ruta 2.

El impacto que representó el drástico crecimiento de la demanda de usuarios a pocos meses del inicio de operaciones obligó a crecer la flota vehicular. La empresa CISA aumentó su parque vehicular con 7 unidades articuladas Volvo modelo B10, los cuales fueron adaptados para la operación de Insurgentes, ya que originalmente estas siete unidades fueron traídas a México por la empresa Volvo para prestar servicio en el Proyecto BRT de Ciudad Juárez, el cual nunca entró en operación. La Empresa Operadora RTP aumentó su flota a 30 autobuses con la adquisición de 10 unidades articuladas Scania (Metrobús, 2015).

A continuación se desglosa el parque vehicular que opera en el Corredor Insurgentes hasta finales del 2014, de acuerdo a la información proporcionada por el área técnica de Metrobús:

Tabla 2 Parque vehicular total.

Autobuses Totales	235
Autobuses Articulados	199
Autobuses Biarticulados	24

Fuente: Dirección Técnica Operativa, Metrobús.

El número de autobuses asignados al Corredor Insurgentes durante el 2014 fue de 175 autobuses, cantidad menor a las 235 mencionadas en la tabla anterior, esto debido a que algunas empresas operadoras prestan servicio tanto en el Corredor Insurgentes Línea 1, como en el Corredor Línea 2,

Tabla 3 Parque vehicular de Corredor Insurgentes S.A. (CISA).

EMPRESA OPERADORA	NÚMERO ECONÓMICO	AUTOBÚS MODELO	CANTIDAD AUTOBUSES	ENTRADA EN OPERACIÓN	ARTICULADO	BIARTICULADO
					DIESEL	DIESEL
CISA	CISA-001 a CISA-060	VOLVO B12	60	2005	60	
	CISA-101 a CISA-107	VOLVO B10	7	2006	7	
	CISA-108	VOLVO B12	1	2006	1	
	CISA-109 a CISA-114	VOLVO BRT 7300	6	2008	6	
	CISA-115 a CISA-118	VOLVO BRT 7300	4	2009	4	
	CISA-1031B	VOLVO BRT 7300 BIART	1	2010		1
	CISA-119	VOLVO BRT 7300	1	2010	1	
	CISA-120 a CISA-123	VOLVO BRT 7300	4	2012	4	
	CISA-124 a CISA-126	DINA BRIGHTER	3	2013	3	
	CISA-127 a CISA-128	DINA BRIGHTER	2	2014	2	
	CISA-1032B a CISA-1035B	VOLVO BRT 7300 BIART	4	2014		4
Subtotal			93		88	5

Fuente: Dirección Técnica Operativa, Metrobús.

Tabla 4 Parque vehicular de Vanguardia y Cambio S.A. (VYCSA).

EMPRESA OPERADORA	NÚMERO ECONÓMICO	AUTOBÚS MODELO	CANTIDAD AUTOBUSES	ENTRADA EN OPERACIÓN	ARTICULADO	BIARTICULADO
					DIESEL	DIESEL
VANGUARDIA Y CAMBIO.	VYC-151 a VYC-156.	VOLVO 7300	6	2012	6	
	VYC-1051B a VYC-1061B.	VOLVO 7300 BIART	11	2012		11
	VYC-1062B a VYC-1064B.	VOLVO 7300 BIART	3	2014		3
	Subtotal			20		6

Fuente: Dirección Técnica Operativa, Metrobús.

Tabla 5 Parque vehicular de la Red de Transporte Público de Pasajeros (RTP).

EMPRESA OPERADORA	NÚMERO ECONÓMICO	AUTOBÚS MODELO	CANTIDAD AUTOBUSES	ENTRADA EN OPERACIÓN	ARTICULADO	BIARTICULADO
					DIESEL	DIESEL
RTP	RTP-061 a RTP-080	SCANIA-DOPPIO	20	2005	20	
	RTP-081 a RTP-090	SCANIA-MEGA	10	2006	10	
	RTP-201 a RTP-212	MERCEDES BENZ	12	2008	12	
	RTP-1001B a RTP-1012B	VOLVO BRT 7300 BIART	12	2008		12
	RTP-326 a RTP-334	VOLVO BRT 7300	9	2008	9	
	RTP-213 a RTP-217	VOLVO BRT 7300	5	2014	5	
Subtotal			68		56	0

Fuente: Dirección Técnica Operativa, Metrobús.

Tabla 6 Parque vehicular del Corredor Eje 4 – 17 de Marzo (CE4-17M).

EMPRESA OPERADORA	NÚMERO ECONÓMICO	AUTOBÚS MODELO	CANTIDAD AUTOBUSES	ENTRADA EN OPERACIÓN	ARTICULADO	BIARTICULADO
					DIESEL	DIESEL
CORREDOR EJE 4 SUR 17 MARZO, S.A. de C.V.	CE4-301 a CE4-320	VOLVO BRT 7300	20	2008	20	
	CE4-321, 322 y 324	VOLVO BRT 7300	3	2011	3	
	CE4-325, 335 al 337 y 2301	DINA BRIGHTER	5	2014	5	
	Subtotal			28		28

Fuente: Dirección Técnica Operativa, Metrobús.

Tabla 7 Parque vehicular Rey Cuauhtemoc S.A.(RECSA).

EMPRESA OPERADORA	NÚMERO ECONÓMICO	AUTOBÚS MODELO	CANTIDAD AUTOBUSES	ENTRADA EN OPERACIÓN	ARTICULADO	BIARTICULADO
					DIESEL	DIESEL
RECSA	RECSA-251 a RECSA-268	VOLVO BRT 7300	18	2008	18	
	RECSA-269 a RECSA-271	VOLVO BRT 7300	3	2009	3	
	RECSA-1081 a RECSA-1083	VOLVO BRT 7300	3	2012		3
	RECSA-1084 y RECSA-1085	VOLVO BRT 7300	2	2014		2
	Subtotal			26		21

Fuente: Dirección Técnica Operativa, Metrobús.

CAPÍTULO 3.METODOLOGÍA

A continuación se describen las metodologías propuestas para obtener la información necesaria que permita llegar a los objetivos planteados al inicio de este trabajo. Parte de la información es usada directamente en los resultados de este trabajo, otra información es referencial o forma parte del resultado final; algunos procedimientos ilustrados a continuación fueron tomados de diferentes metodologías utilizadas hoy en día en la evaluación de Metrobús, como lo es el cálculo de emisiones de GEI, otra parte es planteada en este trabajo de acuerdo a la metodología utilizada por Metrobús a lo largo de su experiencia.

3.1. Cálculo de la flota vehicular en operación

La arquitectura operativa de un sistema de transporte obedece a la necesidad de ofertar la cantidad requerida de lugares por la demanda de usuarios en una determinada ruta; el cálculo del número de autobuses necesarios para una demanda de usuarios se realiza a partir de las siguientes ecuaciones (Molinero, Transporte Público: Planeación, Diseño, Operación y Administración., 2008):

$$I = \frac{\text{Capacidad} * \text{Porcentaje} * 60}{V.D.} \quad (1)$$

Donde:

I=Intervalo entre autobuses

Capacidad=Capacidad del autobús seleccionado

Porcentaje=Porcentaje de ocupación

60=Factor para convertir a minutos

V.D.=Volumen de diseño

$$N.A. = \frac{T.C.}{I} \quad (2)$$

Donde:

N.A. = Número de autobuses

T.C. = Tiempo de ciclo

I = Intervalo entre autobuses

Se entiende por Volumen de Diseño (V.D.) al número de pasajeros en una hora que se presenta en una sección de máxima demanda de en un sentido de la ruta, el Tiempo de Ciclo (T.C.) como el tiempo necesario para recorrer el total de la ruta saliendo de una Terminal y regresando a esta misma y porcentaje de ocupación se refiere a la capacidad que requerimos sea ocupada en cada autobús.

Para nuestro caso de estudio, es el Metrobús a través de su área operativa, el encargado de monitorear la información relacionada a la demanda de usuarios, así como establecer el número de autobuses que estarán en operación (Metrobús, 2015).

3.1.1. Flota vehicular en transporte concesionado

Se requiere calcular la cantidad de unidades que hoy día serían necesarias para absorber el aumento de usuarios que ha sufrido el Corredor Insurgentes.

Para tal efecto, se propone establecer un crecimiento del transporte concesionado proporcional al que ha tenido la flota de vehículos en el concepto BRT; este crecimiento se propone realizarlo a través de afectar la flota de transporte concesionado retirado al inicio del proyecto por un factor de crecimiento obtenido a

partir del aumento de flota que ha tenido la flota vehicular de autobuses bajo el concepto BRT.

$$F.C. = \frac{\text{Flota actual}}{\text{Flota inicial}} \quad (3)$$

Donde:

F.C. = Factor de crecimiento

Flota actual = Flota vehicular asignada a Insurgentes hoy en día (2014)

Flota inicial = Flota vehicular al inicio del proyecto (2005)

De acuerdo al Mecanismo de Desarrollo Limpio (CDM, 2010), se establece que el número de autobuses necesarios para absorber el aumento de demanda en el Corredor Insurgentes hoy en día, también sería afectado por las consideraciones de mantenimiento, reemplazo y sustitución.

Se exige que el número de unidades deba ser modificado de la siguiente manera:

- Reemplazo de 10% de vehículos por año.
- Para el caso de autobuses la tasa de cambio será uno a uno.
- Para el caso de los microbuses la tasa de sustitución marca el retirar dos microbuses por la inserción de un autobús.

El factor de crecimiento se obtiene de comparar la flota que inició con el concepto BRT en Insurgentes contra la flota que circuló en el 2014 (CDM, 2010).

3.1.2. Flota vehicular en el sistema BRT con diferentes tecnologías

Para calcular la flota vehicular con autobuses de diferente tecnología, se requiere considerar tanto las unidades en operación como aquellas que serán utilizadas para tareas de mantenimiento. Este número de unidades para actividades de

mantenimiento es un porcentaje de la flota vehicular en operación y depende del tipo de tecnología, el cual para términos prácticos se le denomina factor de reserva, este porcentaje de reserva incrementa su valor a mayor ascenso tecnológico debido al proceso de maduración de cada tecnología.

$$Flota\ vehicular\ total = Flota\ en\ operación * [1 + factor\ de\ reserva] \quad (4)$$

3.2. Consumo energético

3.2.1. Consumo energético en el transporte concesionado

Es necesario calcular los litros consumidos por el número de vehículos proyectados para atender la demanda de 2014 con el concepto de transporte público concesionado y para ello es necesario contar con el rendimiento de combustible de cada tipo de vehículo a utilizar.

El rendimiento de combustible para los vehículos propuestos para el transporte concesionado se establece a partir del Informe "Componente III Pruebas de tecnología de Autobuses" y donde se marcan los siguientes datos (SEDEMA, 2006):

Tabla 8 Rendimientos de combustible por tipo de vehículo.

Tipo de Vehículo	Abreviatura	Rendimiento [km/l]
Autobús Diesel	RCD	1.47
Microbús a gasolina	RCGS	1.95
Microbús a gas LP	RCG	1.40

Fuente: Componente III Pruebas de tecnología de Autobuses

Adicionalmente el reporte menciona la estandarización de los siguientes parámetros:

- kilometraje recorrido diario de 200 km para vehículos en este concepto de transporte (*km/día*)
- 260 días operados al año para vehículos en este concepto de transporte (*días*).

Para el cálculo de los litros consumidos se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Litros}_{\text{Consumidos}} = \frac{\text{km}_{\text{diario}} * \text{Días}_{\text{operados}} * N^{\circ}_{\text{unidades}}}{\text{Rendimiento}} \quad (5)$$

Por tanto, el cálculo de la energía consumida por el parque vehicular de transporte convencional se realiza de la siguiente manera:

$$\text{Energía Autobuses (MJ)} = \text{Litros}_{\text{diesel}} * \text{Poder calorífico del Diesel} \quad (6)$$

$$\text{Poder calorífico del Diesel} = 35.9 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}$$

$$\text{Energía Microbuses}_{\text{gas LP}}(\text{MJ}) = \text{Litros}_{\text{gas}} * \text{Poder calorífico del Gas LP} \quad (7)$$

$$\text{Poder calorífico del Gas LP} = 46 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}$$

$$\text{Energía Microbuses}_{\text{gasolina}}(\text{MJ}) = \text{Litros}_{\text{gas}} * \text{Poder calorífico de la Gasolina} \quad (9)$$

$$\text{Poder calorífico de la Gasolina} = 32 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}$$

$$\text{Energía total} = \text{Energía Autobuses} + \text{Energía } M_{\text{gas LP}} + \text{Energía } M_{\text{gasolina}} \quad (10)$$

3.2.2. Consumo energético en el sistema BRT con tecnología diesel

De acuerdo a las Reglas de operación de Metrobús (Metrobús, 2015), las empresas operadoras entregan a Metrobús los consumos de combustible realizados, mismos que fueron facilitados por el área operativa de Metrobús y de los cuales se hace referencia en el Reporte de Reducción de Emisiones (Metrobús, 2015).

$$\text{Energía total} = \text{consumo total de diesel} * \text{poder calorífico del Diesel} \quad (11)$$

$$\text{poder calorífico del Diesel} = 35.9 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}$$

$$\text{Energía total (MJ)} = \text{consumo total de diesel (l)} * 35.9 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}$$

3.2.3. Consumo energético en el sistema BRT con diferentes tecnologías

Para proyectar el consumo energético con diferentes tecnologías se realiza el cálculo a través de multiplicar el consumo de combustible generado por el uso de tecnología a Diesel por el factor de ahorro tecnológico (De acuerdo a la tecnología seleccionada), con base en el siguiente planteamiento:

$$\text{Energía total} = \text{Energía por tecnología Diesel} * \text{factor de ahorro tecnológico} \quad (12)$$

El *factor de ahorro tecnológico* lo tomaremos como el parámetro de consumo energético que consumiría cada tecnología probada en relación a la tecnología diesel.

3.3. Costos al usuario

Para la Ciudad de México, la Jefatura de Gobierno a través de la Secretaría de Movilidad es quien establece la tarifa del Transporte público de pasajeros, estos ajustes de tarifa se sustentan en los incrementos a los costos tales como el combustible, el Índice Nacional de Precios al Consumidor, el salario mínimo y los costos directos e indirectos que inciden en la prestación del servicio.

3.3.1. Costo al usuario en transporte concesionado

La tarifa para el caso del transporte concesionado, tal como se mencionó en el párrafo anterior, es establecida por la autoridad de forma general con base en el recorrido realizado de los usuarios y el tipo de vehículo.

3.3.2. Costo al usuario en el sistema BRT

El Sistema de BRT y para nuestro caso de estudio Metrobús, ha basado su correcto funcionamiento, en gran medida a su esquema financiero. Uno de los puntos importantes para el cambio de *hombre-camión* a *EMPRESA* es el pago del servicio; se sustituyó el *Pago por pasajero* a un *Pago por kilómetro recorrido*, esto implicó que los operadores dejarán de competir por la llamada *Guerra del Centavo* (Gómez A. , 2014).

Esto representa una fuerte responsabilidad sobre todo al Órgano Regulador, quien es el encargado de mantener en equilibrio de las finanzas del modelo económico.

En el Sistema BRT de la Ciudad de México "Metrobús", como el modelo económico para el concepto BRT lo requiere, se cuenta con un fideicomiso quien es el encargado de distribuir los montos a cada uno de los partícipes.

Uno de los aspectos a enfrentar por el órgano regulador, recae en el pago de cada usuario al abordar el transporte. Es claro identificar en los habitantes de esta ciudad, el requerimiento para mejorar sus condiciones de movilidad y con ello su calidad de vida; sin embargo, es necesario entender que una mejora sustancial en un medio de transporte viene acompañada de un incremento en los costos, por lo cual, el órgano regulador será el encargado de establecer un equilibrado económico que permita mejorar la calidad del transporte y mantener una tarifa aceptable.

A continuación se explica de manera burda el esquema financiero de un sistema de transporte urbano a través de la inclusión de un fideicomiso.

El esquema de pago llegará a manos de la Empresa Operadora dueña de los autobuses, de la siguiente manera (ver figura 15):

1. El usuario paga su viaje
2. Una empresa recaudadora recolecta y deposita el pago al fideicomiso
3. El Fideicomiso distribuye pagos
4. Genera el pago a la Empresa Operadora por los kilómetros recorridos

Figura 16 Esquema de Pago.

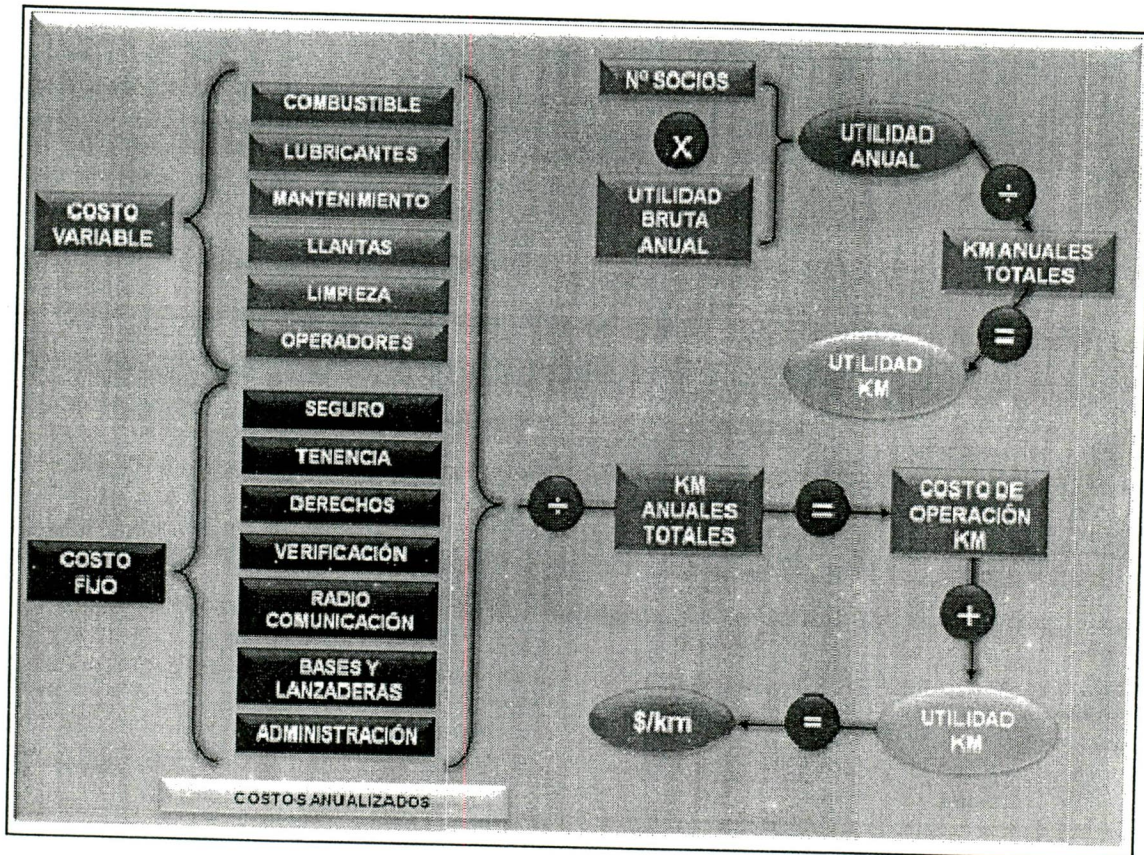


Fuente: Gerencia de Programación y Control Operativo de Metrobús.

Ahora ¿Cómo se establece el pago a cada empresa por cada kilómetro recorrido?

El encargado de generar el costo por cada kilómetro es el órgano regulador, en este caso Metrobús, basándose en los siguientes puntos (ver figura 16):

Figura 17 Esquema de modelo económico.



Fuente: Gerencia de Programación y Control Operativo de Metrobús.

Como se observa, el origen de este pago surge de dos rubros, *Costos Variables* y *Costos Fijos*, dentro de estos dos campos podemos insertar una gran cantidad de elementos, sin embargo corremos el riesgo de realizar una lista interminable, por tal motivo se toman los costos con un índice de magnitud importante.

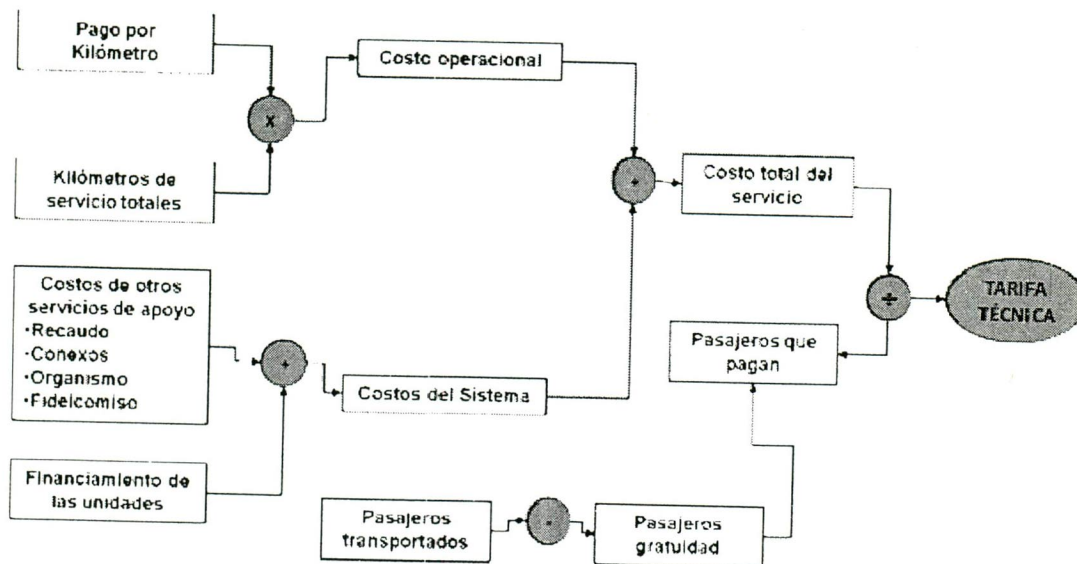
Los costos fijos y variables deberán ser divididos entre el total de kilómetros que recorrerán los autobuses, donde el producto de esta división generará los costos de operación para este Sistema de transporte. Como mencionamos anteriormente, el concepto BRT en la Ciudad de México involucra a la iniciativa privada, por lo cual debe existir una utilidad para hacer atractiva la inversión de capital.

La suma de los gastos de operación más la utilidad, nos genera un pago por kilómetro, con el riesgo que un pago mal calculado producirá un desequilibrio en el sistema.

Ahora bien ¿Cómo calculamos la tarifa necesaria a pagar por cada pasajero?

La suma de los Costos de Operación y los Costos del Sistema representan los egresos totales que habrá se subsanar el sistema de transporte; este egreso deberá ser cubierto por el del pago de viaje de cada usuario, para dejar claro este punto se ilustra a continuación este proceso.

Figura 18 Cálculo de Tarifa Técnica.



Fuente: Gerente de Programación y Control Operativo.

Este proceso representa un área importante para la formulación de nuevos proyectos; para nuestro caso toma una gran relevancia al evaluar los costos para nuevas tecnologías.

3.4. Generación de emisiones de GEI

El concepto "BRT" en la Ciudad de México, nace con una inminente necesidad de reducir los Gases Efecto Invernadero generados a partir del transporte público; como un primer esfuerzo se encontró en este modo de transporte una alternativa para ordenar una de las principales vías de la Ciudad, así como sustituir el parque vehicular que operaba en esta avenida.

Debido al desarrollo económico y el crecimiento desordenado del Distrito Federal y su zona conurbada, el transporte público de pasajeros ha manifestado un fuerte incremento por las necesidades de movilidad, un incremento en el número de autos particulares, y un aumento en las distancias de viaje. Desgraciadamente el transporte público urbano en la Ciudad de México, no ha sido capaz de absorber estos impactos, ocasionando un sistema de transporte público urbano inadecuado cuyos principales efectos negativos son: la dificultad de movilidad de los habitantes y los altos niveles de contaminación que deterioran la calidad del aire y la salud de las personas.

La implementación de un Sistema "BRT" vino acompañada de la reducción de emisiones de GEI, estas reducciones dieron pie a su comercialización con el Fondo Español de Carbono a través del Banco Mundial, siendo Metrobús el primer sistema de transporte de este tipo en lograr la certificación (CDM, 2010)

Para la realización de este trabajo es importante resaltar la generación de emisiones de GEI para cada tipo de tecnología propuesta, tomando como base la cantidad de emisiones de GEI que el transporte concesionado emitía, previo a la implementación de concepto BRT en la avenida Insurgentes.

El cálculo de emisiones de GEI se lleva a cabo a través del siguiente proceso, tomando como materia prima el combustible utilizado.

La conversión de combustible consumido a toneladas equivalentes de CO₂ se realiza de acuerdo a lo establecido en el Mecanismo de Desarrollo Limpio (CDM, 2010) y el cual se encuentra aplicado en el Reporte de Reducción de Emisiones de Metrobús (Metrobús, 2015), en donde se especifican los siguientes parámetros de conversión:

Tabla 9 Factores de emisión para el combustible utilizado en la Ciudad de México.

Emisiones por litro	$\frac{kg\ CO_2}{l}$	$\frac{kg\ CH_4}{l}$	$\frac{kg\ N_2O}{l}$
Combustible	F_{CO_2}	F_{CH_4}	F_{N_2O}
Gasolina	2.1796	6.29E-04	1.89E-05
Diesel	2.5648	1.73E-04	2.08E-05
GLP	1.4738	0	0
Equivalente a CO ₂ (100 year Global Warming Potential)	1	21	310

Fuente: Reporte de reducción de emisiones de Metrobús, 2012.

Usando los parámetros anteriores y el consumo de combustible, se calculan las emisiones de CO₂ haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$CO_{2eq} = Combustible_{consumido} \times \frac{[(F_{CO_2} \times 1) + (F_{CH_4} \times 21) + (F_{N_2O} \times 310)]}{1000} \quad (13)$$

Donde:

$$F_{CO_2} = \text{factor de conversión de } \frac{kg\ CO_2}{l}$$

$$F_{CH_4} = \text{factor de conversión de } \frac{kg\ CH_4}{l}$$

$$F_{N_2O} = \text{factor de conversión de } \frac{kg\ N_2O}{l}$$

El producto final es la cantidad de CO₂ emitido al ambiente con cada tecnología propuesta.

Para calcular la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) de diferentes tecnologías se toma como base la emisión de gases a partir de la tecnología diesel afectada por un factor de reducción de emisiones, el cual es reportado por el fabricante.

$$\begin{aligned} \text{Emisiones}_{\text{tecnología}} \\ = \text{Emisiones}_{\text{diesel}} * \text{factor de reducción de emisiones}_{\text{tecnología}} \end{aligned} \quad (14)$$

3.5. Cálculo del número de usuarios

El total de usuarios para el Corredor Insurgentes se realiza con base en las actividades de la Unidad Departamental de Peaje de Metrobús (Metrobús, 2015), la cual se encarga de recabar la cantidad de usuarios registrados en los torniquetes de entrada de cada estación. Con la sumatoria de la lectura de los torniquetes de entrada de todos los días en cada una de las Estaciones del Corredor Insurgentes, se establece la cantidad de usuarios transportados a lo largo de un periodo dado.

$$\text{Usuarios transportados} = \sum \text{lectura diaria de torniquetes de entrada} \quad (15)$$

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Una vez descrito los conceptos, funcionamientos, características y componentes de los corredores de transporte BRT, así como el planteamiento y estructuración para el cálculo de los diferentes parámetros a utilizar en lograr alcanzar el objetivo planteado en este trabajo, se realiza la aplicación de cada una de las metodologías propuestas para acumular la información necesaria en la búsqueda de obtener los beneficios del ascenso tecnológico en el transporte público de pasajeros.

4.1. Proyección de flota vehicular

4.1.1. Proyección de flota vehicular en el sistema de Transporte Concesionado

El cálculo de la cantidad de autobuses bajo el concepto de Transporte concesionado necesario para mover la demanda de usuarios en la avenida Insurgentes en el 2014, se utiliza el procedimiento descrito en la ecuación 3:

Inicialmente la flota sustituida en Insurgentes fue la siguiente:

Tabla 10 Flota vehicular sustituida en Insurgente.

Tipo de Vehículo	Total removidos
Autobús Diesel	135
Microbús a gasolina	174
Microbús a gas	59
Total de unidades:	368

Fuente: Reporte de reducción de emisiones de Metrobús, 2012.

Esta flota fue remplazada por 80 autobuses articulados al inicio de operaciones de Metrobús; para el 2014, el cual es el periodo de estudio para este trabajo, los

autobuses asignados a la operación del Corredor Línea 1 de Metrobús eran de 175 autobuses; por tanto con esta información podemos calcular el factor de crecimiento (F.C.).

Partiendo de este punto iniciamos el cálculo:

$$F.C. = \frac{\text{Flota actual}}{\text{Flota inicial}}$$

$$\text{Flota inicial} = 80 \text{ autobuses}$$

$$\text{Flota actual} = 175 \text{ autobuses}$$

$$F.C. = \frac{175}{80} = 2.1875$$

Tomando este factor de ajuste y aplicándolo a la flota inicial obtenemos los siguientes datos:

Tabla 11 Flota vehicular en transporte concesionado.

Tipo de Vehículo	Flota inicial	Flota afectada por F.C.
Autobús Diesel	135	296
Microbús a gasolina	174	381
Microbús a gas	59	130
Total de unidades	368	

La flota afectada por el factor debe ajustarse al procedimiento de sustitución del parque vehicular para transporte concesionado; por tanto, el número de unidades con las cuales operaría Insurgentes sería:

Tabla 12 Flota vehicular en transporte concesionado ajustada.

Tipo de Vehículo	Total removidos
Autobús Diesel	476
Microbús a gasolina	115
Microbús a gas	39
Total de unidades:	630

Como se ha mencionado, es necesario plantear una flota vehicular hipotética, la cual hubiera sido necesaria para transportar la cantidad de usuarios que el Corredor Insurgentes tuvo en el 2014, para tal efecto se requiere un total de 630 unidades, todas ellas operando bajo el esquema de transporte concesionado, cabe mencionar que este cálculo no incluye algunos factores externos que podrían afectar como es la reducción de velocidad.

4.1.2. Proyección de flota vehicular en el sistema de Transporte BRT

Actualmente el Metrobús es uno de los Sistemas BRT más importantes a nivel mundial y esto, en gran medida al impacto que ha tenido el Corredor Insurgentes en la movilidad de los habitantes de la Ciudad de México; mucho se ha hablado del impacto de este Corredor desde su inauguración en el año 2005, en donde Insurgentes se volvió uno de los ejes principales de transporte para la Ciudad de México.

El éxito de este Corredor ha requerido una evolución permanente del sistema y se puede constatar claramente con el parque vehicular del Corredor Insurgentes, el cual aumentó más del 100% en los nueve años que lleva de operación.

Esta alza en la cantidad de autobuses en servicio dentro del Corredor Insurgentes, ha hecho necesario implantar un esquema operativo complejo, en donde parámetros como: velocidad, ocupación, costo, frecuencia de paso de autobuses, entre otros, han tenido que ser superados para continuar dando servicio a este crecimiento de usuarios que ha vuelto a Insurgentes presa de su propio éxito.

El Corredor Insurgentes representa un recorrido de 58 km con un tiempo de ciclo (T.C.) de 132 minutos, el área técnica de Metrobús diseñan con una ocupación para cada autobús del 85%, capacidad de del autobús articulado de 160 pasajeros y un Volumen de Diseño de 12,208 usuarios por cada hora en un sentido (ver Grafica 1), cabe mencionar que el volumen de diseño fue proporcionado por el área técnica de Metrobús, el cual es monitoreado por el personal del área de Gestión de Servicio.

Con estos datos y tomando el procedimiento expuesto en el punto 3.1., calculamos el tamaño de la flota de autobuses; primero tomando la ecuación (1), calculamos el intervalo necesario entre autobuses;

$$I = \frac{\text{Capacidad} * \text{Porcentaje} * 60}{V.D}$$

$$I = \frac{160 * 0.85 * 60}{12,208}$$

$$I = 0.67 \text{ equivalente a } 40 \text{ segundos.}$$

Ahora para calcular el número de autobuses utilizamos la ecuación (2):

$$N.A. = \frac{T.C}{I}$$

$$N.A. = \frac{132}{0.67}$$

$$N.A. = 197$$

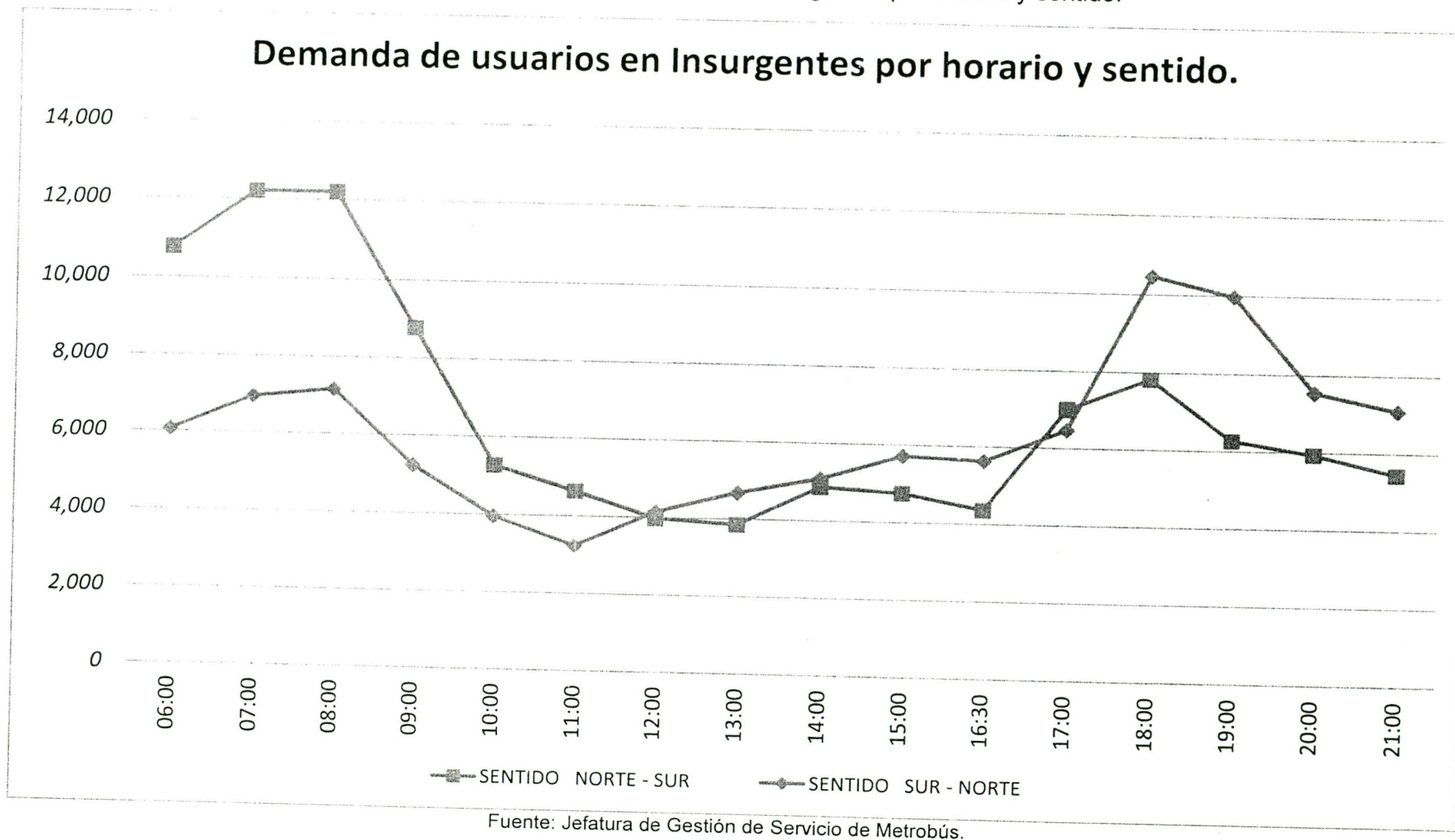
Para cubrir la demanda imperante en Avenida Insurgentes en las condiciones presentadas en el 2014, se requieren 197 autobuses los cuales recorrerían el Corredor de punta a punta.

Ahora bien, de acuerdo a los parámetros utilizados por Metrobús se requiere un 12% como factor de reserva técnica para realizar mantenimiento, con lo cual el número de autobuses necesarios es de 221 unidades.

4.1.2.1. Flota vehicular actual con autobuses diesel, Corredor Insurgentes

En la Gráfica 1 se muestra el comportamiento de los usuarios en el Corredor Insurgentes a lo largo de un día de operación, en donde se observa que la mayor cantidad de usuarios se encuentran en dirección Norte-Sur entre las ocho y nueve de la mañana; esta información fue facilitada por el área de Gestión de Servicio de Metrobús, la cual fue obtenida a través de los estudios de demanda realizados por esta área.

Gráfica 1 Demanda de usuarios en Insurgentes por horario y sentido.



El área de Gestión de Servicio de Metrobús, identifica el comportamiento de demanda a lo largo de todo el Corredor Insurgentes para diseñar un sistema operativo que oferte la cantidad de asientos necesarios en cada sección del Corredor, balanceando este modelo para colocar autobuses donde sean necesarios y evitando poner a circular autobuses donde no se requieren.

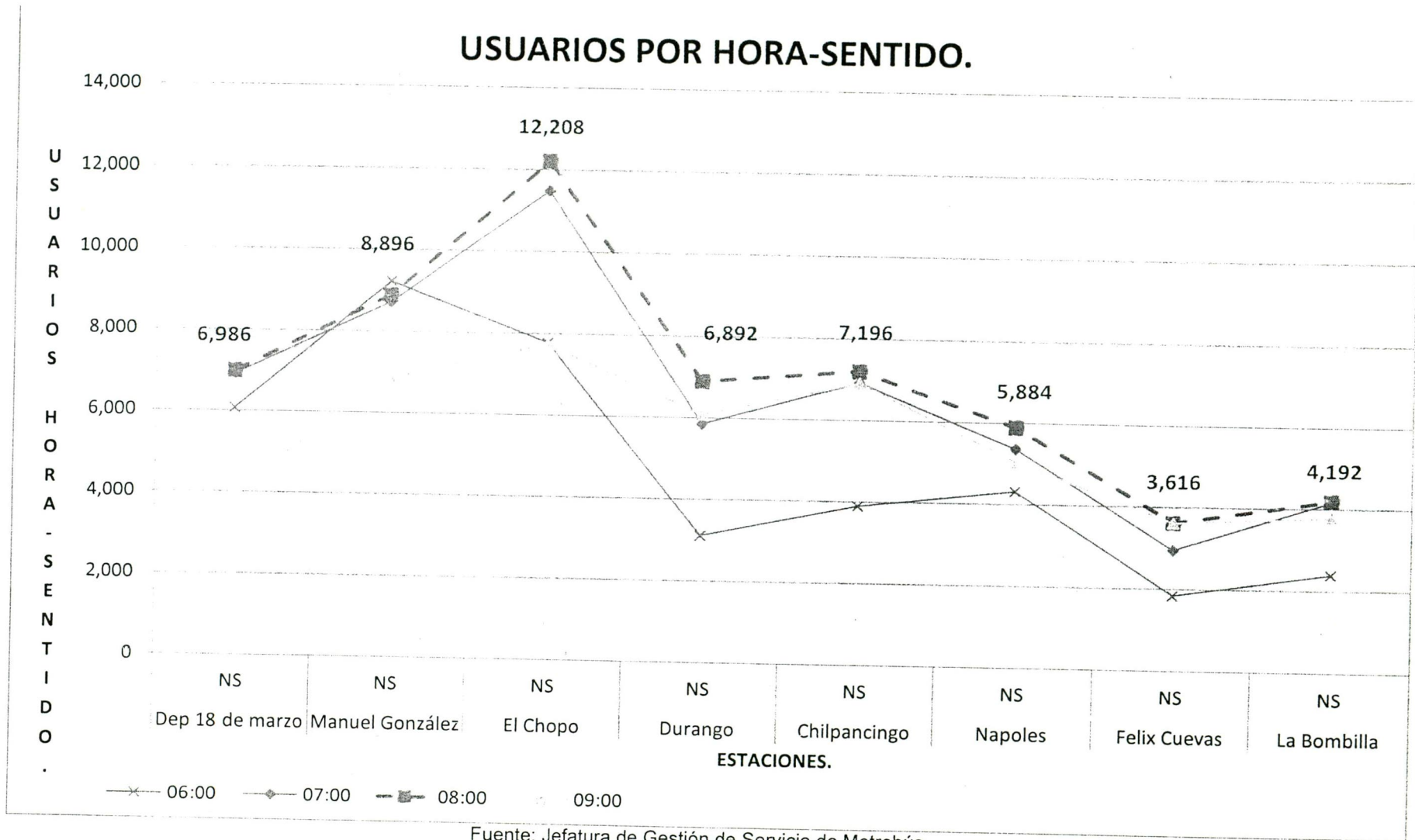
Como se ha expuesto anteriormente, este modelo operativo entrega resultados benéficos para una mejor eficiencia energética en el transporte, debido a que un autobús que circula sin usuarios es un autobús que afecta el rendimiento energético de nuestro sistema de transporte.

A continuación se muestra el número de usuarios a lo largo de la ruta a diferentes horarios (ver Gráfica 2), esto para identificar los volúmenes de máxima demanda existentes en el Corredor Insurgentes, en donde se identifica que el horario y la zona con mayor demanda se encuentra a las ocho de la mañana en la Estación El Chopo en sentido Norte-Sur.

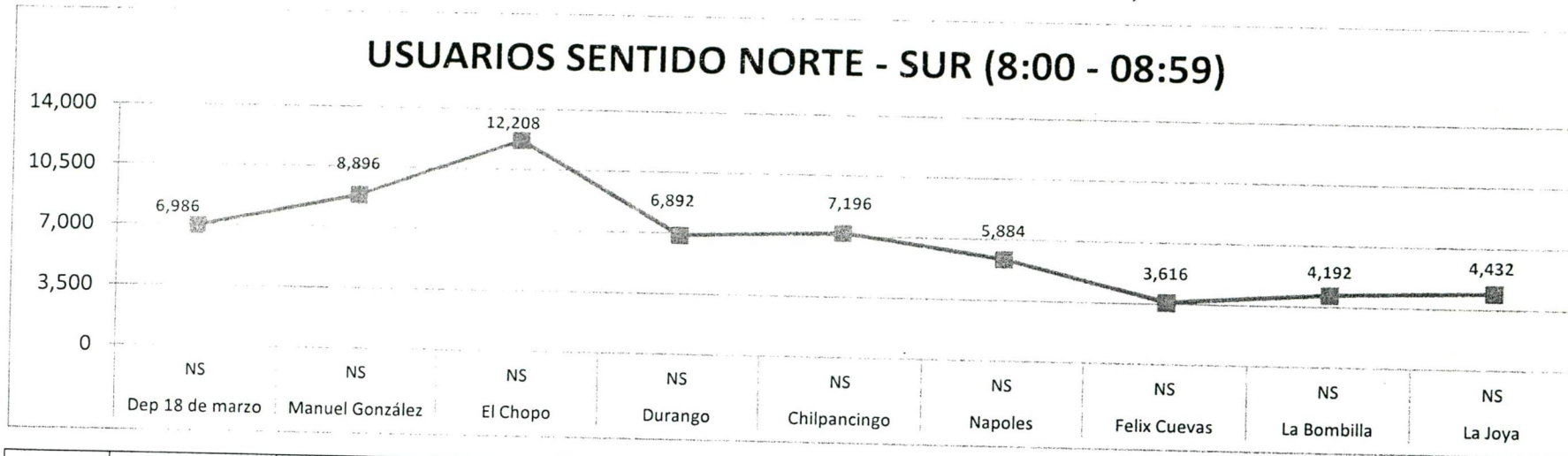
Con base en estas ocupaciones Metrobús estableció cuatro rutas para tener capacidad de atender la demanda y no ocupar más autobuses de los necesarios (ver Gráfico 3):

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

Gráfica 2 Usuarios por hora-sentido.



Gráfica 3 Usuarios sentido norte - sur (8:00 - 08:59).



Estación	Deportivo 18 de marzo	Manuel González	El Chopo	Durango	Chilpancingo	Nápoles	Félix Cuevas	La Bombilla	La Joya
Demanda	6986	8896	12208	6892	7196	5884	3616	4192	4432
Oferta	9440	9120	13680	8080	7680	8240	6080	7280	5120

RUTA.	18 de marzo	M. González	El Chopo	Durango	Chilpancingo	Nápoles	Félix Cuevas	La Bombilla	La Joya
A1	INDIOS VERDES - DR. GÁLVEZ. 26 AUTOBUSES.								
A2	INDIOS VERDES - GLORIETA DE LOS INSURGENTES. 23 AUTOBUSES.								
A3	BUENAVISTA - EL CAMINERO. 46 AUTOBUSES.								
A4	GLORIETA DE LOS INSURGENTES - EL CAMINERO. 6 AUTOBUSES.								
A7	INDIOS VERDES - EL CAMINERO. 55 AUTOBUSES.								
Oferta	9440	9120	13680	8080	7680	8240	6080	7280	5120

Fuente: Jefatura de Gestión de Servicio de Metrobús.

Para las siguientes rutas planteadas se requieren los siguientes autobuses (ver Gráfico 3):

- Indios Verdes – Dr. Gálvez, 26 autobuses
- Indios Verdes – Glorieta de los Insurgentes, 23 autobuses
- Buenavista – El Caminero, 46 autobuses
- Glorieta de los Insurgentes – El Caminero, 6 autobuses
- Indios Verdes – El Caminero, 55 autobuses

El actual modelo operativo utiliza 156 autobuses para dar servicio, 41 unidades menos que los calculados (sin reserva) utilizando una sola ruta.

Esto representa una flota vehicular de 41 autobuses menos que si se aplicara una sola ruta.

Cabe mencionar el hecho que aun cuando esta operación está pensada bajo una visión de movilidad, paralelamente entrega beneficios energéticos al dejar de consumir energía en estos autobuses.

Se está considerando una 12 % de flota en reserva para acciones de mantenimiento, por lo cual tomamos la ecuación (4) para calcular los autobuses necesarios a tecnología diesel:

$$\textit{Flota vehicular a Diesel} = \textit{Flota en operación} * [1 + \textit{factor de reserva}]$$

$$\textit{Flota vehicular a Diesel} = 156 * 1.12$$

$$\textit{Flota vehicular a Diesel} = 175$$

- 156 en operación
- 19 autobuses en flota de reserva
- 175 autobuses totales

4.1.2.2. Flota vehicular en el sistema BRT con tecnología híbrida

En relación a la flota vehicular de autobuses híbridos, la cantidad de unidades necesarias en operación tomando como base la demanda de usuarios del 2014; se requerirían 156 autobuses, la misma cantidad que con autobuses diesel, sin embargo para absorber las acciones de mantenimiento se requiere un 20 % de flota de reserva, esto de acuerdo a la experiencia que ha acumulado el área operativa de Metrobús con los autobuses híbridos.

$$\text{Flota vehicular a Diesel} = \text{Flota en operación} * [1 + \text{factor de reserva}]$$

$$\text{Flota vehicular a Diesel} = 156 * 1.20$$

$$\text{Flota vehicular a Diesel} = 188$$

- 156 en operación
- 32 autobuses en flota de reserva
- 188 autobuses totales

Se requieren 13 autobuses más de los autobuses diesel que fueron ocupados en el 2014, esto a causa de las unidades necesarias para realizar mantenimiento en los autobuses híbridos, consideramos que la cantidad de unidades en reserva para situaciones de mantenimiento irán disminuyendo a medida que la tecnología madure.

4.1.2.3. Flota vehicular en el sistema BRT con tecnología híbrida

Para una tecnología Híbrida (Eléctrico-Diesel) los autobuses de reserva necesarios se establecen nuevamente en un 20 % de la flota, sin embargo para esta tecnología es necesario contar con recorridos más largos, ya que en cada una de las terminales es necesario detener el autobús 6 minutos para procesos de recarga de energía; por

tanto se requieren 171 autobuses en operación para atender la cantidad de usuarios registrada en el 2014 sobre el Corredor Insurgentes:

$$\text{Flota vehicular a Diesel} = \text{Flota en operación} * [1 + \text{factor de reserva}]$$

$$\text{Flota vehicular a Diesel} = 171 * 1.2$$

$$\text{Flota vehicular a Diesel} = 206$$

- 171 autobuses en operación
- 35 autobuses en flota de reserva
- 206 autobuses totales

De acuerdo a los números anteriores se requieren 31 autobuses más de los autobuses a Diesel que fueron ocupados en el 2014.

4.1.2.4. Flota vehicular en el sistema BRT con tecnología eléctrica

Para ejemplificar la flota vehicular de autobuses eléctricos sin definir el tipo de tecnología, tomaremos el ejemplo de autobuses con baterías de descarga profunda.

En el caso de autobuses con baterías de descarga profunda mencionaremos que la autonomía de estos autobuses alcanzó los 250 km (BYD, S.F.), de acuerdo a datos obtenidos en pruebas experimentales. Actualmente en el Corredor Línea 1 de Metrobús, el promedio diario recorrido de cada vehículo es de 330 km, pero existen autobuses que recorren 420 km diarios.

Con base en la autonomía de un autobús eléctrico, si son necesarios recorridos superiores a 250 km es indispensable utilizar dos vehículos para hacer esta función o una mayor cantidad de baterías, sin embargo esto último afectaría la capacidad de usuarios del autobús, para el caso de esta tecnología se toma el mismo número de autobuses eléctrico-híbrido necesarios para la operación similar.

Al no contar con experiencia para determinar la cantidad de autobuses necesarios para reserva, se toma un valor alto para proyectar el escenario más caótico, con la salvedad que al aumentar la maduración de esta tecnología, la reserva técnica de autobuses será menor.

Por tanto se requieren una reserva técnica de por lo menos de 25%.

$$\textit{Flota vehicular a Diesel} = \textit{Flota en operación} * [1 + \textit{factor de reserva}]$$

$$\textit{Flota vehicular a Diesel} = 171 * 1.25$$

$$\textit{Flota vehicular a Diesel} = 214$$

- 171 autobuses en operación
- 43 autobuses en flota de reserva
- 214 autobuses totales

Para atender la cantidad de pasajeros transportados en el Corredor Insurgentes con autobuses a eléctricos durante el 2014, se requerirían 39 autobuses más para absorber la misma cantidad de usuarios.

Sin embargo, cada día existen avances en el campo de almacenaje de energía, por lo cual se espera que los autobuses eléctricos puedan otorgar mejores prestaciones en un futuro próximo y a su vez reducir costos.

4.2. Consumo energético

4.2.1. Consumo energético del transporte concesionado

Con el parque vehicular proyectado bajo el esquema de transporte concesionado, calculamos el kilometraje recorrido y el consumo energético por tipo de unidad a partir del Informe "Componente III Pruebas de tecnología de Autobuses" y donde se marcan los siguientes datos (SEDEMA, 2006):

Tabla 13 Kilometraje recorrido por el transporte concesionado.

Tipo de Vehículo	Total removidos	km recorridos en 2014
Autobús Diesel	476	24,752,000
Microbús a gasolina	115	5,980,000
Microbús a gas	39	2,028,000
Total de unidades:	630	

Tabla 14 Consumo energético por el transporte concesionado.

Tipo de Vehículo	Consumo de combustible [litros/año]	Consumo energético [MJ/año]
Autobús Diesel	16,838,095	604,487,619.05
Microbús a gasolina	3,066,667	98,133,333.33
Microbús a gas	1,448,571	35,982,514.29
Totales	21,353,333	738,603,466.67

Si el concepto de transporte en Insurgentes se hubiera mantenido, el consumo energético en el 2014 habría alcanzado los 738.6 millones de MJ.

4.2.2. Consumo energético en el sistema BRT con tecnología diesel

En la Tabla 15, se muestra el consumo energético de la flota vehicular en Insurgentes desde su creación en 2005 y hasta culminar 2014.

Tabla 15 Consumo energético de la flota vehicular BRT.

AÑO	TOTAL DE UNIDADES	km recorridos [km]	Consumo de combustible [litros/año]	Consumo energético [MJ/año]
2005	80	4,053,010.0	3,133,851.4	112,505,265.26
2006	98	7,463,653.0	5,771,014.5	207,179,420.55
2007	98	7,738,770.0	5,983,739.3	214,816,240.87
2008	125	10,603,553.0	8,198,834.8	294,338,169.32
2009	140	11,961,545.0	9,248,855.6	332,033,916.04
2010	145	12,355,870.0	9,553,754.0	342,979,768.60
2011	153	12,952,220.0	10,014,861.2	359,533,517.08
2012	165	13,972,295.0	10,803,599.3	387,849,214.87
2013	174	14,689,086.0	11,357,833.4	407,746,219.06
2014	175	14,796,714.0	11,441,053.1	410,733,806.29

Fuente: Dirección Técnica Operativa de Metrobús.

De acuerdo a los datos obtenidos en el 2014, la flota vehicular de Metrobús en Insurgentes consumió 410.7 millones de MJ.

4.2.3. Consumo energético en el sistema BRT con tecnología híbrida (Diesel-Eléctrico)

De acuerdo a las especificaciones técnicas de estos autobuses, se estima que el ahorro potencial por el uso de esta tecnología puede llegar a 30% menos del consumo de energía, sin embargo como se ha explicado anteriormente, esto depende de diferentes factores como la conducción, mantenimiento, diseño de la ruta, etc.

Basado en lo expresado anteriormente y tomando como punto de partida los consumos energéticos de los autobuses a diesel que operan en el Corredor Insurgentes encontramos lo siguiente.

Una flota de autobuses a Diesel consumió 410.7 millones de MJ durante el 2014.

Tomando la ecuación (12) y un *factor de ahorro tecnológico* de 70% realizamos el cálculo energético.

$$\text{Energía total} = \text{Energía por tecnología Diesel} * \text{factor de ahorro tecnológico}$$

$$\text{Energía total} = 410,733,806.29 * 0.7$$

$$\text{Energía total} = 287,513,664.40 \text{ MJ}$$

Concluimos que en un año se consumirían 287.5 millones de MJ, utilizando autobuses híbridos, 123.2 millones de MJ menos que los utilizados con tecnología diesel.

4.2.4. Consumo energético en el sistema BRT con tecnología eléctrica híbrida

Volviendo a realizar el análisis de consumo de combustible, enfatizamos que de acuerdo a los datos que aporta el fabricante, un autobús eléctrico híbrido puede reducir el consumo hasta en un 65%, por tanto, repetimos el análisis utilizado anteriormente con un *factor de ahorro tecnológico* de 35%.

*Energía total = Energía por tecnología Diesel * factor de ahorro tecnológico.*

$$Energía\ total = 410,733,806.29 * 0.35$$

$$Energía\ total = 143,756,832.20\ MJ$$

Una flota de autobuses eléctrico híbrido consumiría solo 143,756,832.20 MJ.

Cabe mencionar que se requirieran 206 autobuses de esta tecnología para cubrir la demanda actual.

4.2.5. Consumo energético en el sistema BRT con tecnología eléctrica

Nuevamente tomamos los datos obtenidos en diferentes pruebas con autobuses eléctricos, donde se menciona un *factor de ahorro tecnológico* de 20%.

*Energía total = Energía por tecnología Diesel * factor de ahorro tecnológico.*

$$Energía\ total = 410,733,806.29 * 0.20$$

$$Energía\ total = 82,146,761.26\ MJ$$

El consumo de energía en el 2014 arrojaría 82.1 millones de MJ, esto significa dejar de consumir 328.5 millones de MJ en un año.

Pero para alcanzar este beneficio es necesario contar con una flota de 214 autobuses de esta tecnología para cubrir la demanda actual.

4.3. Costo al Usuario


4.3.1. Costo al usuario del Transporte Concesionado

Actualmente el costo de este medio de transporte se establece de acuerdo a lo establecido por la Secretaría de Movilidad del D.F. (ver Figura 18).

Figura 19 Tarifa transporte concesionado.

MICROBUSES Y VAGONETAS		
PRIMEROS 5 KM	DE 5 A 12 KM	MÁS DE 12 KM
\$4.00	\$4.50	\$5.50

AUTOBUSES	
PRIMEROS 5 KM	MÁS DE 5 KM
\$5.00	\$6.00



Fuente: Secretaría de Movilidad, 2014.

Para cuestiones referenciales, tomaremos que en el 2014 si el transporte concesionario hubiera continuado en Insurgentes, el costo promedio sería de \$5.00 por usuario asumiendo un recorrido promedio de 5 km.

4.3.2. Costo al usuario del sistema BRT con tecnología diesel

Aplicando la metodología descrita anteriormente, se proyecta el costo por usuario en el Corredor Insurgentes utilizando tecnología diesel.

Para realizar el cálculo aproximado del cobro por usuario, se establecen los siguientes parámetros necesarios para alimentar el modelo:

- Número de autobuses: 175
- Costo aproximado por unidad: \$ 5,310,000
- Costo de Seguro: \$ 45,000.00
- Reducción en el consumo de combustible: 0%
- Inversión de enganche autobuses: \$215,586,000

En relación a estos costos, son valores de referencia con base en la información facilitada por Metrobús y de acuerdo a la información proporcionada por las empresas fabricantes de autobuses.

Un punto importante en este modelo es asumido por el Índice de pasajeros por kilometro el cual obtenemos al dividir el número total de pasajeros entre los kilómetros recorrido en con usuarios [pasajeros/km].

Tabla 16 Cálculo de costo para tarifa técnica autobús diesel.

OFERTA			
Parque vehicular Necesario.	175	Autobuses	
Kilómetros anuales por autobús	84,553	km-anuales-bus	
DEMANDA			
Pasajeros anuales	127,044,606		
COSTOS EMPRESAS OPERADORAS			
COSTOS VARIABLES			
VARIABLES POR KM	Parámetros	Monto Anualizado	\$/Km
Energía			\$ 7.71
Mantenimiento			\$ 1.96
Llantas			\$ 1.52
SUBTOTAL			\$ 12.26
VARIABLES POR AUTOBÚS			
Operadores			\$ 0.33
Limpieza			\$ 0.54
Seguros			\$ 0.53
Póliza anual por autobús	\$45,000.00		
Impuestos			\$ 0.33
Derechos			\$ 0.02
Verificación			\$ 0.01
Renta de Radios Fijos			\$ 0.11
SUBTOTAL			\$ 1.87
TOTAL COSTOS VARIABLES			\$ 14.13
COSTOS FIJOS			
FIJOS			
SUBTOTAL			\$ 3.27
COSTOS DE OPERACIÓN			\$ 17.40
UTILIDAD ACCIONISTAS			\$ 2.88
TOTAL COSTOS FIJOS			\$ 6.15
VARIABLES POR DEMANDA			
SUBTOTAL			\$9.49
FIJOS			
Pago del crédito de autobuses		\$217,329,949	\$14.69
Precio autobús	\$ 5,310,000		
Tarifa		\$6.00	
Tarifa Técnica		\$6.03	
Diferencia		-\$0.03	

Con los datos obtenidos en este análisis, alimentado por los datos generados con la propuesta de 175 autobuses a diesel, se encontró que durante el 2014 la tarifa técnica se encuentra en equilibrio con la tarifa establecida en ese momento, sin embargo marca un punto de ruptura, donde cualquier modificación podría afectar a este equilibrio, generando una desestabilidad económica para el sistema.

Tarifa Técnica: \$6.03

4.3.3. Costo al usuario del sistema BRT con tecnología híbrida (Diesel-eléctrico)

Modificamos los parámetros en el modelo económico acorde a la tecnología seleccionada:

- Número de autobuses: 188
- Costo aproximado de unidad: \$11,250,000
- Costo de Seguro: \$95,338.98
- Reducción en el consumo de combustible: 30%
- Inversión de enganche autobuses: \$456,750,000

Nuevamente estos costos, son valores de referencia con base en la información facilitada con Metrobús de acuerdo a la datos proporcionada por las empresas fabricantes de autobuses y con los valores encontrados (Lajunen, 2014).

Tabla 17 Cálculo de costo para tarifa técnica autobús híbrido.

OFERTA			
Parque vehicular Necesario.	188	Autobuses	
Kilómetros anuales por autobús	78,706	km-anuales-bus	
DEMANDA			
Pasajeros anuales	127,044,606		
COSTOS EMPRESAS OPERADORAS			
COSTOS VARIABLES			
VARIABLES POR KM	Parámetros	Monto Anualizado	\$/Km
Energía			\$ 7.71
Mantenimiento			\$ 1.96
Llantas			\$ 1.52
SUBTOTAL			\$ 12.26
VARIABLES POR AUTOBÚS			
Operadores			\$ 0.33
Limpieza			\$ 0.58
Seguros			\$ 1.21
Póliza anual por autobús	\$95,338.98		
Impuestos			\$ 0.36
Derechos			\$ 0.02
Verificación			\$ 0.01
Renta de Radios Fijos			\$ 0.11
SUBTOTAL			\$ 2.62
TOTAL COSTOS VARIABLES			\$ 14.88
COSTOS FIJOS			
FIJOS			
SUBTOTAL			\$ 3.52
COSTOS DE OPERACIÓN			\$ 18.39
UTILIDAD ACCIONISTAS			\$ 2.88
TOTAL COSTOS FIJOS			\$ 6.40
VARIABLES POR DEMANDA			
SUBTOTAL			\$9.49
FIJOS			
Pago del crédito de autobuses		\$494,649,279	\$33.43
Precio autobús	\$ 11,250,000		
Tarifa		\$6.00	
Tarifa Técnica		\$8.61	
Diferencia		-\$2.61	

Con los datos aportados para esta tecnología, se requiere una inversión inicial de 2.12 veces más en relación con la tecnología Diesel y habría generado durante el 2014 un costo por pasajero de:

Tarifa Técnica: \$8.61

4.3.4. Costo al usuario del sistema BRT con tecnología eléctrica híbrida

Nuevamente ajustamos los datos para una siguiente tecnología.

- Número de autobuses: 206
- Costo aproximado de unidad: \$16,500,000
- Costo de Seguro: \$152,542.37
- Reducción en el consumo de combustible: 65%
- Inversión de enganche autobuses: \$669,900,000

Los costos seleccionados para esta tecnología son valores en la información facilitada con Metrobús de acuerdo a los datos proporcionados por las empresas fabricantes de autobuses, ya que esta opción de autobuses aún no cuenta con costos establecidos al tratarse de una tecnología en proceso de incubación.

Tabla 18 Cálculo de costo para tarifa técnica Autobús eléctrico híbrido.

OFERTA			
Parque vehicular Necesario.	206	Autobuses	
Kilómetros anuales por autobús	71,829	km-anuales-bus	
DEMANDA			
Pasajeros anuales	127,044,606		
COSTOS EMPRESAS OPERADORAS			
COSTOS VARIABLES			
VARIABLES POR KM	Parámetros	Monto Anualizado	\$/Km
Energía			\$ 7.71
Mantenimiento			\$ 1.96
Llantas			\$ 1.52
SUBTOTAL			\$ 12.26
VARIABLES POR AUTOBÚS			
Operadores			\$ 0.33
Limpieza			\$ 0.64
Seguros			\$ 1.95
Póliza anual por autobús	\$139,830.51		
Impuestos			\$ 0.39
Derechos			\$ 0.02
Verificación			\$ 0.01
Renta de Radios Fijos			\$ 0.11
SUBTOTAL			\$ 3.45
TOTAL COSTOS VARIABLES			\$ 15.70
COSTOS FIJOS			
FIJOS			
SUBTOTAL			\$ 3.85
COSTOS DE OPERACIÓN			\$ 19.56
UTILIDAD ACCIONISTAS			\$ 2.88
TOTAL COSTOS FIJOS			\$ 6.73
VARIABLES POR DEMANDA			
SUBTOTAL			\$9.49
FIJOS			
Pago del crédito de autobuses		\$794,946,997	\$53.72
Precio autobús	\$ 16,500,000		
Tarifa		\$6.00	
Tarifa Técnica		\$11.42	
Diferencia		-\$5.42	

Nuevamente el costo de la tecnología genera una complicación para la implementación de esta opción pues se requiere una inversión inicial de 3.10 veces comparado con una tecnología a Diesel y generando una tarifa técnica para el 2014 de:

Tarifa Técnica: \$11.42

4.3.5. Costo al usuario del sistema BRT con tecnología eléctrica

Por último, realizamos el modelo para la tecnología eléctrica con los siguientes datos:

- Número de autobuses: 214
- Costo aproximado de unidad: US\$ 1,500,000.00
- Costo de Seguro: \$190,677.96
- Reducción en el consumo de combustible: 80%
- Inversión de enganche autobuses: \$913,500,000

Nuevamente estos costos, son valores de referencia con base en la información facilitada con Metrobús de acuerdo a la datos proporcionada por las empresas fabricantes de autobuses y con los valores encontrados (Kühne, 2010).

Tabla 19 Cálculo de costo para tarifa técnica Autobús eléctrico.

OFERTA			
Parque vehicular Necesario.	214	Autobuses	
Kilómetros anuales por autobús	69,144	km-anuales-bus	
DEMANDA			
Pasajeros anuales	127,044,606		
COSTOS EMPRESAS OPERADORAS			
COSTOS VARIABLES			
VARIABLES POR KM	Parámetros	Monto Anualizado	\$/Km
Energía			\$ 7.71
Mantenimiento			\$ 1.96
Llantas			\$ 1.52
SUBTOTAL			\$ 12.26
VARIABLES POR AUTOBÚS			
Operadores			\$ 0.33
Limpieza			\$ 0.66
Seguros			\$ 2.76
Póliza anual por autobús	\$190,677.97		
Impuestos			\$ 0.40
Derechos			\$ 0.02
Verificación			\$ 0.01
Renta de Radios Fijos			\$ 0.11
SUBTOTAL			\$ 4.30
TOTAL COSTOS VARIABLES			\$ 16.56
COSTOS FIJOS			
FIJOS			
SUBTOTAL			\$ 4.00
COSTOS DE OPERACIÓN			\$ 20.56
UTILIDAD ACCIONISTAS			\$ 2.88
TOTAL COSTOS FIJOS			\$ 6.88
VARIABLES POR DEMANDA			
SUBTOTAL			\$9.49
FIJOS			
Pago del crédito de autobuses		\$1,126,116,443	\$76.11
Precio autobús	\$ 22,500,000		
Tarifa		\$6.00	
Tarifa Técnica		\$14.48	
Diferencia		-\$8.48	

Como se esperaba, el costo de una sustitución a tecnología totalmente eléctrica representa el costo más elevado de las cuatro opciones, pues se requiere una inversión inicial de 4.23 veces comparada con una tecnología Diesel, y arrojando una tarifa técnica para el 2014 de:

Tarifa Técnica: \$14.48

4.4. Emisiones de GEI

4.4.1. Emisiones de GEI en el transporte concesionado

Como se mencionó anteriormente, el número de unidades con las cuales operaría Insurgentes hoy en día, para atender una demanda de 450,000 usuarios diarios con un sistema de transporte concesionado sería:

- 476 Autobuses Diesel.
- 115 Microbús a gasolina.
- 39 Microbús a gas.

Cada una de estas unidades recorrería 200 km diarios promedio y operarían 260 días en promedio, lo que arroja un total de combustible consumido durante el año 2014 de:

Figura 20 Consumo de combustible en el transporte concesionado.

CONSUMO DE COMBUSTIBLE	LITROS
AUTOBÚS DIESEL	16,838,095
MICROBÚS GASOLINA	3,066,667
MICROBÚS A GAS	1,448,571

Haciendo uso de la ecuación (13), se calcula la emisión de CO₂.

$$CO_{2Gasolina} = Gasolina_{consumida} \times \frac{[(2.1796) + (0.0000629 \times 21) + (0.0000189 \times 310)]}{1000}$$

$$CO_{2Diesel} = Diesel_{consumido} \times \frac{[(2.5648) + (0.000173 \times 21) + (0.0000208 \times 310)]}{1000}$$

$$CO_{2Gas} = Gas_{consumido} \times 1.4738$$

$$CO_{2equiv} = CO_{2Gas} + CO_{2Diesel} + CO_{2Gasolina}$$

Si el modelo de transporte concesionado se hubiera conservado en avenida Insurgentes se estarían generando: **45,899 toneladas de CO₂equivalente en el 2014.**

4.4.2. Emisiones de GEI en el sistema BRT con tecnología diesel

Para el concepto de transporte "BRT" en Insurgentes el total de consumo de combustible durante el año 2014 es de:

Figura 21 Consumo de combustible para autobuses Diesel.

CONSUMO DE COMBUSTIBLE	LITROS
BRT EN INSURGENTES	11,441,053.1

Fuente: Dirección Técnica Operativa de Metrobús.

Utilizando la ecuación (13) y un consumo de 11.4 millones de litros de diesel los cuales fueron consumidos por la flota de autobuses diesel en el 2014, la generación de emisiones de GEI asciende a:

$$CO_{2Diesel} = 11,441,053.1 \times \frac{[2.5648] + (0.000173 \times 21) + (0.0000208 \times 310)}{1000}$$

29,459 toneladas de CO₂equivalente en el 2014.

4.4.3. Emisiones de GEI en el sistema BRT con tecnología híbrida

Continuando con el cálculo de emisiones ahora para autobuses híbridos y nuevamente bajo el concepto de transporte “BRT” en Insurgentes,

Tomando la ecuación (14).

$$Emisiones_{tecnología} = Emisiones_{diesel} * factor\ de\ reducción_{tecnología}$$

El fabricante reporta que la reducción debida a esta tecnología ascienda a 40% por tanto el factor de reducción es de:

$$factor\ de\ reducción_{híbrido} = 0.6$$

17,676 toneladas de CO₂equivalente en el 2014.

4.4.4. Emisiones de GEI en el sistema BRT con tecnología eléctrica híbrida

Las emisiones de CO₂ debido al ascenso tecnológico a autobuses eléctrico-híbridos se proyectan a partir del factor de reducción dado por el fabricante, el cual es:

$$factor\ de\ reducción_{híbrido} = 0.25$$

Lo anterior partiendo del dato aportado por la empresa fabricante de autobuses, quien reporta una reducción del 75% de emisiones comparado con el autobús diesel.

Con este factor se calcula la cantidad de emisiones, la cual sería de:

7,365 toneladas de CO₂equivalente en el 2014.

4.4.5. Emisiones de GEI en el sistema BRT con tecnología eléctrica diesel

Para el caso de una flota vehicular basada totalmente en autobuses eléctricos, no existiría generación de emisiones de GEI en el lugar de operación, por tanto, el factor de reducción sería 0 y las emisiones de GEI serían:

0 (cero) toneladas de CO₂equivalente en el 2014.

4.5. Cantidad de usuarios transportados, Corredor Insurgentes

De acuerdo a los datos en los años de operación del Corredor Insurgentes, la demanda ha ido en aumento, a continuación se muestra la evolución de la demanda de usuarios en el Corredor Insurgentes a partir del 2006 al 2014.

Figura 22 Demanda de usuarios del Corredor Insurgentes.

DEMANDA DE USUARIOS	
2006	74,218,369
2007	77,612,145
2008	81,216,631
2009	93,378,509
2010	98,892,099
2011	112,317,390
2012	122,082,469
2013	124,715,721
2014	127,044,606

Fuente: Fuente: www.metrobús.df.gob.mx

de este trabajo, a continuación se presenta una tabla resumen para concentrar los valores
 el valor de los indicadores propuestos para nuestro caso de estudio.

de valores.

Categoría	Consumo energético. [Millones MJ]	Emisiones GEI. [Ton CO ₂]	Usuarios Transportados. [Usuarios]	Indicador Energía por usuario. [MJ/Usuario]	Indicador Costo por Usuario. [\$/usuario]	Indicador GEI por usuario. [Kg CO ₂ /Usuario]	Indicador. Energía por kilómetro. [MJ/km]
30	738.6	45,899	127,044,606	5.814	\$5.00	0.36	49.92
75	410.7	29,459	127,044,606	3.233	\$6.03	0.23	27.76
88	287.5	17,676	127,044,606	2.263	\$8.51	0.14	19.43
06	143.7	7,365	127,044,606	1.132	\$11.42	0.06	9.72
14	82.1	0	127,044,606	0.647	\$14.48	0.00	5.55

4.7. Comparativo de resultados

Con el objetivo de comparar los beneficios otorgados por las tecnologías propuestas se busca establecer parámetros para identificar las mejores prácticas e introducir cambios en el parque vehicular que mejoran el rendimiento del transporte público de pasajeros. Se busca que este comparativo aporte herramientas claves para ayudar a los diferentes medios de transporte a orientar su planeación hacia solucionar los problemas energéticos y ambientales que aqueja el transporte público de pasajeros en las ciudades.

A través del desarrollo de este trabajo se han recabado una importante cantidad de datos que nos permiten medir de forma objetiva los sucesos de la oferta técnica propuesta en este trabajo para un ascenso tecnológico; sin embargo, es necesario darle una interpretación a cada uno de los valores obtenidos para obtener un enfoque comparativo entre los diferentes tipos de autobús ofertados.

Para establecer variables que puedan compararse de forma cuantitativa, los datos arrojados por las diferentes tecnologías propuestas para el transporte público de pasajeros, se propone comparar los siguientes campos:

- **ENERGÍA CONSUMIDA (MJ)**
- **COSTO DEL USO DE LA TECNOLOGÍA (\$)**
- **GENERACIÓN DE GEI (kg CO₂)**

Sin embargo el confrontar de forma individual los puntos anteriores solo arroja comparativos para cada una de las tecnologías propuestas, pero carece de comparativos como sistema de transporte.

Derivado de lo anterior, este trabajo propone generar indicadores en función del producto final de un sistema de transporte, el cual será la cantidad de usuarios transportados.

Tomando nuevamente lo plasmado al inicio de este trabajo (Congreso de la Unión, 2008):

*“Se le denomina eficiencia energética a todas las acciones que conlleven a una **reducción económicamente** viable de la **cantidad de energía** necesaria para satisfacer las necesidades energéticas de los servicios y bienes que requiere la sociedad, asegurando un nivel de calidad igual o superior y una **disminución de los impactos ambientales negativos** derivados de la generación, distribución y consumo de energía. Queda incluida dentro de esta definición, la sustitución de fuentes no renovables de energía por fuentes renovables de energía.”*

Nos centramos en tres factores que anteriormente se plantearon comparar y ahora se agregan a la orientación de eficiencia energética, cada uno en relación a los usuarios movilizados por el sistema de transporte público de pasajeros.

Por tanto se proponen los siguientes indicadores:

- **Energía Consumida por Usuario (MJ/Usuario)**
- **Costo por Usuario (\$/Usuario)**
- **Generación de GEI por Usuario (kg de CO₂ equivalente/Usuario)**

Un último indicador es propuesto para contar con un parámetro que nos indique un uso correcto del material rodante, enfocándonos en que una eficiencia energética parte de un uso correcto del equipo disponible.

- **Energía por Kilómetro (kWh/km)**

Con estos indicadores se aporta información para la toma de decisiones en el ascenso tecnológico del material rodante en el transporte público de pasajeros urbano, esto con la intención de mejorar el costo de inversión, posibilitar la evaluación de los diferentes medios de transporte, mejorar la gestión de operación, establecer compromisos de desempeño y ofrecer rendimiento de cuentas.

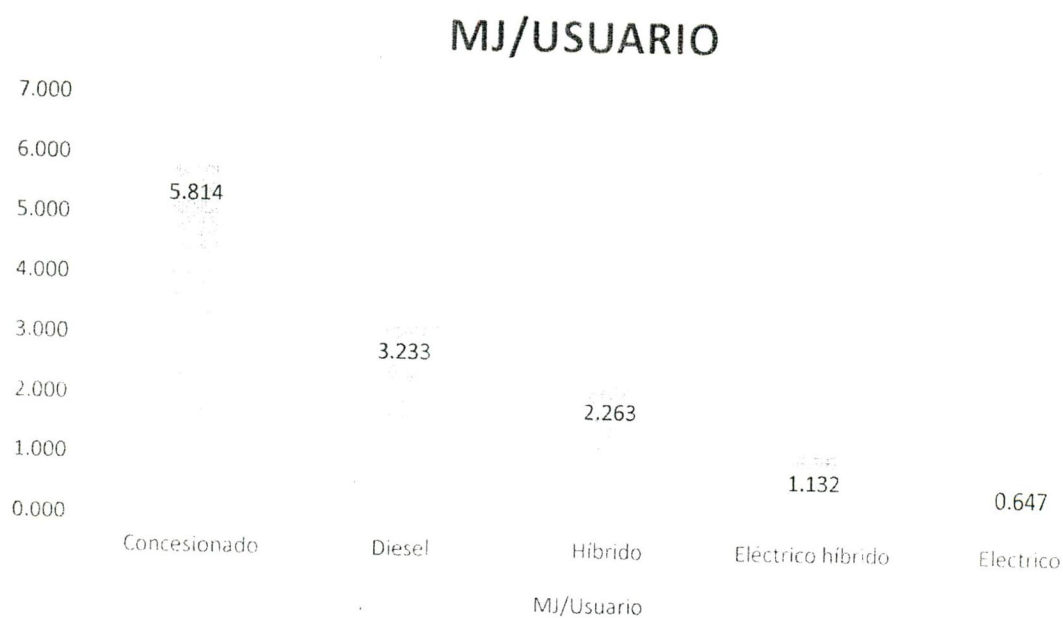
A continuación se muestran los valores obtenidos para los indicadores propuestos de cada una de las ofertas tecnológicas.

4.7.1. Indicador de Energía Consumida por Usuario (MJ/Usuario)

El consumo de energía pueden reducirse considerablemente ofreciendo un ascenso tecnológico en el material rodante, un sistema operativo sólido y optimizado del transporte público de pasajeros, a la par controlando el uso del suelo, mejorando las zonas peatonales y la integración con transportes; de acuerdo al análisis de este indicador encontramos que la meta a seguir se encuentra en la utilización de los vehículos eléctricos.

En todo el mundo se está prestando más atención a los sistemas de autobús de tránsito rápido (BRT) como sustituto del transporte concesionado.

Gráfica 4 Energía Consumida por Usuario (MJ/Usuario)



De acuerdo a los datos arrojados por este indicador (Gráfica 4), se observa la disminución de energía requerida por usuario en cuanto se avanza en la tecnología, es de resaltar la mejora que existe en el cambio de transporte concesionado al esquema BRT con tecnología diesel, donde el consumo se redujo un 45%.

Acelerar la introducción de los autobuses eléctrico aporta una reducción del consumo de energía y con ello la introducción de tecnologías limpias, pensar no solo en un corredor o en alguna zona de la ciudad.

4.7.2. Indicador de Costo por Usuario (\$/Usuario)

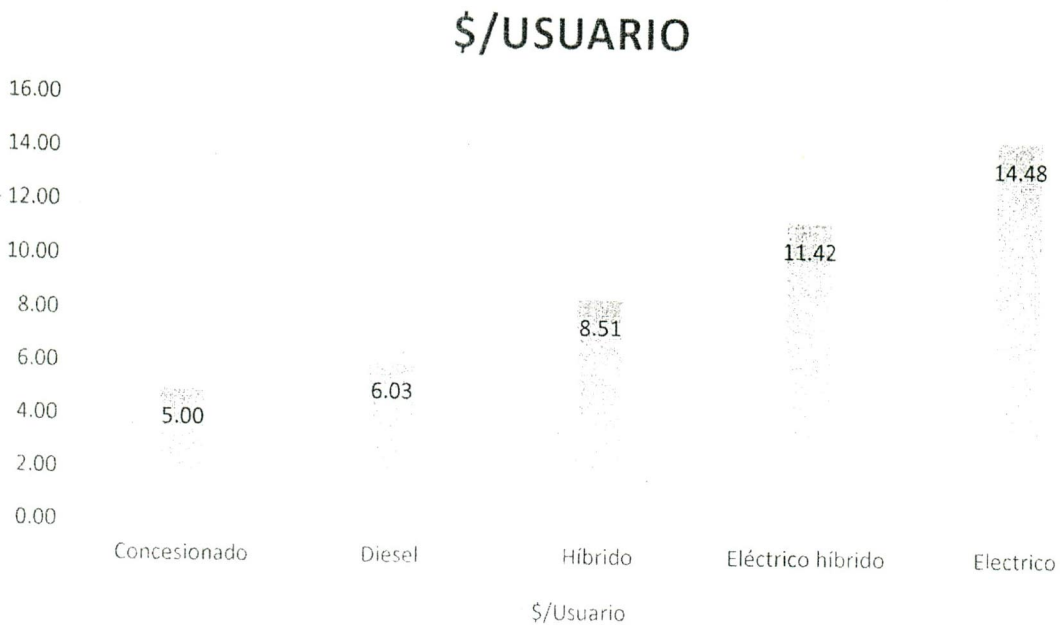
Tal vez este podría ser el indicador con mayor peso para la toma de decisiones en nuevos proyectos de transporte público de pasajeros, no olvidemos que la movilidad de los habitantes de una ciudad es parte de la política pública, por tanto el resultado de este indicador tiene que ser tratado de forma especial para no producir condiciones desfavorables en el avance tecnológico del transporte público de pasajeros.

Para nuestro estudio la inserción en este momento de nueva tecnología solo sería viable a través de incentivos gubernamentales, tales como subsidio, esto debido al incremento del costo por usuario en cuanto mayor sea el avance tecnológico (Gráfica 5).

Sin embargo, el mejoramiento tecnológico en el transporte público de pasajeros sobre todo en el ámbito urbano, ha despertado en fechas recientes el interés por parte de instituciones internacionales como el banco mundial, por nombrar alguno, donde proyectos de esta índole suelen ser atractivos para instituciones crediticias internacionales, otorgando créditos con un plazo mayor y/o tasas de interés por debajo de la banca comercial, que acompañado con apoyo gubernamental como el Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN), pueden volver viable un proyecto en tomando el Costo por Usuario, así mismo el mercado de baterías ha presentado en

tiempos recientes un avance tecnológico, con lo cual los autobuses con dependencia eléctrica han presentado una disminución en sus costos.

Gráfica 5 Costo por usuario.



4.7.3. Indicador de Generación de GEI por Usuario (kg CO₂eq/Usuario)

Este indicador nos entrega beneficios que forman parte de una mejora en la eficiencia energética y a su vez aporta resultados alicientes. Ahora bien, la mejora en la emisión de gases efecto invernadero aporta características a favor para impulsar nuevos proyectos, para con ello alcanzar beneficios económicos como los aportados por Banco Mundial, los cuales fueron el detonante en el proyecto de avenida Insurgentes.

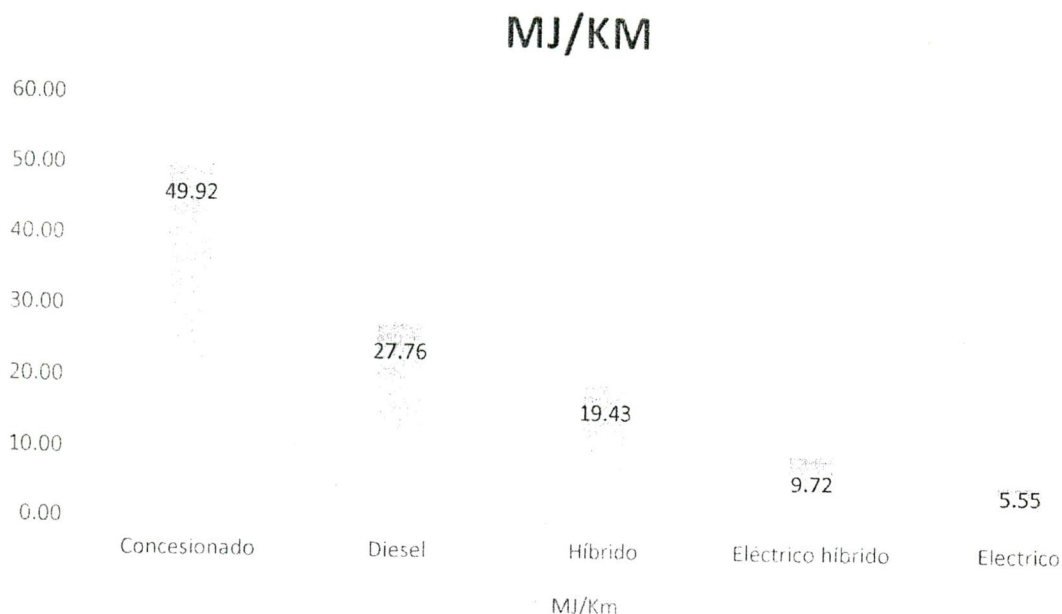
Gráfica 6 kg CO₂ eq / Usuario.



4.7.4. Indicador del Consumo energético por km recorrido (MJ/km)

Un indicador de consumo energético en función al kilometraje recorrido aporta estándares necesarios a cumplir para la correcta explotación del material rodante. Este parámetro puede marcar la pauta para establecer metas y dar seguimiento a los modelos operativos de transporte público de pasajeros urbano (Gráfica , bajo el entendido de una mejora energética por uso racional de la flota vehicular.

Gráfica 7 MJ / km.



El presente indicador tiene la capacidad de comparar la oferta de lugares y la demanda de usuarios, esto para fungir como semáforo al identificar una problemática en el sistema, como lo son:

- Baja velocidad de transporte
- Tiempos prolongados de traslado
- Ineficiente operación del sistema

Una vez identificada la problemática y aplicado medidas correctivas tales como:

- Sincronización de semáforos que permitan un mejor flujo del tránsito
- Hacer respetar el reglamento de tránsito
- Reformular la operación del sistema

Nos permitirá evaluar de forma rápida si nuestras acciones han tenido un impacto positivo en nuestro sistema de transporte público de pasajeros.

4.8. Etapas para la introducción de nuevas tecnologías

Como parte de los objetivos de este trabajo, se asume plantear las etapas a superar en la introducción de nuevas tecnologías, identificadas a través de la información aportada por los indicadores, esperando alcanzar mejoras en el consumo energético, costo y emisiones de GEI en comparación con los obtenidos con las tecnologías a sustituir.

Cabe mencionar nuevamente el esquema operativo implantado en el Corredor Insurgentes, debido a que a lo largo de este trabajo se han mencionado las ventajas existentes al cambiar el transporte público concesionado al concepto BRT.

Una parte esencial para ser el referente en la Ciudad de México en la evolución tecnológica de los autobuses, ha sido el Órgano Regulador Metrobús, quien es la instancia responsable de la implementación, operación y gestión integral del sistema de transporte público de pasajeros bajo el concepto BRT y al mismo tiempo de las acciones y regulaciones dirigidas a promover el desarrollo sustentable en la movilidad de la zona de impacto de este transporte.

El Metrobús como órgano regulador y responsable del avance tecnológico en el transporte público de pasajeros de la ciudad, presenta un área importante de oportunidad la cual resalta en su Decreto de creación (Jefatura de Gobierno, 2005), el cual enuncia el siguiente párrafo:

"... Se crea el Organismo Público Descentralizado de la Administración Pública del Distrito Federal con personalidad jurídica, patrimonio propio y autonomía técnica y administrativa denominado Metrobús, el cual estará sectorizado a la Secretaría de Transportes y Vialidad del Distrito Federal... El Metrobús tendrá por objeto: La planeación, administración y control del Sistema de Corredores de Transporte Público de Pasajeros del Distrito Federal Metrobús..."

Asimismo Metrobús establece de la siguiente forma su **Misión**:

"Metrobús es un Órgano Descentralizado de la Administración Pública del Distrito Federal que busca la disminución de emisiones de GEI y preservación del medio ambiente, motivando un transporte limpio que brinde a los habitantes del Distrito Federal la seguridad de contar con un servicio oportuno, continuo, permanente y a la vanguardia mundial mediante el diseño, implantación y mantenimiento de un servicio de transporte público de pasajeros de alta capacidad con calidad, tecnología de punta y bajas emisiones de GEI" (Metrobús, 2015).

De lo anterior, podemos destacar el hecho de que Metrobús cuenta con una autonomía técnica, la responsabilidad de planear y administrar los diferentes corredores de transporte, así como parte de su Misión es el cuidado al ambiente y el uso de tecnología de punta; es por ello que basados en este medio de transporte planteamos las **Etapas sugeridas para un ascenso tecnológico exitoso en el parque vehicular de una flota de transporte público de pasajeros**, las cuales se enlistan a continuación:

1. Agotar las opciones de optimización de flota vehicular para autobuses con tecnología actual.

En nuestro caso de estudio, aún existen mecanismos para mejorar el desempeño energético del Corredor Insurgente con tecnología Diesel, los planteamientos son sustituir los autobuses articulados próximos a concluir su vida útil por autobuses biarticulados, capacitar a los conductores para realizar una conducción económica,

colocar semaforización con base de sensores que detecten la proximidad de un autobús, construir pasos elevados, entre otras.

Con base en lo anterior, una flota vehicular debe ser aprovechada a su máxima capacidad antes de pensar en un avance tecnológico.

2. Realizar protocolos de prueba para nuevas tecnologías.

Generar protocolos para operar vehículos con nuevas tecnologías, esto con el objetivo de obtener autobuses con las características adecuadas para las condiciones que imperan en la ciudad donde se pretende un ascenso tecnológico en el transporte público de pasajeros, en nuestro caso, unidades adecuadas para la operación de un Sistema BRT en la Ciudad de México.

3. Incentivar una política pública para generar alicientes en aras de incluir mejores tecnologías.

Aún el costo de introducir una nueva tecnología incrementa el costo operativo, el cual se traslada al precio que paga el usuario o a un subsidio, volviendo inviable este tipo de proyectos; situación por la cual se plantea incentivar una política pública para ofrecer beneficios fiscales desde la importación de los autobuses, como lo es el caso del Gobierno de Colombia (El mundo.com, 2013), a través de modificación de Aranceles de Aduana para la importación de vehículos con nuevas tecnologías, lo cual ha permitido introducir 400 autobuses híbrido a las calles de la Ciudad de Bogotá.

4. Establecer personal técnico y cadena de suministros para nuevas tecnologías.

Nuevamente para reducir costos en las nuevas tecnologías es necesario el asentar completamente la tecnología, a fin de evitar la importación de componentes necesarios para el mantenimiento y la sustitución de piezas, así mismo, contar con herramienta especial dedicado a estas nuevas tecnologías y capacitar mano de obra especializada.

5. Establecer una instancia para Control y Evaluación de las metas planteadas.

Los valores generados a través de los indicadores deberán ser monitoreados por una instancia orientada a mejorar la eficiencia energética y las emisiones de GEI al ambiente; que en el caso de la Ciudad de México podría recaer en el Órgano Regulador, ya que si se segrega esta tarea corremos el riesgo de generar un transporte público de pasajeros nuevamente ineficiente.

6. Insertar pequeñas muestras de nuevas tecnologías a sistemas de transporte en operación.

En nuestro caso de estudio, atender diariamente a medio millón de usuarios en el Corredor Insurgentes representa un reto, por tanto, es un riesgo tratar de cubrir la necesidad de movilidad de un sistema de transporte completo con una nueva tecnología, por tanto, es preferible insertar pequeñas muestras de nuevas tecnologías para asentar los autobuses a las condiciones cotidianas,

Insertado un volumen grande de unidades con nueva tecnología aumenta el riesgo de colapsar el medio de transporte y dañar gravemente las unidades, así como generar una imagen en decremento de la flota vehicular con nueva tecnología.

7. Establecer protocolos de prueba para inserción de energías limpias.

Electrificar el transporte nos abre la posibilidad del uso de tecnologías limpias, con lo cual evolucionaría el transporte a un estatus de tecnología limpia; como primer escenario se podría comenzar con el uso de Biodiesel, aprovechando que actualmente hay autobuses a diesel con la posibilidad de utilizar Biodiesel en un cierto porcentaje.

Posteriormente, se propone alimentar el transporte con tecnología eléctrica a través de Energía Solar y/o Energía Eólica.

8. Generar metas a largo plazo para un sistema de transporte a base de energía limpia.

Plantear metas a largo plazo que obliguen a un cambio paulatino; hoy en día países como Holanda o Alemania plantean escenarios a futuro con la meta de abandonar el uso de combustibles fósiles en el transporte público de pasajeros.

9. Orientar las metas a mediano plazo para contar con material rodante que pueda operar a futuro con energía limpia.

Previo a una completa electrificación en el transporte, se deberá cumplir la tarea de reducir el consumo energético y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), a través de tecnologías intermedias como es el caso de autobuses híbridos.

10. Las metas a corto plazo deben asegurar un correcto funcionamiento para no frenar el desarrollo de los planteamientos futuros.

Una mala selección de tecnología puede retrasar el avance tecnológico en el transporte; obtener resultados negativos, aleja la inversión de las empresas transportistas y desalienta el interés gubernamental.

11. Incluir en las metas a todos los involucrados para centrar esfuerzos en la realización de estos.

Parte de contar con una Instancia de Control y Evaluación, se centra en converger la mirada de los diferentes involucrados en un mismo punto; un proyecto de movilidad sustentable debe estar acompañado de autoridades ambientales, viales, de seguridad, de desarrollo urbano, entre muchos otros, dando seguimiento a los resultados a través de indicadores como los desarrollados en este trabajo.

12. Generar incentivos en los participantes.

Actualmente en la mayoría de las ciudades de México, el transporte público de pasajeros está a cargo de particulares, como lo era el Corredor Insurgentes previo a la implementación del Sistema BRT; esto ocasiona que al carecer de incentivos, los transportistas no vean atractiva una inversión para mejorar la tecnología de su

parque vehicular, por tanto el material rodante termina envejeciéndose y operando en circunstancias deplorables, es por ello la necesidad de incentivar económicamente a los transportistas para un ascenso tecnológico, así como recompensar a los conductores quienes son la primera línea para alcanzar mejores resultados en relación a una eficiencia energética.

CONCLUSIONES.

La obtención de un transporte energéticamente eficiente y funcional es una ardua tarea para los próximos años, comenzar a generar sistemas de movilidad limpios es una inminente necesidad; existen muchos aspectos que mejorar en la movilidad urbana actual, uno de ellos es el modelo económico del transporte concesionado, en donde los ingresos cubren:

- Pago al concesionario
- Pago al chofer
- Pago al despachador
- Pago al ayudante del chofer
- Pago de tarjeta (pago de Ruta)
- Combustible

Derivado de lo anterior, para la mayoría de los concesionados no existe un fondo destinado para un mejoramiento tecnológico en sus unidades, situación que lleva a operar unidades con más de 20 años, volviendo un sistema de transporte contaminante y energéticamente ineficiente.

Desafortunadamente la mayor parte del transporte público de pasajeros urbano de la Ciudad de México, como en muchas otras ciudades de México, se realiza bajo este concepto de movilidad.

La iniciativa de mejorar el transporte público realizada en el Corredor Insurgentes debe ser replicada, como se mencionó en la introducción de este trabajo. En México, el sector con mayor consumo energético es el transporte y se cuenta con un número importante de ciudades con condiciones de movilidad deplorable, con modelos de transporte totalmente ineficientes.

El análisis de los resultados obtenidos a partir del indicador **Energía Consumida por Usuario** plasma claramente un beneficio a partir del avance tecnológico, observando que al tener transportes con mayor capacidad como los sistemas férreos

pueden mejorar fácilmente los índices obtenidos por un sistema BRT, esto debido a la mayor capacidad de transportar usuarios; para dejar el justo valor a este indicador.

Para el segundo indicador, **Costo por Usuario**, recae un peso importante para la toma de decisiones, tal vez en este rubro se encuentra una de las ventajas más importantes de los sistemas BRT, donde se puede implementar un sistema de transporte público de pasajeros masivo a un costo menor que el necesario para otros sistemas de transporte, sin embargo, para nuestro caso requerimos una mejora en la eficiencia energética; no debe olvidarse que nuestro enfoque de mejoramiento en la eficiencia energética recae en la mayor cantidad de usuarios transportados con la menor energía consumida, sin descuidar la calidad del servicio, que es una de las primicias del la eficiencia energética , por lo cual requerimos aportar un sistema de movilidad que no debe olvidarse de su función social, en donde el costo por usuario debe competir con el costo del sistema de transporte a retirar, que en la mayoría de los casos se trata de un sistema de transporte concesionado, un reto muy complicado de superar pues de acuerdo a la información aportada con este indicador, muestra que a mayor ascenso tecnológico el costo se incrementa con respecto al transporte concesionado.

En el tercer indicador se planteó analizar la **Generación de GEI por Usuario (kg de CO₂ equivalente/Usuario)**, en donde se establece un parámetro a cumplir para plasmar la disminución de los efectos negativos al ambiente; este indicador está relacionado con una gran cantidad de beneficios cualitativos y que operan en contra de un ascenso tecnológico, ya que al no poder cuantificarlos, no aportan puntos a favor de esta acción; sin embargo aun cuando estos puntos no están incluidos, es notable el mejoramiento de los impactos ambientales a través de la disminución de las emisiones de GEI entre mejor tecnología sea utilizada, hasta alcanzar vehículos completamente eléctricos, en el cual desaparecen las emisiones de GEI en el lugar de operación de los vehículos.

El cuarto indicador se estableció como **Consumo energético por km**, con la intención de plasmar un índice que nos permita monitorear el uso correcto del equipo, buscando que para nuestro caso de estudio solo sean utilizados los

autobuses necesarios para atender la demanda de usuarios y por tanto evitar el consumo de energía recorriendo kilómetros de forma innecesaria, situación que es claramente detectable cuando revisamos los resultados obtenidos en este indicador; como se predecía el sistema de transporte concesionado es el rubro que usa el parque vehicular de una forma desmedida; conforme se aumentó la tecnología este indicador disminuyó, pero nos deja claro que deberá ser monitoreado si pretendemos mejorar la eficiencia energética en el transporte público de pasajeros. En el mismo orden de ideas, es necesario permear la iniciativa de cambio tecnológico del Corredor Insurgentes al resto de las ciudades mexicanas, para con ello cambiar la imagen de transporte público de pasajeros en nuestro país y aprovechar la oportunidad de transformar el transporte público urbano de México en punta de lanza para la inclusión de energías limpias.

Sin embargo, deberá realizarse un ascenso tecnológico responsable a fin de mantener un equilibrio en los diferentes indicadores, como hemos analizado el consumo de energía y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) se compartan de una manera similar, a mayor ascenso tecnológico los dos rubros mencionados disminuyen; ahora analizando los costos producto de este avance tecnológico, reflejan un incremento en cuanto mayor sea el mejoramiento de los vehículos.

Como parte final de este trabajo se menciona que una mejora energética en el transporte público de pasajeros, no solo está centrado en la tecnología utilizada, ésta ocupa una pequeña parte para mejorar la eficiencia energética en el transporte público de pasajeros; por ello se requiere una convergencia de todos los involucrados. Podemos mencionar que el ascenso tecnológico debe darse en cualquiera de los sistemas de transporte público de pasajeros, ya sea en los conceptos de movilidad que incluyen autobuses o en sistemas férreos.

Queda claro que este trabajo no busca colocar al sistema "*Bus Rapid Transit*" como la mejor opción de eficiencia energética en el transporte público urbano, pero puede mostrar claramente que representa un primer paso hacia una movilidad sustentable como lo fue en el Corredor Insurgentes.

SUGERENCIAS

Se propone como continuación a este trabajo para futuros trabajos los siguientes temas.

- Uso de energía limpia para sistemas de transporte urbano.

Generar modelos de transporte, los cuales cuenten con el material rodante alimentado por energía limpia, tal como vehículos eléctricos utilizando energía proveniente de centrales fotovoltaicas o eólicas; así como utilización de biodiesel.

- Establecimiento de programas de mantenimiento en flotas vehiculares dedicadas al transporte urbano orientadas al mejoramiento de la eficiencia energética.

Empalmar los objetivos de un sistema operativo de transporte urbano con los procedimientos de mantenimiento orientado a un aumento en la eficiencia energética, esto mediante herramientas como el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad y el uso de telemetría.

- Modelos operativos de transporte urbano para el uso responsable de energía.

Generar procedimientos para establecer indicadores de consumo energético; así como una instancia par seguimiento a este consumo energético, tal como lo hace hoy en día la Secretaría del Medio Ambiente con las emisiones de gases de combustión.

- Benchmarking a partir del uso de los indicadores utilizados en este trabajo para diferentes medios de transporte urbano:
 - Sistema transporte concesionado.
 - Sistema de transporte BRT.
 - Tren ligero.
 - Metro.

Plantear el medio de transporte más eficiente de acuerdo a las condiciones operativas imperantes para alcanzar mejores resultado en el área de consumo energético.

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Consumo de energía en el sector transporte, 2011	11
Tabla 2 Parque vehicular total.	49
Tabla 3 Parque vehicular de Corredor Insurgentes S.A. (CISA).....	50
Tabla 4 Parque vehicular de Vanguardia y Cambio S.A. (VYCSA).	50
Tabla 5 Parque vehicular de la Red de Transporte Público de Pasajeros (RTP).	50
Tabla 6 Parque vehicular del Corredor Eje 4 – 17 de Marzo (CE4-17M).....	51
Tabla 7 Parque vehicular Rey Cuauhtemoc S.A.(RECSA).....	51
Tabla 8 Rendimientos de combustible por tipo de vehículo.....	55
Tabla 9 Factores de emisión para el combustible utilizado en la Ciudad de México.	63
Tabla 10 Flota vehicular sustituida en Insurgente.....	65
Tabla 11 Flota vehicular en transporte concesionado.....	66
Tabla 12 Flota vehicular en transporte concesionado ajustada.....	67
Tabla 13 Kilometraje recorrido por el transporte concesionado.....	78
Tabla 14 Consumo energético por el transporte concesionado.....	78
Tabla 15 Consumo energético de la flota vehicular BRT.....	79
Tabla 16 Cálculo de costo para tarifa técnica autobús diesel.	84
Tabla 17 Cálculo de costo para tarifa técnica autobús híbrido.	86
Tabla 18 Cálculo de costo para tarifa técnica Autobús eléctrico híbrido.....	88
Tabla 19 Cálculo de costo para tarifa técnica Autobús eléctrico.....	90

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1 Producción mundial de energía primaria, 2011	9
Figura 2 Consumo mundial de energía por sector, 2011.....	10
Figura 3 Soluciones de transporte.....	24
Figura 4 Eficiencia Energética en el Transporte.....	25
Figura 5 Midibús Ram 4000	27
Figura 6 Autobús Bóxer.....	28
Figura 7 Autobús Scania.....	29
Figura 8 Autobús Articulado Mercedes Benz.....	29
Figura 9 Autobús Articulado Dina.....	30
Figura 10 Autobús biarticulado Volvo.....	30
Figura 11 Desincorporación total del sistema.....	32
Figura 12 Autobús Volvo híbrido 12 metros.....	36
Figura 13 Autobús eléctrico híbrido.....	39
Figura 14 Autobús eléctrico.....	42
Figura 15 Estaciones Corredor Insurgentes	47
Figura 16 Esquema de Pago.....	59
Figura 17 Esquema de modelo económico.....	60
Figura 18 Cálculo de Tarifa Técnica.....	61
Figura 19 Tarifa transporte concesionado.....	82
Figura 20 Consumo de combustible en el transporte concesionado.....	92
Figura 21 Consumo de combustible para autobuses Diesel.....	93
Figura 22 Demanda de usuarios del Corredor Insurgentes.....	95
Figura 23 Tabla resumen de valores.....	96

Coordinación de Certificación y Registro

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada Humano me es ajeno