



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

PROPUESTA PARA LA IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA AVANZADO PARA EL
TRANSPORTE PÚBLICO EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE INTERNO PUMABÚS DE
CIUDAD UNIVERSITARIA

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

PRESENTA:
BRENDA ANGÉLICA CERDA MOLINA

TUTOR PRINCIPAL
DRA. ANGÉLICA DEL ROCÍO LOZANO CUEVAS
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Aceves García Ricardo
Secretario: M.I. Guzmán Castro Luis Alejandro
Vocal: Dra. Lozano Cuevas Angélica del Rocío
1^{er}. Suplente: M. en I. Londoño Mejía Gloria Elena
2^{do}. Suplente: Dr. López Flores David

Lugar donde se realizó la tesis: Universidad Nacional Autónoma de México

TUTOR DE TESIS:

DRA. ANGÉLICA DEL ROCÍO LOZANO CUEVAS

FIRMA

(Segunda hoja)

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO 1. EL TRANSPORTE EN LA CIUDAD DE MÉXICO	4
1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO	4
1.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS VIAJES	9
1.3. SITUACIÓN ACTUAL DEL TRANSPORTE PÚBLICO AUTOMOTOR DE PASAJEROS	13
1.3.1. Transporte operado por el Estado	14
1.3.1.1. <i>Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC)</i>	14
1.3.1.2. <i>Servicio de Transportes Eléctricos del Distrito Federal (STE)</i>	18
1.3.1.3. <i>Sistema de Movilidad 1(M1)</i>	21
1.3.2. Transporte Concesionado	23
1.3.2.1. <i>Microbuses</i>	24
1.3.2.2. <i>Taxis</i>	25
1.3.2.3. <i>Metrobús</i>	27
1.3.3. Centros de Transferencia Modal (CETRAM)	31
1.3.4. Comparación entre los sistemas de transporte público de pasajeros	32
1.4. PROBLEMÁTICA ACTUAL DEL TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS	36
1.4.1. Políticas Públicas	37
1.4.2. Falta de información relacionada al transporte a nivel usuario y dependencias encargadas	37
1.4.3. Autos particulares	39
1.4.4. Restricciones de circulación debidas a la contaminación ambiental	40
1.4.5. Cobertura del transporte público, grupos vulnerables e inseguridad	41
1.4.6. Calidad de los servicios.....	43
1.4.7. Atraso tecnológico	44
1.5. TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS DENTRO DE CIUDAD	45
1.5.1. Bicipuma	45
1.5.2. Sistema de Transporte Interno Pumabús.....	47
1.6. CONCLUSIONES	52
CAPÍTULO 2. SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE	56
2.1. CONCEPTOS BÁSICOS	56
2.2. ANTECEDENTES.....	57
2.3. BENEFICIOS DE LA IMPLANTACIÓN DE SIT	60
2.4. TIPOS DE SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE: DESCRIPCIÓN Y ...	63
2.4.1. Sistema Avanzado de Gestión del Transporte (SAGeT)	63

2.4.1.1.	<i>Descripción</i>	64
2.4.1.2.	<i>Ejemplo de aplicación: Japón</i>	65
2.4.2.	Sistema Avanzado de Información al Viajero (SAIV)	67
2.4.2.1.	<i>Descripción</i>	68
2.4.2.2.	<i>Ejemplo de aplicación: Canadá y Francia</i>	69
2.4.3.	Sistema Avanzado de Control de Vehículos (SACV)	73
2.4.3.1.	<i>Descripción</i>	73
2.4.3.2.	<i>Ejemplo de aplicación: Eco-Drive</i>	74
2.4.4.	Sistema de Operación de Vehículos Comerciales (SOVC)	75
2.4.4.1.	<i>Descripción</i>	76
2.4.4.2.	<i>Ejemplo de aplicación: Omnitracs, Encontrack y Flotasnet</i>	77
2.4.5.	Sistema Avanzado de Gestión de Estacionamientos (SAGE)	80
2.4.5.1.	<i>Descripción</i>	80
2.4.5.2.	<i>Ejemplo de aplicación a nivel mundial: Milwaukee, Estados Unidos</i>	81
2.4.6.	Sistema de Predicción del Tráfico en Tiempo Real.....	82
2.4.6.1.	<i>Descripción</i>	83
2.4.6.2.	<i>Ejemplo de aplicación a nivel mundial: Aimsum y Optima</i>	84
2.4.7.	Sistema Avanzado de Transporte Rural (SATR).....	85
2.4.7.1.	<i>Descripción</i>	86
2.4.7.2.	<i>Ejemplo de aplicación a nivel mundial: Canadá</i>	87
2.4.8.	Sistema Avanzado para el Transporte Público (SATP).....	88
2.4.8.1.	<i>Descripción</i>	88
2.4.8.2.	<i>Ejemplo de aplicación a nivel mundial: Londres y Nueva York</i>	90
2.5.	ORGANISMOS SIT INTERNACIONALES Y ARQUITECTURAS SIT.....	93
2.5.1.	ITS América.....	94
2.5.2.	ERTICO-ITS EUROPE	98
2.5.3.	VERTIS-ITS Japón.....	99
2.5.4.	Comparación entre las arquitecturas SIT.....	101
2.6.	SIT EN MÉXICO.....	102
2.6.1.	CITI, Metrobús	102
2.6.2.	Autopista Arco Norte.....	104
2.6.3.	Centro de Control de Semáforos Inteligentes en la Ciudad de México	105
2.6.4.	Centro de Control del Tráfico en Morelia, Michoacán.....	106
2.6.5.	Centro de Control del Tráfico en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco	106
2.6.6.	Sistema Avanzado de Información al Viajero HIPERPUMA	106
2.7.	NORMATIVIDAD PARA LOS SIT	107
2.7.1.	Normatividad ISO.....	108
2.7.2.	Normas Oficiales Mexicanas (NOM), Normas Mexicanas (NMX) y Normativa para la Infraestructura del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes	108

CAPÍTULO 3. SISTEMAS AVANZADOS PARA EL TRANSPORTE PÚBLICO.....117

3.1.	DESCRIPCIÓN GENERAL.....	117
3.2.	ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS AVANZADOS PARA EL TRANSPORTE PÚBLICO.....	118
3.3.	HARDWARE PARA UN SISTEMA AVANZADO PARA EL TRANSPORTE PÚBLICO.....	120
3.3.1.	Pago electrónico	120
3.3.2.	Contadores de pasajeros	124
3.3.3.	Localización de vehículos	127
3.3.4.	Distribución de información en tiempo real.....	134
3.3.5.	Prioridad semafórica.....	136
3.4.	SOFTWARE PARA UN SISTEMA AVANZADO PARA EL TRANSPORTE PÚBLICO.....	140
3.4.1.	Predicción de tiempos de llegada de los autobuses a las paradas.....	140
3.4.2.	Optimización de la operación.....	144
3.4.3.	Prioridad semafórica.....	153
3.5.	CENTRO DE CONTROL	156
3.6.	SISTEMAS DE COMUNICACIÓN	159
3.6.1.	Conceptos básicos	159
3.6.2.	Sistemas de comunicación alámbricos	161
3.6.3.	Sistemas de comunicación inalámbricos	165
3.7.	FLUJOS DE INFORMACIÓN.....	171
3.8.	FACTOR HUMANO.....	173
3.9.	TECNOLOGÍAS EN EL MERCADO PARA CONFORMAR SISTEMAS AVANZADOS PARA EL TRANSPORTE PÚBLICO	175
3.9.1.	Pago electrónico	175
3.9.2.	Contadores de pasajeros	178
3.9.3.	Localización de vehículos	181
3.9.4.	Distribución de información en tiempo real.....	185
3.9.5.	Prioridad semafórica.....	190
3.9.6.	Centro de control.....	192
3.9.7.	Sistemas de comunicación.....	196
3.10.	EMPRESAS INTEGRADORAS	200

CAPÍTULO 4. PROPUESTA DE IMPLANTACIÓN DE UN SATP EN EL SISTEMA PUMABÚS.....204

4.1.	JUSTIFICACIÓN	204
4.1.1.	Encuesta de satisfacción	205
4.1.2.	Resultados encuesta de satisfacción	206
4.2.	ELEMENTOS PROPUESTOS PARA LA IMPLANTACIÓN DEL SATP	214
4.2.1.	Hardware	214
4.2.1.1.	<i>Contadores de pasajeros</i>	214
4.2.1.2.	<i>Localización de vehículos</i>	215

4.2.1.3. <i>Distribución de información en tiempo real</i>	216
4.2.1.4. <i>Prioridad semafórica</i>	218
4.2.1.5. <i>Sistemas de comunicación</i>	220
4.2.2. Software.....	224
4.2.2.1. <i>Predicción de tiempos de llegada de los autobuses a las paradas</i>	224
4.2.2.2. <i>Optimización de la operación</i>	230
4.2.2.3. <i>Prioridad semafórica</i>	234
4.2.3. Centro de control.....	237
4.3. COMPONENTE HUMANO	239
4.4. PROCESO DE IMPLANTACIÓN.....	239
4.5. BENEFICIOS ESPERADOS.....	242
CONCLUSIONES	244
REFERENCIAS	246
ANEXO A. REDES NEURONALES	276
ANEXO B. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE REDES NEURONALES PARA PREDICCIONES DE TIEMPOS DE LLEGADA DE AUTOBUSES A LAS PARADAS	279
ANEXO C. CUESTIONARIO DE LA ENCUESTA DE SATISFACCIÓN DEL SERVICIO DE TRANSPORTE PUMABÚS	285

RESUMEN

Los problemas relacionados con el transporte en las ciudades cada vez van en aumento, y recurrir a las mismas soluciones que se han utilizado desde hace años ya no es una opción, por lo que la implantación de Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) surgió como una novedosa alternativa para ayudar a mitigar ciertos aspectos de dicha problemática.

Los SIT representan la aplicación de tecnología a un sistema de transporte con la finalidad de mejorar la movilidad, reducir tiempos de viaje, maximizar la capacidad de las vialidades, el manejo eficiente de flotas vehiculares, entre otros. Los SIT se dividen en diferentes categorías y una de ellas son los Sistemas Avanzados para el Transporte Público (SATP), que buscan mejorar la calidad de los servicios de transporte público que se brindan, logrando un aumento en la seguridad y eficiencia, además de brindar información en tiempo real a los usuarios sobre la operación del sistema y permitirles ingresar al servicio de transporte mediante el pago electrónico, entre otros.

En el presente trabajo se identifican los elementos requeridos para la correcta implantación de un SATP, como: dispositivos para el pago electrónico, localización de vehículos y distribución de información en tiempo real, además de contadores de pasajeros, tipos de sistemas de comunicación, equipamiento de un centro de control, y el software de predicción de tiempos de llegada de los autobuses a las paradas y de optimización de la operación.

Después de explorar las tecnologías disponibles en el mercado para cada una de las áreas antes mencionadas, se hace una propuesta de implantación de un SATP para el sistema de transporte interno Pumabús, en Ciudad Universitaria en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

ABSTRACT

Problems related to transport in cities are increasing and resorting to the same solutions that have been used for years is no longer an option, so the implementation of Intelligent Transportation Systems (ITS) emerged as an alternative to help mitigate certain aspects of this problem.

ITS represent the application of technology to a transportation system with the purpose of improving mobility, reducing travel times, maximizing road capacity, efficient fleet management, among others. ITS are divided into different categories and one of them are the Advanced Public Transportation Systems (APTS), which seek to improve the quality of public transportation services, increasing safety and efficiency, as well as providing real time information to users about the system's operation and allow them to make electronic payments.

The present work identifies the elements required for the correct implementation of an APTS, such as: devices for electronic payment, vehicle localization and distribution of information in real time, besides passenger counters, types of communication systems, equipment of a control center, and software to predict arrival times from buses to stops and optimize the operation.

After exploring the technologies available in the market for each of the aforementioned areas, a proposal is made for the implementation of an APTS for the internal transportation system Pumabus at Ciudad Universitaria, UNAM.

INTRODUCCIÓN

Al igual que en varias ciudades alrededor del mundo, en la Ciudad de México los problemas de transporte se vuelven cada vez más graves, debido entre otras cosas al aumento de vehículos particulares y la congestión vial que se genera.

Es por eso que se debe incentivar el uso del transporte no motorizado e impulsar el transporte público, brindando servicios de calidad con la finalidad de atraer una mayor cantidad de usuarios.

Los Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT), surgen como una estrategia innovadora que con ayuda de la tecnología pueden contribuir a resolver algunos aspectos de dicha problemática. Los SIT se pueden definir como: “la optimización de las funciones propias de los elementos básicos del Tránsito – Infraestructura Vial (calles y caminos) y Vehículos – mediante la aplicación de tecnologías avanzadas que interrelacionan tales elementos” (Hernández, 2013).

Estos sistemas tienen diferentes aplicaciones: buscan generar un uso eficiente de la infraestructura vial, reducir las emisiones contaminantes que provocan daños en el medio ambiente, mejorar la movilidad de la población en los diferentes modos de transporte con los que se cuenta, minimizar tiempos de traslado e incrementar la seguridad de los usuarios (Hernández, 2013).

Los SIT se dividen en varias categorías, una de ellas son los Sistemas Avanzados para el Transporte Público (SATP), que se enfocan, como su nombre lo indica, en el mejoramiento de los servicios de transporte público de pasajeros.

Dentro de Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México, una de las opciones para trasladarse es el Sistema de Transporte Interno Pumabús, un servicio gratuito que cuenta con diferentes rutas para ayudar a los usuarios a llegar a sus destinos dentro del campus.

Es un servicio que cuenta con carril exclusivo y paradas debidamente establecidas, sin embargo, en sus unidades se presentan problemas de sobrecupo en algunas rutas, mientras otras cuentan con baja demanda, además de la poca o nula información que se presenta a las personas sobre los recorridos y horarios, entre otros aspectos.

Es por eso que la implantación de un SATP en el Sistema Pumabús sería una opción para mejorar la calidad del servicio que se brinda, sin embargo ¿cuáles serían los elementos básicos que se requieren para poner en marcha un sistema de este tipo?, ¿qué características deben cumplir los dispositivos que se utilizarán? y ¿qué beneficios traería un SATP tanto para los operadores del sistema como para los usuarios del mismo?

El objetivo de esta tesis es elaborar una propuesta conceptual para la implantación de un Sistema Avanzado para el Transporte Público (SATP) en el Sistema de Transporte Interno Pumabús de Ciudad Universitaria.

Para cumplir con el objetivo, la tesis se organizó de la siguiente manera, en el primer capítulo se analiza la problemática actual, así como las principales necesidades que se tienen en el aspecto del autotransporte público de pasajeros en la Ciudad de México, para posteriormente enfocarse en la situación del transporte dentro de Ciudad Universitaria.

En el segundo capítulo, se identifican las características de los Sistemas Inteligentes de Transporte y los beneficios de su implantación, además del estudio de algunos casos de aplicación en México y en el mundo.

Posteriormente, en el tercer capítulo se examinan los requisitos para la implantación de Sistemas Avanzados para el Transporte Público en los sistemas de autotransporte público de pasajeros. Se hace un análisis del *hardware* y software requerido y de las diferentes opciones con las que se cuenta.

En el cuarto capítulo, se establecen las características que deben tener los elementos del SATP para su adecuada utilización en el Sistema de Transporte Interno Pumabús, tomando en cuenta las características de Ciudad Universitaria.

Asimismo, se presentan las conclusiones de esta tesis, para después enlistar las referencias consultadas en el desarrollo de la misma.

Finalmente, se cuenta con dos anexos, en el Anexo A se explican los conceptos básicos de las redes neuronales, y en el Anexo B, se presenta un ejemplo de la encuesta de satisfacción aplicada a los usuarios del Sistema de Transporte Interno Pumabús.

CAPÍTULO 1

EL TRANSPORTE EN LA CIUDAD DE MÉXICO

En este capítulo se abordan las principales características de la Ciudad de México, es decir, sus rasgos económicos, territoriales y de población, se describen las diferentes opciones de transporte público de pasajeros disponibles, y se presentan las características de los viajes que realizan los habitantes de la zona.

Finalmente, se explican los rasgos más importantes del funcionamiento de los sistemas de transporte público interno en Ciudad Universitaria: Bicipuma y Pumabús.

1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Según la Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal [INAFED], 2010), la Ciudad de México (CDMX) antes Distrito Federal (D. F.), además de ser la sede los Poderes Federales, es el núcleo urbano más grande del país, centro político, académico, económico, financiero, empresarial y cultural.

Se localiza en las siguientes coordenadas geográficas: “Al Norte 19°36’, al Sur 19°03’ de latitud norte; al Este 98°57’, al Oeste 99°22’ de longitud Oeste. Colinda al Norte, Este y Oeste con el Estado de México y al Sur con el estado de Morelos” (INAFED, 2010).

La Ciudad de México tiene una altura promedio de 2 300 metros sobre el nivel del mar (msnm) con algunas elevaciones, entre las que destacan el Cerro La Cruz del Marqués en el Ajusco con una altura de 3 930 msnm y el volcán Tláloc con 3 690 msnm (Figura 1.1), en cambio el nivel más bajo es de 2 240 msnm (INAFED, 2010).

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2012), el territorio de la Ciudad de México tiene una extensión de 1 485.49 kilómetros cuadrados (km²), de los cuales 792.37 km² corresponden a áreas urbanas, equivalente al 53.34% del total.

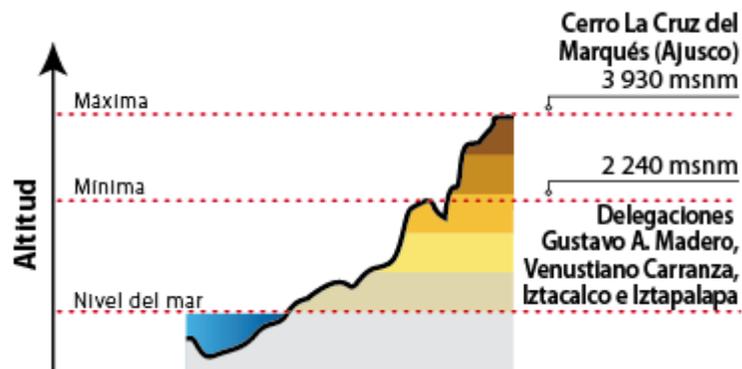


Figura 1.1. Relieve de la Ciudad de México
Fuente: (INEGI, 2012)

La Ciudad de México se encuentra dividida en 16 delegaciones políticas, que a partir de 2018 serán alcaldías, debido a los cambios generados por la Reforma Política del Distrito Federal de 2016 [Diario Oficial de la Federación (DOF), 2016], éstas son: Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuajimalpa de Morelos, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, La Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco.

A pesar de que la zona urbana ocupa la mayor parte del territorio, hacia el sur y sureste se encuentran algunas zonas agrícolas (INEGI, 2012).

El área total de la Ciudad de México representa solamente el 0.1% del total de la superficie del territorio nacional, convirtiéndose así en la entidad más pequeña de la República Mexicana (INAFED, 2010), sin embargo, de acuerdo con las proyecciones de población generadas por el Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2017), para el año 2017 contará con 8 811 266 habitantes.

En la Figura 1.2 se muestran las delegaciones políticas con la cantidad de habitantes en cada una de ellas de acuerdo con el último censo del que se tiene información, el Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2010a), ahí se puede apreciar que Iztapalapa era la más poblada con 1 815 786 habitantes, seguida de Gustavo A. Madero con un total de 1 185 772 y en tercer lugar, Álvaro Obregón con 727 034 personas.



Figura 1.2. Delegaciones y habitantes
Fuente: (Elaboración propia con datos INEGI, 2010a)

En la Figura 1.3, se muestra la densidad de población por área geostatística básica (AGEB) en la Ciudad de México, es decir, el número de personas que habitan en cada región específica entre el total de kilómetros cuadrados que mide ese territorio.

Cabe señalar que, una AGEB representa un área geográfica compuesta por un conjunto de manzanas delimitadas por calles, avenidas, andadores o cualquier otro rasgo que se pueda identificar en el terreno; su uso de suelo puede ser habitacional, industrial, de servicios, comercial, etc. (INEGI, 2010a).

En la Figura 1.4, se presentan las AGEBs clasificadas por el nivel socioeconómico, mismo que “representa la capacidad para acceder a un conjunto de bienes y estilo de vida” (Asociación Mexicana de Agencias de Investigación de Mercados y Opinión Pública [AMAI] e INEGI, 2008).

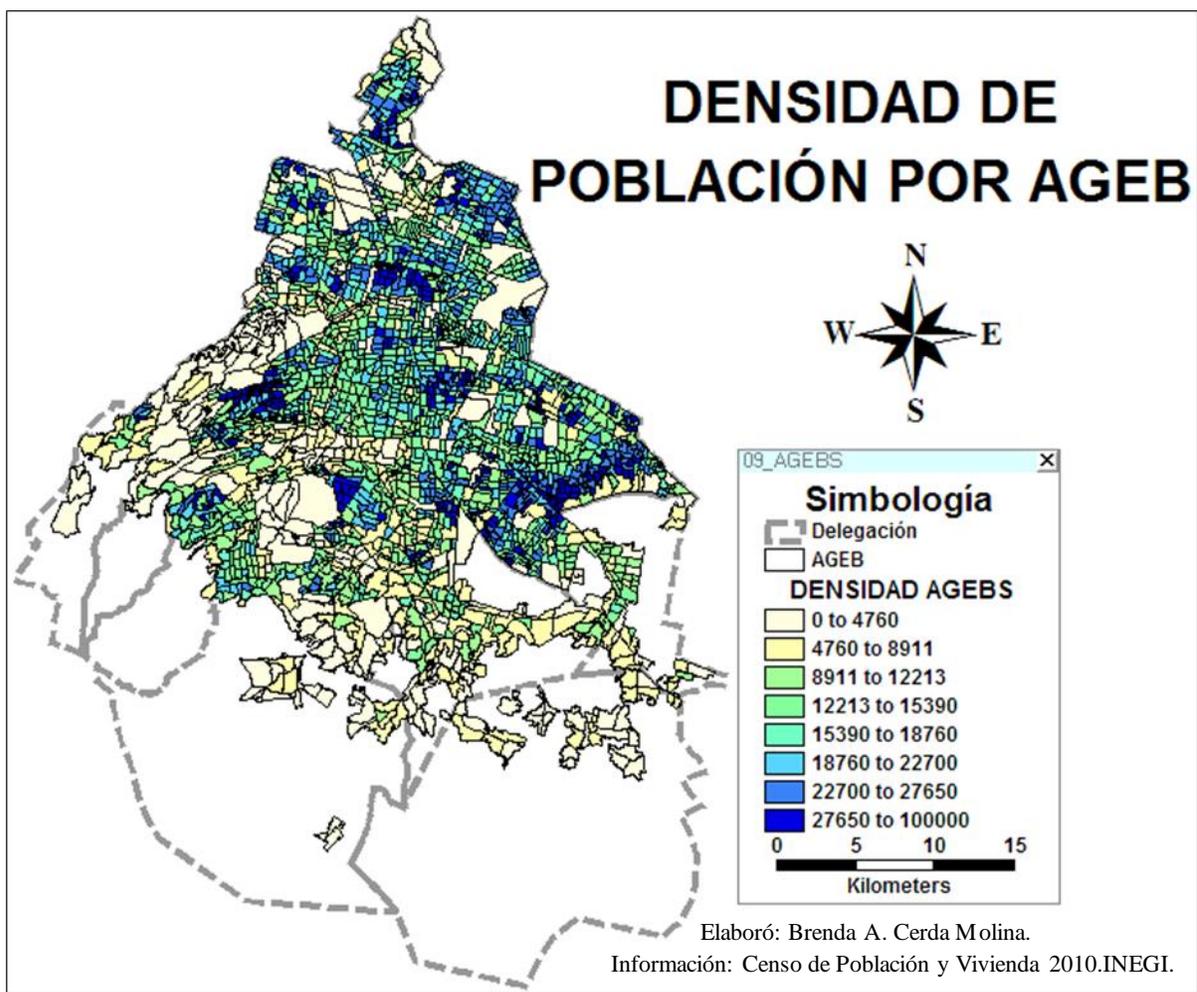


Figura 1.3. Densidad de población por AGEB en la Ciudad de México
Fuente: (Elaboración propia con datos INEGI, 2010a)

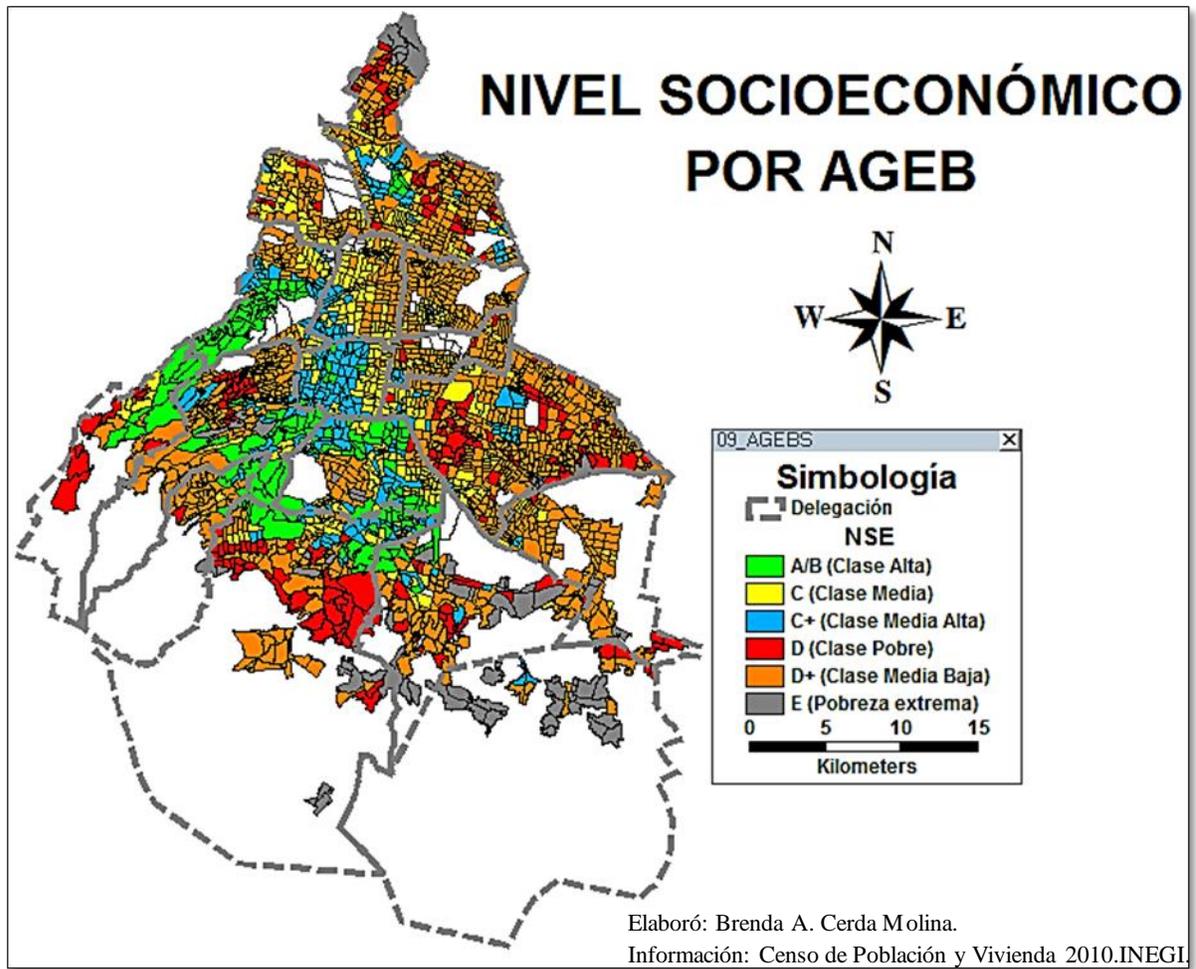


Figura 1.4. Nivel socioeconómico por AGEB en la Ciudad de México
Fuente: (Elaboración propia con datos INEGI, 2010a)

De acuerdo con la misma AMAI y el INEGI (2008), los diferentes niveles socioeconómicos presentan las siguientes características:

- El nivel A/B es el segmento con el más alto nivel de vida, se pueden encontrar casas o departamentos de lujo con todas las comodidades y está conformado por individuos con nivel educativo de licenciatura o mayor.
- La clase C+ o clase media alta, incluye a todos aquellos cuyos ingresos son ligeramente superiores a los de clase media, generalmente viven en casas o departamentos propios que cuentan con todas las comodidades.
- El segmento C, contiene a lo que comúnmente se conoce como clase media, los hogares pertenecientes a este nivel son casas o departamentos propios o rentados con algunas comodidades.
- En la clase D+ o clase media baja, se encuentran individuos con ingresos ligeramente menores a los de clase media y los hogares pertenecientes a este segmento son, en su mayoría, de su propiedad, pero se pueden encontrar personas que rentan el inmueble y algunas viviendas son de interés social.

- La clase D es el segmento medio de las clases bajas, los hogares son propios o rentados, en su mayoría de interés social o de rentas congeladas.
- Por último, la clase E es la más baja, las personas aquí incluidas no poseen un lugar propio para vivir, teniendo que rentar o conseguir donde resguardarse, generalmente en un solo hogar vive más de una generación y son totalmente austeros.

En cuanto a la población económicamente activa (PEA) en la Ciudad de México, hasta el cuarto trimestre de 2016 era de 4 350 772 personas, en la Tabla 1.1 se muestra la distribución de la población según su condición de actividad económica (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2017).

El Producto Interno Bruto (PIB) de la Ciudad de México alcanzó los 2 866 253 millones de pesos en 2015, cabe señalar que las actividades terciarias aportaron 89% a dicho PIB estatal en el mismo año (INEGI, 2016a).

En cuanto a la inversión extranjera directa, la Ciudad de México se mantiene como la entidad con mayor flujo de inversión, en el año 2015 recibió 4 804 millones de dólares, el 17% del total nacional (Secretaría de Economía, 2015).

Los sectores que cuentan con mayor inversión fija, de acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Económico (SEDECO, 2015) son:

- Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas por ductos al consumidor final
- Servicios de apoyo a los negocios y manejo de residuos y desechos
- Información en medios masivos
- Servicios financieros y de seguros
- Transportes, correos y almacenamiento

El Índice de Competitividad Estatal 2016 (ICE) elaborado por el Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO), se encarga de medir:

“la capacidad de las entidades federativas para atraer y retener talento e inversiones. Un estado competitivo es aquel que consistentemente resulta atractivo para el talento y la inversión, lo que se traduce en mayor productividad y bienestar para sus habitantes” (IMCO, 2014).

Dicho índice catalogó a la Ciudad de México como la entidad más competitiva, principalmente por sus fortalezas económicas (IMCO, 2016). A pesar de esto la Ciudad de México “reveló un gran reto en materia de estado de derecho: se encuentra en los últimos lugares en el Índice de percepción de seguridad pública, pérdidas económicas a consecuencia del delito y cumplimiento de contratos” (IMCO, 2016).

Como se puede apreciar, en la información presentada anteriormente se pueden encontrar datos de diferentes años, lo cual no es ideal para hacer comparaciones adecuadas, sin embargo, cada cifra es la más actualizada con la que se cuenta hasta la fecha.

Tabla 1.1. Distribución de la población por condición de actividad económica

DESCRIPCIÓN	TOTAL CIUDAD DE MÉXICO
Población menor de 15 años	1 723 814
Población de 15 años y más	7 101 328
Población económicamente activa (PEA)	4 350 772
Ocupados	4 162 141
De los cuales:	
*Asalariados	3 103 262
*Trabajadores por cuenta propia	792 538
*Empleadores	189 832
*Sin pago y otros	76 509
Desocupados	188 631
Población económicamente inactiva	2 750 556

Fuente: (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2017)

1.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS VIAJES

En octubre del año 2006, el Gobierno del Distrito Federal y el Gobierno del Estado de México, firmaron un convenio con el INEGI, para que este organismo llevara a cabo la Encuesta Origen-Destino del 2007 (EOD 2007), con el fin de obtener información sobre los viajes que realizaban los residentes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), que en ese entonces incluía al Distrito Federal y 40 de los 59 municipios del Estado de México como se muestra en la Tabla 1.2 (INEGI, 2007).

La información que se obtiene de una encuesta origen-destino permite obtener información acerca de los motivos por los cuales las personas realizan los viajes, los modos de transporte utilizados y el tiempo empleado para realizar los viajes, entre otros atributos que permiten conocer las características de la demanda de transporte (Ibeas, 2007).

Esto sirve para “tomar decisiones razonables y oportunas con respecto a la gestión, planificación y expansión de sistemas de transporte” (Ibeas, 2007).

Tabla 1.2. Municipios y delegaciones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2007

DELEGACIÓN	MUNICIPIO	MUNICIPIO	MUNICIPIO
Álvaro Obregón	Acolman	Ixtapaluca	Tezoyuca
Azcapotzalco	Amecameca	Jaltenco	Tlalmanalco
Benito Juárez	Atenco	La Paz	Tlalnepantla de Baz
Coyoacán	Atizapán de Zaragoza	Melchor Ocampo	Tonanitla
Cuajimalpa	Coacalco de Berriozábal	Naucalpan de Juárez	Tultepec
Cuauhtémoc	Coyotepec	Nextlalpan	Tultitlán
Gustavo A. Madero	Cuautitlán	Nezahualcóyotl	Valle de Chalco
Iztacalco	Cuautitlán Izcalli	Nicolás Romero	Solidaridad
Iztapalapa	Chalco	Papalotla	Zumpango
M. Contreras	Chiautla	San Martín de las Pirámides	
Miguel Hidalgo	Chicoloapan de Juárez	Tecámac	
Milpa Alta	Chiconcuac	Teoloyucán	
Tláhuac	Chimalhuacán	Teotihuacán	
Tlalpan	Ecatepec de Morelos	Tepetlaotoc	
Venustiano Carranza	Huehuetoca	Tepotzotlán	
Xochimilco	Huixquilucan	Texcoco	

Fuente: (INEGI, 2007)

Enseguida se presentan los principales resultados que arrojó la Encuesta Origen-Destino 2007 (INEGI, 2007):

En la Figura 1.5, se muestra que los habitantes de la zona de estudio realizaban 21.9 millones de viajes en un día hábil, 58.4% tenían como origen el Distrito Federal. De los viajes totales que se produjeron en el D. F., 83% permanecieron ahí mismo, el resto se desplazaba a alguno de los municipios mexicanos mostrados en la Tabla 1.2.

Del total de viajes realizados, aproximadamente 14.8 millones (más de dos terceras partes) se hicieron en algún modo de transporte público y 6.8 millones en transporte privado.

De los viajes que se llevaron a cabo en transporte público, el 54.9% utilizaban un único modo y los restantes, dos o más.

De los viajes en un solo modo, el colectivo concentró el 64.5%, seguido del taxi con el 16.4%, después el metro con el 8.2%, y los menores porcentajes corresponden al autobús suburbano con 7.3%, el autobús RTP con poco más del 2% y el trolebús, metrobús y tren ligero, todos juntos con menos del 1%.

En el caso del metro, la mayor parte de los usuarios lo utilizó como un medio de conexión con otras opciones de traslado, pero el modo de transporte que acumula la mayor cantidad de combinaciones con otros modos es el colectivo.

La razón principal de los viajes que efectuaron las personas dentro del área de estudio fue el regreso al hogar, seguido del traslado al trabajo y en tercer lugar se encontró acudir a estudiar.

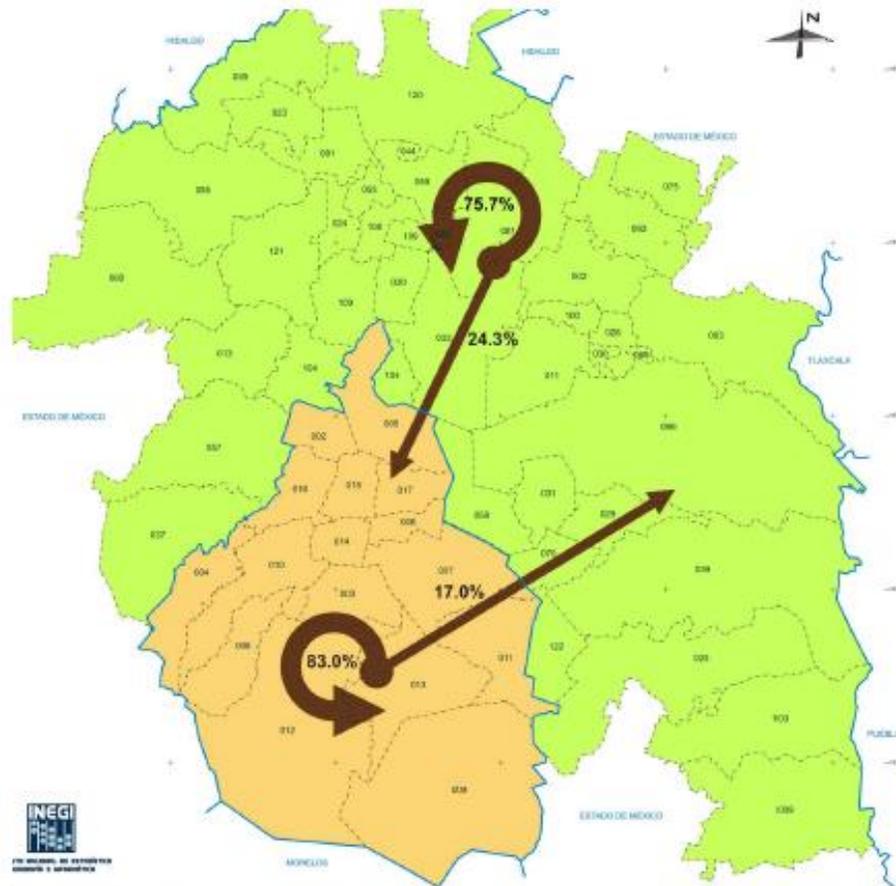


Figura 1.5. Viajes totales Ciudad de México y Estado de México
Fuente: (INEGI, 2007)

El promedio de viajes por viajero era de 2.4; pero cabe señalar que cada delegación del Distrito Federal presentó particularidades en la movilidad de sus residentes, debido entre otras cosas, a sus características poblacionales y desarrollo económico.

En la EOD 2007, se muestra que las delegaciones que mayor cantidad de viajes producidos y atraídos registraron fueron Iztapalapa con 1.8 millones, Cuauhtémoc con 1.7 millones, Gustavo A. Madero con 1.4 millones y en cuarto lugar Coyoacán con 1.1 millones. Mientras la delegación que menor número de viajes producidos reportó fue Milpa Alta.

Es importante mencionar que en las delegaciones Milpa Alta, Xochimilco, Iztapalapa y Cuajimalpa de Morelos casi la mitad de sus viajes se quedaron dentro de la misma demarcación.

Sobre el motivo de realización de los viajes en cada una de las delegaciones, se identificó que, en Iztapalapa los viajes producidos con el propósito de regresar al hogar representaban el 38.9%, en tanto que los atraídos con el mismo propósito, el 51% del total.

En la delegación Cuauhtémoc, la cantidad de viajes producidos con el propósito de ir a trabajar representaba el 13.7%, en tanto que la cantidad de atraídos con el mismo propósito era del 45.5%, tal situación se daba debido a que ahí se concentraba el 16.3% del total de unidades económicas captadas por los Censos Económicos de 2004 llevados a cabo en el D. F.

En la delegación Gustavo A. Madero, del total de viajes producidos, la mayor parte correspondía al propósito de regresar al hogar con 46%, al contrario de los atraídos con el mismo propósito que significaban el 45%.

Por su parte, en Coyoacán del total de viajes producidos, el propósito de regresar al hogar reportó el 51.2% del total, en tanto que los atraídos el 35.5%. Respecto al propósito de ir al trabajo, los viajes producidos representaban el 21%, mientras los atraídos, el 24.6%. Con relación al propósito de ir a estudiar, los viajes producidos ascendían al 7% mientras que los atraídos significaban un 18% respecto al total de la delegación; esto tiene relación con el hecho que dentro de la demarcación se ubica la Universidad Nacional Autónoma de México.

En cuanto a los horarios de los viajes, en la Tabla 1.3 se puede verificar su distribución, el periodo matutino comprende los viajes que inician entre las 6:00 y las 8:59 horas, lapso durante el cual la mayoría de la población ocupada y en edad escolar se traslada a realizar sus actividades.

El periodo de medio día abarca los traslados que se inician entre las 13:00 y 15:59 horas, cuyo flujo se encuentra relacionado con la salida de un segmento de viajeros de sus respectivos centros educativos o la salida a comer.

El periodo vespertino concentra los viajes que inician entre las 17:00 y 19:59 horas y señala el retorno de la fuerza ocupacional a sus lugares de residencia o a lugares de esparcimiento.

En el horario matutino, la hora de máxima demanda se encontraba entre las 7:00 y 7:59 horas, periodo en el que se registraron casi 2.4 millones de viajes, es decir, 10.7% del total.

La hora de medio día de máxima demanda se presentó de las 14:00 a las 14:59 horas y, en el periodo vespertino de las 18:00 a las 18:59 horas; en términos absolutos conjuntan casi 3.2 millones de viajes.

En cuanto al tiempo invertido en realizar un desplazamiento de un punto a otro, éste presentó variaciones dependiendo del tipo de transporte, en general, el uso de transporte público para moverse dentro del D. F. registró tiempos por arriba de los tres cuartos de hora, en la Tabla 1.4, se muestra la duración de los traslados, dependiendo del origen y destino del viaje.

Respecto a los costos, en transporte público cuando el origen y destino involucraba distancias dentro de la misma área geográfica, en este caso, entre las distintas delegaciones del D.F., el costo promedio no rebasó los \$7.00 por viaje, pero aumentaba si el traslado se daba del D.F. a alguno de los municipios del Estado de México, con un costo promedio de \$11.00 por viaje (Tabla 1.5).

Tabla 1.3. Horarios de los viajes EOD 2007

PERIODO DE INICIO	VIAJES	PORCENTAJE
Total	21 954 157	100.0
En periodo matutino	5 892 929	26.8
En periodo de medio día	4 240 742	19.3
En periodo vespertino	3 788 311	17.3
En otro periodo	8 032 175	36.6

Fuente: (INEGI, 2007)

Tabla 1.4. Duración de los viajes EOD 2007

ÁREA GEOGRÁFICA		TIEMPO PROMEDIO POR MODO DE TRANSPORTE			
ORIGEN	DESTINO	PÚBLICO	PRIVADO	MIXTO	OTRO*
Distrito Federal	Distrito Federal	0:51	0:38	1:12	0:53
Distrito Federal	Estado de México	1:35	1:11	1:44	1:13
Estado de México	Distrito Federal	1:29	1:06	1:38	1:18

*Incluye autobuses foráneos, transporte escolar, transporte de personal, etc.

Fuente: (INEGI, 2007)

Tabla 1.5. Costos promedio de los viajes EOD 2007

ÁREA GEOGRÁFICA		COSTO PROMEDIO (PESOS)
ORIGEN	DESTINO	
Distrito Federal	Distrito Federal	6.94
Distrito Federal	Estado de México	10.98
Estado de México	Distrito Federal	10.81

Fuente: (INEGI, 2007)

Las características de los viajes que se realizan en la zona probablemente se han modificado a lo largo de los años, es por eso que se anunció que se llevará a cabo una nueva Encuesta Origen-Destino, con la finalidad de actualizar la información sobre los traslados que se realizan en la zona.

1.3. SITUACIÓN ACTUAL DEL TRANSPORTE PÚBLICO AUTOMOTOR DE PASAJEROS

El sistema de transporte en la Ciudad de México generalmente suele dividirse en transporte operado por el Estado y el concesionado, cada uno cuenta con características particulares, pero ambos brindan opciones a la población para realizar sus viajes [Secretaría de Movilidad (SEMOVI), 2016].

La Secretaría de Movilidad en la Ciudad de México “es la encargada de formular y conducir el desarrollo integral del transporte, controlar el autotransporte urbano, así como planear y operar las vialidades en el Distrito Federal” (SEMOVI, 2015).

Fue la misma SEMOVI, la encargada de elaborar el Programa Integral de Movilidad 2013-2018, un documento en el que se plasman las estrategias a seguir para transformar la manera en que las personas se mueven diariamente por la ciudad [Gobierno del Distrito Federal (GDF), 2014b].

Para la elaboración de dicho Programa, se analizaron los Programas Integrales de Transporte y Vialidad hechos en años anteriores, además:

“se procedió con la elaboración de un estudio denominado Diagnóstico y Proyecciones de la Movilidad del Distrito Federal 2013–2018 elaborado por el Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad de la Universidad Nacional Autónoma de México, el cual permitió conocer la situación actual e histórica de la movilidad en la capital” (GDF, 2014b).

En el Programa Integral de Movilidad 2013-2018 es posible encontrar información como la que se muestra en la Tabla 1.6 sobre la longitud de la red vial. Además, de acuerdo con información del Gobierno del Distrito Federal (2014b): “en la ciudad existen aproximadamente 121.26 km de ciclovías y 3.27 km de calles peatonales que cuentan con estándares de accesibilidad y seguridad”.

Tabla 1.6. Red vial de la Ciudad de México

TIPO DE VÍA	LONGITUD (KM)	%
Acceso controlado	186.74	1.80
Ejes viales	415.03	3.98
Otras vialidades primarias	514.67	4.95
Vialidades secundarias	9 287	89.27
TOTAL (km)	10 403.44	100.00

Fuente: (GDF, 2014b)

1.3.1. Transporte operado por el Estado

Los Sistemas de Transporte Público de Pasajeros que son operados por el Estado constituyen una alternativa de movilidad muy importante para los habitantes de la ciudad, dentro de este tipo se encuentra: el Sistema de Transporte Colectivo (Metro), el Servicio de Transportes Eléctricos (STE) y la Red de Transporte de Pasajeros (RTP) ahora Sistema de Movilidad 1 (M1), mismos que se explican a continuación.

1.3.1.1. Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC)

El Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC) fue inaugurado el 4 de septiembre de 1969, como respuesta a los problemas de transporte con los que ya se contaba en la Ciudad de México, principalmente en la zona centro, “donde se concentraba el 40 por ciento del total diario de los viajes realizados dentro de la ciudad” (STC, 2014a).

El Metro fue implantado por etapas, en la primera de ellas, de 1967 a 1972, se comenzó con la construcción de las líneas 1,2 y 3. Mientras en la segunda etapa (1977-1982), se hizo una ampliación de la línea 3 y se inició la construcción de las líneas 4 y 5 (STC, 2014a).

En la tercera etapa, de 1983 a 1985, se siguieron haciendo ampliaciones a las primeras tres líneas que se habían puesto en marcha y se comenzó la creación de las líneas 6 y 7, dando paso así a la cuarta etapa (1985-1987), donde se prolongaron las líneas 6 y 7, además del inicio de los trabajos para la construcción de la línea 9 (STC, 2014a).

La quinta etapa, de 1988 a 1994, se caracteriza por la expansión del Metro hacia el Estado de México con la línea A y la inauguración de un tramo de la línea 8; durante la sexta etapa (1994-1997) entra en funcionamiento la línea B (STC, 2014a) y, finalmente, la última línea en inaugurarse fue la 12, el 30 de octubre de 2012.

Resulta importante señalar que, en 1985 se elaboró un Plan Maestro del Metro, tenía un horizonte de 25 años, en él se planteaban los objetivos de ampliación de la red y se buscaba establecer un equilibrio entre oferta y demanda, con la finalidad de evitar altos niveles de saturación en el sistema.

Hubo varios puntos que no se cumplieron como lo establecía dicho Plan, por lo que en 1996 se dio a conocer un nuevo Plan Maestro del Metro y Trenes Ligeros, que incluía tres horizontes de expansión para el año 2003, 2009 y 2020.

De acuerdo con dicho Plan, en 2020 se debería contar con 17 líneas de metro y 10 de tren ligero, como se puede apreciar, aún se está lejos de esta cifra.

En la Figura 1.6 se muestra la red en funcionamiento hasta la fecha, en total se cuenta con 226 km de vías y 195 estaciones, de las cuales 115 son subterráneas, 54 superficiales y 26 elevadas (STC, 2013), las características de cada una de las líneas se pueden apreciar en la Tabla 1.7.

El STC cuenta con un parque vehicular de 390 trenes, 282 de ellos se tienen en operación, mientras los 108 restantes “se encuentran distribuidos en mantenimiento sistemático, mantenimiento mayor, rehabilitación, proyectos especiales o como reserva” (STC, 2014b).

En el año 2015, el STC registró una afluencia total de 1 623 828 642 pasajeros, que significa un aumento de 9 495 048 pasajeros en comparación con el año 2014 (STC, 2015a).

Tabla 1.7. Características de las líneas del Metro

LÍNEA	ORIGEN	DESTINO	No. ESTACIONES	ESTACIONES TRANSBORDO	LONGITUD (KM)
1	Observatorio	Pantitlán	20	7	18.828
2	Cuatro Caminos	Tasqueña	24	5	23.431
3	Indios Verdes	Universidad	21	6	23.609
4	Martín Carrera	Santa Anita	10	6	10.747
5	Pantitlán	Politécnico	13	5	15.675
6	El Rosario	Martín Carrera	11	4	13.947
7	El Rosario	Barranca del Muerto	14	3	18.784
8	Garibaldi	Const. de 1917	19	5	20.078
9	Tacubaya	Pantitlán	12	5	15.375
A	Pantitlán	La Paz	10	1	17.192
B	Ciudad Azteca	Buenavista	21	5	23.722
12	Mixcoac	Tláhuac	20	4	25.100
TOTAL					226.488

Fuente: (STC, 2013)



Figura 1.6. Red del Sistema de transporte Colectivo Metro
 Fuente: (STC, 2015b)

1.3.1.2. Servicio de Transportes Eléctricos del Distrito Federal (STE)

La historia de los transportes eléctricos en la Ciudad de México se remonta a 1900, cuando las líneas de tracción animal comenzaron a ser sustituidas por las líneas de tranvías con tracción eléctrica (Martínez y Méndez, 2014).

Posteriormente, en 1952 el Departamento del Distrito Federal adquirió los bienes de todas las compañías de tranvías, que pasaron a formar parte del patrimonio de un Organismo Público Descentralizado, el Servicio de Transportes Eléctricos (Martínez y Méndez, 2014). Su misión es brindar a los usuarios “una alternativa de transportación no contaminante, segura, confiable y oportuna, que satisfaga con eficiencia y de manera económica las necesidades de traslado” (STE, 2015).

Después de la creación de dicho organismo, se vio la necesidad de renovar y mejorar el servicio que se ofrecía, por lo que se decidió hacer la compra de nuevos tranvías y también introducir trolebuses (Martínez y Méndez, 2014).

Sin embargo, las líneas de tranvía poco a poco fueron desapareciendo, terminó convirtiéndose en un sistema de transporte “demasiado lento y con graves problemas, sobre todo cuando alguno se descomponía o había fallas en el suministro de energía, por las largas filas de tranvías que se formaban” (Aguirre y Galán, 2015).

Los tranvías dieron servicio en la ciudad hasta la década de los 80, pero se le considera el sistema precursor del tren ligero.

Actualmente, el tren ligero que opera al Sur de la Ciudad de México, en las delegaciones Coyoacán, Tlalpan y Xochimilco, cuenta con 16 estaciones y 2 terminales (Figura 1.7), y su flota vehicular asciende a 20 trenes dobles con capacidad máxima para 374 pasajeros (STE, 2015).

En cuanto a los trolebuses, cuando se pusieron en funcionamiento por primera vez, mostraron ciertas ventajas sobre los tranvías, por lo cual comenzaron a ganar terreno.

Entre los principales aspectos positivos del trolebús se encuentra su “mayor libertad de movimiento, ya que prescindía de las vías férreas; y sus neumáticos que lo hacían un vehículo silencioso, rápido y confiable” (Martínez y Méndez, 2014).

Los primeros trolebuses que se utilizaron en la Ciudad de México eran del modelo Westram, después se adquirieron unidades fabricadas en Italia, Estados Unidos y Canadá (Aguirre y Galán, 2015).

El trolebús hoy en día cuenta con 8 líneas, con una longitud total de operación de 203.64 kilómetros (Figura 1.8), hasta el año 2015 se contaba con 290 trolebuses operando a un intervalo de paso promedio de 4 minutos (STE, 2015). Sin embargo, actualmente se está buscando renovar la flota vehicular de este sistema de transporte, en la Figura 1.9 se muestra un prototipo de las nuevas unidades que se desea poner en funcionamiento, cada una de ellas tiene un costo de aproximadamente 350 mil dólares, los directivos del STE aún no detallan el número de vehículos que se van a adquirir (Hernández, 2017).



Figura 1.7. Línea del Tren Ligero en la Ciudad de México
 Fuente: (STE, 2015)

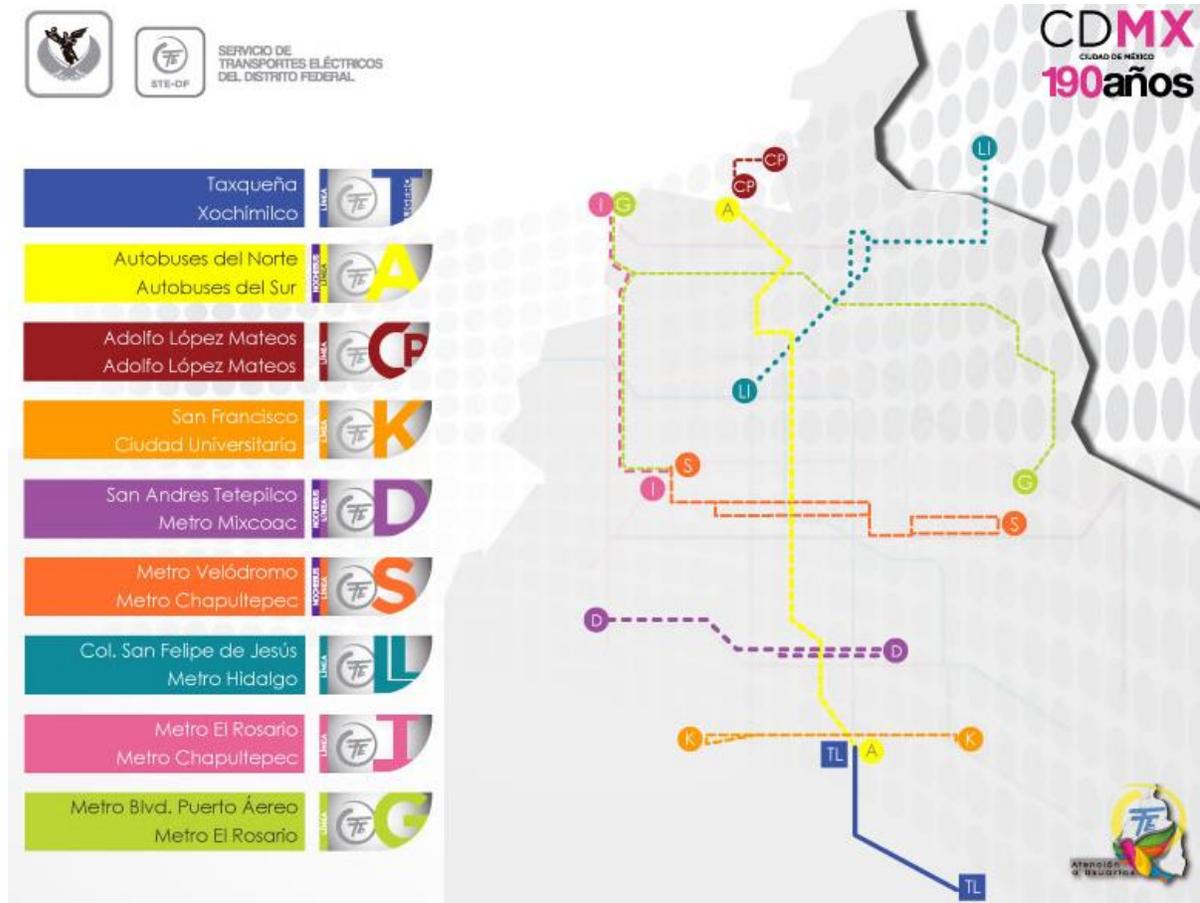


Figura 1.8. Líneas del Trolebús y Tren Ligero (en azul) en la Ciudad de México
Fuente: (STE, 2015)



Figura 1.9. Unidades de Trolebús en la Ciudad de México
Fuente: (Vladimir, 2016)

1.3.1.3. Sistema de Movilidad 1(MI)

En la Ciudad de México hasta el año 2016 estuvo en funcionamiento la Red de Transporte de Pasajeros (RTP), cuando cambió de nombre a Sistema de Movilidad 1 (M1) (RTP, 2016a).

Los antecedentes de la RTP se remontan a 1981, cuando se revocaron las concesiones individuales que se habían otorgado para la prestación de los servicios de transporte urbano de pasajeros en autobuses y, se creó un organismo descentralizado de nombre Autotransportes Urbanos de Pasajeros Ruta 100, con la finalidad de brindar el servicio que antes tenían a su cargo los operadores privados (SEMOVI, 2016).

Sin embargo, la Ruta 100 presentó una lucha gremial interna que desencadenó que en 1989 se suspendieran sus actividades, alrededor de 1995 se declaró en quiebra y el proceso concluyó en 1997.

Cuando esto sucedió, el Consejo de Incautación de Ruta 100 fue el encargado de administrar los bienes del desaparecido organismo y brindar el servicio de transporte que se requería, todo esto se dio hasta el año 2000, cuando se creó la Red de Transporte de Pasajeros del D.F.

La RTP comenzó a operar formalmente el día 1° de marzo del año 2000, con “2 600 trabajadores, 860 autobuses distribuidos en 75 rutas, 7 módulos operativos y 3 talleres especializados” (RTP, 2016a).

La Administración Pública del Distrito Federal buscaba que la RTP brindara un servicio de transporte público que permitiera atender a las zonas periféricas de la ciudad (RTP, 2016a).

Es así que, el principal objetivo de la RTP era permitir la conexión de la población de estas zonas con otros servicios de transporte público, como el Metro y las diferentes rutas del Servicio de Transportes Eléctricos (RTP, 2016a).

Sin embargo, en junio de 2016, fue publicado un decreto en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México, en donde se estableció que la RTP pasaría a ser el Sistema de Movilidad 1 (M1), cumpliendo el mismo objetivo, pero buscando brindar un servicio más accesible, sustentable e innovador (GDF, 2016).

Los autobuses de la RTP ofrecían diferentes tipos de servicio que se asegura seguirán sin cambios aún con la modificación a Sistema M1, éstos son: Servicio Atenea, Servicio Ordinario, Circuito Bicentenario, Ecobús, Servicio Expreso y Transporte Escolar.

El servicio ordinario está compuesto por 91 rutas y en la Figura 1.10 se muestra una de ellas, por su parte el servicio Atenea, va enfocado al uso exclusivo de mujeres, fue puesto en marcha el 14 de enero de 2008 con 50 rutas, que recorren aproximadamente 10 805 km por día, además según la RTP (2016a), el promedio de pasajeras diariamente es de 41 591 mujeres.

También se cuenta con el servicio Nochebús que tiene seis rutas, mismas que operan de las 00:00 a las 05:00 horas, los siete días de la semana, durante todo el año (RTP, 2016a). Su finalidad es proporcionar viajes seguros y económicos para atender las necesidades de transporte que tienen los ciudadanos que realizan actividades por la noche en la Ciudad de México.

Por su parte, el servicio expreso (Figura 1.11) busca disminuir tiempos de traslado, ya que cuenta con “paradas exclusivas colocadas estratégicamente a lo largo de las rutas con el objetivo de permanecer el menor tiempo posible a bordo de la unidad y a su vez atender los puntos de mayor interés” (RTP, 2016a).

Dentro del sistema de rutas expreso se tiene el servicio Ecobús que cuenta con unidades “equipadas con un localizador satelital para conocer su ubicación exacta, con un botón de alerta para cualquier contingencia y con radiocomunicación directa entre el operador y el Centro de Control del Servicio” (RTP, 2016a).

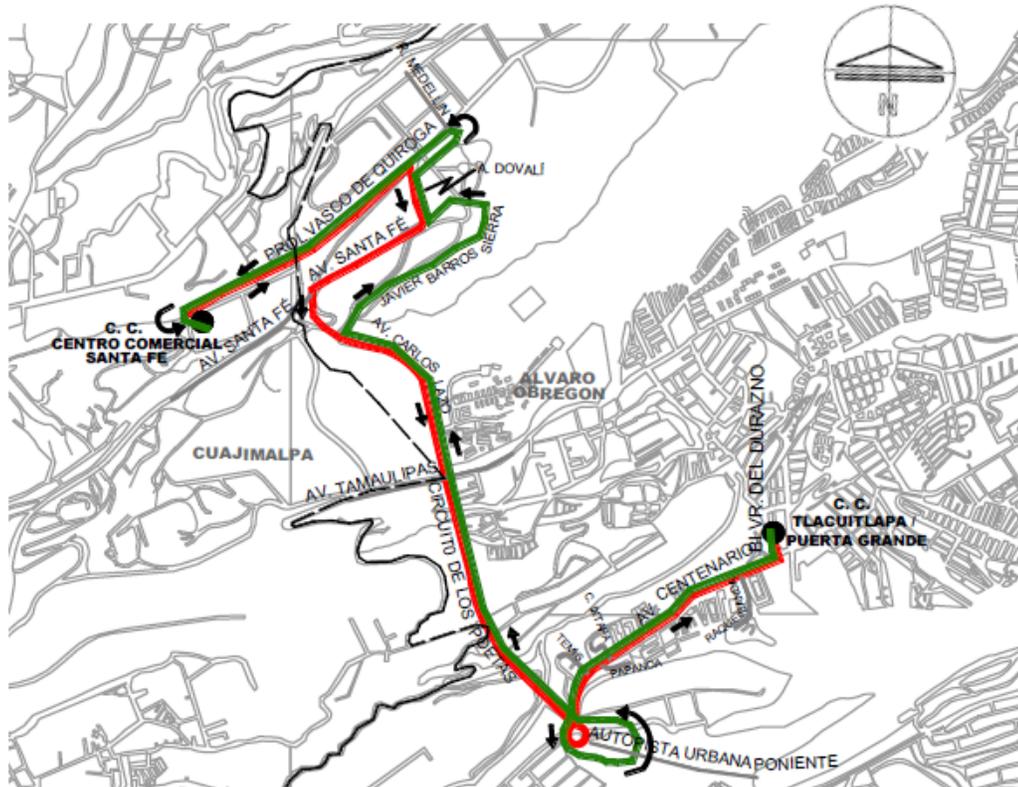


Figura 1.10. Ejemplo de ruta del servicio ordinario RTP
Fuente: (RTP, 2016a)

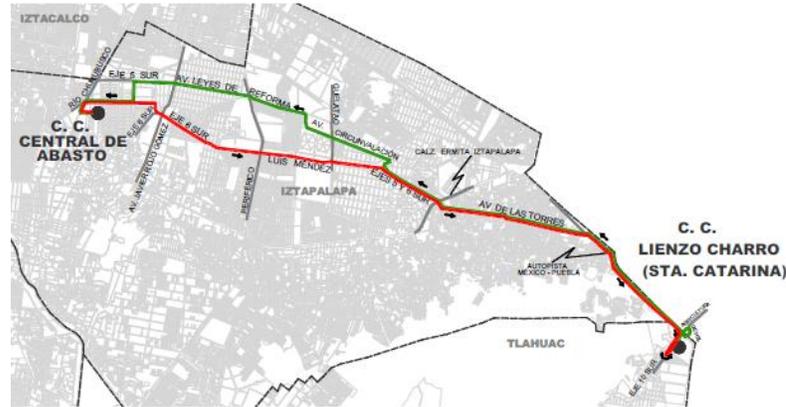


Figura 1.11. Ejemplo de ruta del servicio expreso RTP
Fuente: (RTP, 2016a)

Hasta el año 2016, la RTP contaba con aproximadamente 4 000 empleados, entre “personal administrativo de confianza adscrito a los módulos y oficinas centrales; operadores, obreros y técnicos dedicados exclusivamente al mantenimiento de las unidades” (INEGI, 2017).

Según RTP (2016b), el ahora Sistema M1 se queda a cargo de las 1 357 unidades, 105 de ellas destinadas a transporte escolar, 925 a las rutas de servicio ordinario (100 de ellas corresponden al servicio Atenea), 185 para servicio expreso y 72 para Ecobús.

1.3.2. Transporte Concesionado

Los sistemas de transporte público de pasajeros concesionados están compuestos por autobuses, microbuses, taxis y el Metrobús.

Después de la desaparición de Autotransportes Urbanos de Pasajeros Ruta 100, en 1997 “se publicó la declaratoria de necesidad para la expedición de 3 640 concesiones a organizaciones para operar las rutas de transporte público de pasajeros en las modalidades individual y colectiva” (DOF, 1997).

Actualmente, la SEMOVI es la encargada de otorgar las concesiones relacionadas con los servicios de transporte de pasajeros y de carga, también brinda permisos temporales para la prestación del servicio de transporte público, y está capacitada para cancelar o suspender las concesiones (GDF, 2014a).

Según la Ley de Movilidad del Distrito Federal, GDF (2014a), las concesiones se otorgan a través de una licitación pública, una invitación restringida, por adjudicación directa o por resolución de la autoridad competente. La concesión puede tener una duración de hasta 20 años, pero puede ser prorrogada.

1.3.2.1. Microbuses

Entre 1916 y 1918, se incorporaron al sistema de transporte público de pasajeros algunos camiones que cubrían ciertas rutas que tenían los tranvías, debido a que dichas unidades no daban servicio por causa de conflictos obrero-patronales que habían desencadenado una huelga (SEMOVI, 2016).

Posteriormente, estos camiones incrementaron su capacidad y se introdujeron más unidades, “hasta entonces la explotación del servicio se había hecho de forma individual” (SEMOVI, 2016). Pero durante el periodo presidencial de Lázaro Cárdenas, se “estableció la primer estructura de organización bajo la figura de sociedades cooperativas de autotransporte” (SEMOVI, 2016).

Fue en diciembre de 1959, cuando surge la Unión de Permisarios de Transporte de Pasajeros en Camiones y Autobuses en el D.F., “institución pública de capital privado y con patrimonio propio que agrupó a los dueños de autobuses que contaban con 7 500 permisos” (SEMOVI, 2016).

En 1976, ya con el Sistema de Transporte Colectivo Metro en funcionamiento, se desarrolló el Plan Maestro del Metro, el Plan de Vialidad y el Sistema de Transporte de Superficie, en donde se estableció que las rutas de autobuses con las que se contaba hasta ese momento debían ser modificadas para “estructurarlas en un sistema integral de transporte de superficie, en una red de rutas directas ortogonales” (SEMOVI, 2016).

Pero es en 1981, cuando las autoridades del D.F. consideraron que “era necesario integrar un sistema de transporte urbano por lo que se tomó la decisión de revocar las concesiones a los particulares” (SEMOVI, 2016). De esta manera, quedaría a cargo del Gobierno de la Ciudad, la prestación de este servicio, lo que dio origen a la creación del organismo denominado Autotransportes Urbanos de Pasajeros Ruta 100 (SEMOVI, 2016).

Sin embargo, fue precisamente después de la quiebra de Ruta 100, cuando se dio paso al auge de la expansión de autobuses y microbuses (CDHDF e ITDP, 2013).

Los microbuses operan actualmente a través de concesiones bajo el esquema “hombre-camión”, se otorgaron en forma individual a personas físicas organizadas en asociaciones o sociedades civiles, a las cuales les fueron dadas las autorizaciones para la explotación de las rutas e infraestructura asociada al servicio (GDF, 2013).

De acuerdo con la información presentada en el Programa Integral de Transporte y Vialidad 2001-2006, en la Tabla 1.8 se muestran algunos datos sobre autobuses y microbuses concesionados.

Como se puede apreciar, no se sabe con exactitud la extensión de las rutas cubiertas por microbuses y los datos no se encuentran actualizados, ya que la SEMOVI no cuenta con información más reciente.

La SEMOVI ha lanzado algunos programas con el objetivo de apoyar a los concesionarios para que renueven sus vehículos; mejoren la calidad de su servicio; eleven sus ingresos al reducir los costos ocasionados por el deterioro de algunas unidades; aseguren la vigencia de su concesión al cumplir las normas para la prestación del servicio y se garantice la seguridad y la comodidad del conductor, pero sobre todo de sus pasajeros (SEMOVI, 2015).

Pero en el caso de la sustitución de microbuses, el Gobierno del Distrito Federal es el encargado de otorgar a los concesionarios cierto apoyo financiero. Generalmente estos programas van destinados a aquellos cuyos microbuses son modelo 1995 o anteriores (SEMOVI, 2015).

Pero también se cuenta con algunos corredores concesionados de transporte público, se trata de una alternativa que busca la transformación de las concesiones bajo el esquema hombre-camión a empresas de transporte con capacidad de renovar su flota y establecer procesos de servicio eficientes (Movilidad de Vanguardia, 2017).

De acuerdo con Valdéz (2017), el principal beneficio de contar con estos corredores es la transformación del modelo de prestación de servicios de transporte público de pasajeros, estructurar empresas sostenibles, sustituir unidades que ya no se encuentran en buen estado y contar con un servicio más ordenado, entre otros.

Solo por mencionar algunos ejemplos, se cuenta con el Corredor Reforma Bicentenario, Corredor Revolución y Corredor Periférico.

Tabla 1.8. Transporte concesionado

DESCRIPCIÓN	TOTAL
Empresas concesionarias de autobuses	9
Parque vehicular Autobuses	1 197 unidades
Total de rutas cubiertas por autobuses	97
Extensión de las rutas cubiertas por autobuses	3 000 kilómetros
Pasajeros transportados/día en autobuses	1.2 millones
Parque vehicular Microbuses	27 928 unidades
Total de rutas cubiertas por microbuses	106
Extensión de las rutas cubiertas por microbuses	-----
Pasajeros transportados/día en microbuses	18 millones

Fuente: (GDF, 2002)

1.3.2.2. Taxis

El 11 de agosto de 1999 se creó el Instituto del Taxi del Distrito Federal, cuyo principal objetivo era promover el desarrollo y mejoramiento del servicio individual de pasajeros (López, 2009).

Sin embargo, durante el año 2000, la Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal recibió quejas referentes a los procedimientos administrativos del Instituto, por ejemplo, se denunciaba la retención de placas, negativa a la reposición de concesiones legalmente reconocidas y varias anomalías más que afectaban a los concesionarios de este servicio. En mayo de 2002, como consecuencia de estos actos de corrupción, el Instituto del Taxi del Distrito Federal desapareció (López, 2009).

Sin embargo, hoy en día no se cuenta con una cifra exacta del número de taxis en circulación en la Ciudad de México, sería importante contar con este dato, debido a que según la Encuesta Origen Destino 2007 (INEGI, 2007), en ese entonces se realizaban más de 1 300 000 viajes diariamente en taxis.

En el portal de la SEMOVI, solamente se presenta información sobre los trámites y servicios que deben realizar y un listado de las bases de taxis en las diferentes delegaciones de la Ciudad de México.

Por otra parte, también se cuenta con servicios de este tipo que funcionan mediante aplicaciones que se descargan en teléfonos celulares, algunos ejemplos son: Uber, Easy Taxi y Cabify.

Uber inició operaciones en México en agosto de 2013, está disponible las 24 horas del día los siete días de la semana, su modelo se basa en conectar a personas que requieren un servicio de transporte con conductores que puedan ofrecerlo, denominados socios Uber, como se mencionó anteriormente todo esto se da a través de una aplicación que se puede utilizar en cualquier teléfono inteligente (Lucas y Pineda, 2016).

Para solicitar un servicio para realizar un viaje, se envía una notificación a los socios que se encuentran cerca y cuando uno de ellos acepta el pedido, la aplicación muestra al usuario el tiempo estimado que le tomará al socio llegar hasta su ubicación exacta, así como el nombre, tipo de vehículo y número de matrícula del conductor (Uber, 2016).

Cuando el usuario llega a su destino, la tarifa se calcula y se cobra automáticamente a la tarjeta bancaria asociada a la cuenta Uber (Uber, 2016).

Easy Taxi por su parte, es una aplicación que fue lanzada al mercado en 2012 y que “actualmente tiene presencia en 30 países y 420 ciudades alrededor del mundo” (Easy Taxi, 2016).

Para poder hacer uso de este servicio, de igual manera se debe descargar su aplicación en un teléfono celular y hacer el registro correspondiente, la aplicación ubicará automáticamente mediante GPS la dirección del cliente, una vez que se seleccione la forma en la que realizará su pago, el servicio queda solicitado formalmente y se le envía el taxi que se encuentre más cerca de su ubicación (Easy Taxi, 2016).

Y finalmente Cabify cuenta con su propia aplicación, misma que ubica al cliente, el cual puede pedir el servicio con anticipación o en el momento en que lo requiera, desde el inicio del viaje se les hace saber a los usuarios el costo que tendrá su traslado y los pagos se hacen mediante tarjetas bancarias sin recibir dinero en efectivo (Cabify, 2016).

Sin embargo, este tipo de servicios se ha enfrentado a diversos problemas en la Ciudad de México, debido a enfrentamientos con otros taxistas, quienes aseguran que se trata de una competencia desleal y que deberían ser regulados por algún organismo.

Debido a esto, la SEMOVI elaboró en julio de 2015 un acuerdo “mediante el cual crea un registro de las empresas que operan aplicaciones o plataformas digitales para brindar un servicio similar al del taxi” (Suárez, 2016).

Además, los choferes y sus unidades deberán de realizar una validación vehicular y documental cada año en la Ciudad de México, los vehículos tienen que contar con calcomanía cero, no ser subarrendados, no podrán hacer base o sitio y los conductores no podrán recibir pagos en efectivo, entre otros requisitos (Garrido, 2015).

Finalmente, se especificó que las empresas que operen bajo este esquema de aplicaciones digitales deben aportar el 1.5% del costo de cada viaje para la creación de un Fondo para el Taxi, la movilidad y el peatón, mismo que aún está por crearse (Forbes, 2015).

Sin embargo, las empresas han decidido trasladar este impuesto a los usuarios, es decir, la empresa como tal no paga el 1.5% del monto, en los recibos de viaje se aprecia un cargo de contribución gubernamental, donde se cobra a los pasajeros el porcentaje que se destinada a dicho Fondo.

1.3.2.3. Metrobús

El Metrobús pertenece a un modo de transporte conocido como BRT (Bus Rapid Transit), este tipo de sistemas se utilizaron por primera vez en Curitiba, Brasil y después se implantaron en diversas ciudades, pero uno de los ejemplos más representativos es el sistema TransMilenio en Bogotá, Colombia.

La Ciudad de México no se quedó atrás y a pesar de que, según el Plan Maestro del Metro, se debía construir la línea 10 de la red sobre la Avenida Insurgentes, este proyecto no se llevó a cabo, ya que se consideró que requería de “infraestructura muy costosa e implicaría grandes afectaciones” (Metrobús, 2016b), fue por eso que se optó por utilizar en su lugar, un sistema BRT.

El 31 de mayo de 2002, “el EMBARQ – The World Resources Institute Center for Sustainable Transport, firmó un acuerdo con el gobierno de la Ciudad de México para formalizar un compromiso de cooperación” (Saldívar, 2009), mismo que serviría para aplicar el Programa para el Transporte Sustentable en la Ciudad de México.

Fue en septiembre del mismo año, que directivos del Centro de Transporte Sustentable de la Ciudad de México, informan que se planea la construcción de un sistema tipo BRT en esta zona y que, para llevarlo a cabo se contaría con recursos del Banco Mundial (Saldívar, 2009).

Finalmente, un año después, en septiembre de 2003, “con asesoría del Centro de Transporte Sustentable de la Ciudad de México, se comenzó a diseñar el proyecto ejecutivo para los corredores de autobuses rápidos” (Saldívar, 2009).

Y en diciembre de 2004, se comenzaron las obras de construcción de lo que hoy es la línea 1 del Metrobús.

El sistema Metrobús, cuenta con infraestructura preferente, está conformado por empresas que brindan el servicio de transporte y empresas de recaudo, así como un organismo público descentralizado (Metrobús), encargado de administrar, planear y controlar el sistema de corredores de transporte (Metrobús, 2015).

Cabe señalar que las empresas transportistas se encargan de comprar, operar y dar mantenimiento a los autobuses, mientras las empresas de recaudo mantienen funcionando correctamente las máquinas expendedoras de tarjetas, torniquetes, validadores, cámaras de vigilancia y sistemas electrónicos (Metrobús, 2015).

El Metrobús inició formalmente operaciones el día 19 de junio de 2005, en el tramo Indios Verdes-Doctor Gálvez, con una flota de 80 unidades articuladas (Metrobús, 2015).

Actualmente cuenta con 6 líneas (Figura 1.12), la línea 1 tiene una longitud de 30 km, las vialidades que recorre son Insurgentes Norte, Centro y Sur, atendiendo a las delegaciones Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Álvaro Obregón, Coyoacán y Tlalpan (Metrobús, 2016a).

La línea 2 tiene una longitud de 20 km, recorriendo las vialidades de Eje 4 Sur y Prolongación Plutarco Elías Calles, atiende a las delegaciones Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Iztacalco e Iztapalapa (Metrobús, 2016a).

La línea 3 tiene 17 km de longitud, recorre Eje 1 Poniente, Puente de Alvarado, Balderas y Avenida Chapultepec- Dr. Río de la Loza, atendiendo a las delegaciones Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Benito Juárez y Tlalnepantla en el Estado de México (Metrobús, 2016a).

La línea 4 cuenta con 28 km, recorriendo Puente de Alvarado, República de Venezuela, Héroe de Nacozari, Gral. Miguel Alemán, Eje 3 Oriente, Fuerza Aérea Mexicana y Circuito Interno del Aeropuerto, brindando atención a las delegaciones Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo (Metrobús, 2016a).

Por su parte, la línea 5 cuenta con 10 km de recorrido, pasa por Eje 3 Oriente, atendiendo a las delegaciones Venustiano Carranza, Gustavo A. Madero y el municipio de Ecatepec (Metrobús, 2016a).

Finalmente, la línea 6 tiene 20 km de longitud y comenzó a funcionar el 21 de enero de 2016, buscando atender a las delegaciones Azcapotzalco y Gustavo A. Madero, así como a los municipios de Ecatepec, Nezahualcóyotl y Tlalnepantla del Estado de México (Metrobús, 2016a).

Actualmente se encuentra en construcción la línea 7 de este sistema, irá de Indios Verdes a La Fuente de Petróleos y, desde ese punto se contará con un servicio complementario que llegará hasta Santa Fe, “correrá por Paseo de la Reforma y estará conformada por 32 paradas fijas” (Metrobús, 2017).

Además, en junio de 2013 inició operaciones el Centro Informativo de Transporte Inteligente (CITI) del Metrobús, cuyo propósito es mejorar la gestión del servicio, además de reducir los tiempos de espera y brindar un transporte más seguro (Metrobús, 2014). CITI “es un centro de control dotado con un sistema inteligente de transporte para coadyuvar a la mejor administración y control de la operación de los autobuses” (Metrobús, 2014). Cada autobús, además de pantallas que presentan información sobre el servicio, tiene cámaras de videovigilancia, botón de emergencia, consola del conductor para la regulación del servicio y una computadora a bordo que aloja un GPS (Metrobús, 2014), en la Figura 1.13 se muestran los dispositivos con los que se equipa una unidad. En la Figura 1.14 se presentan ejemplos de las pantallas utilizadas en las estaciones y unidades de Metrobús.

Sin embargo, cabe señalar que a pesar de que en varias estaciones ya se cuenta con las pantallas y los equipos necesarios para la publicación de la información en tiempo real, éstos se encuentran apagados en algunas ocasiones, además dentro de las unidades, la información que se presenta en las pantallas no es la relacionada a las rutas del sistema, se despliegan noticias nacionales e internacionales, pero sí se escucha un audio que indica el nombre de la siguiente estación a la que se arribará.

Por otra parte, para ingresar al sistema se requiere una tarjeta, misma que puede ser adquirida o recargada en las diferentes estaciones de Metrobús, sin embargo, el proceso no es tan sencillo, las máquinas no siempre funcionan correctamente, lo que genera que se formen largas filas de usuarios esperando para utilizarlas.

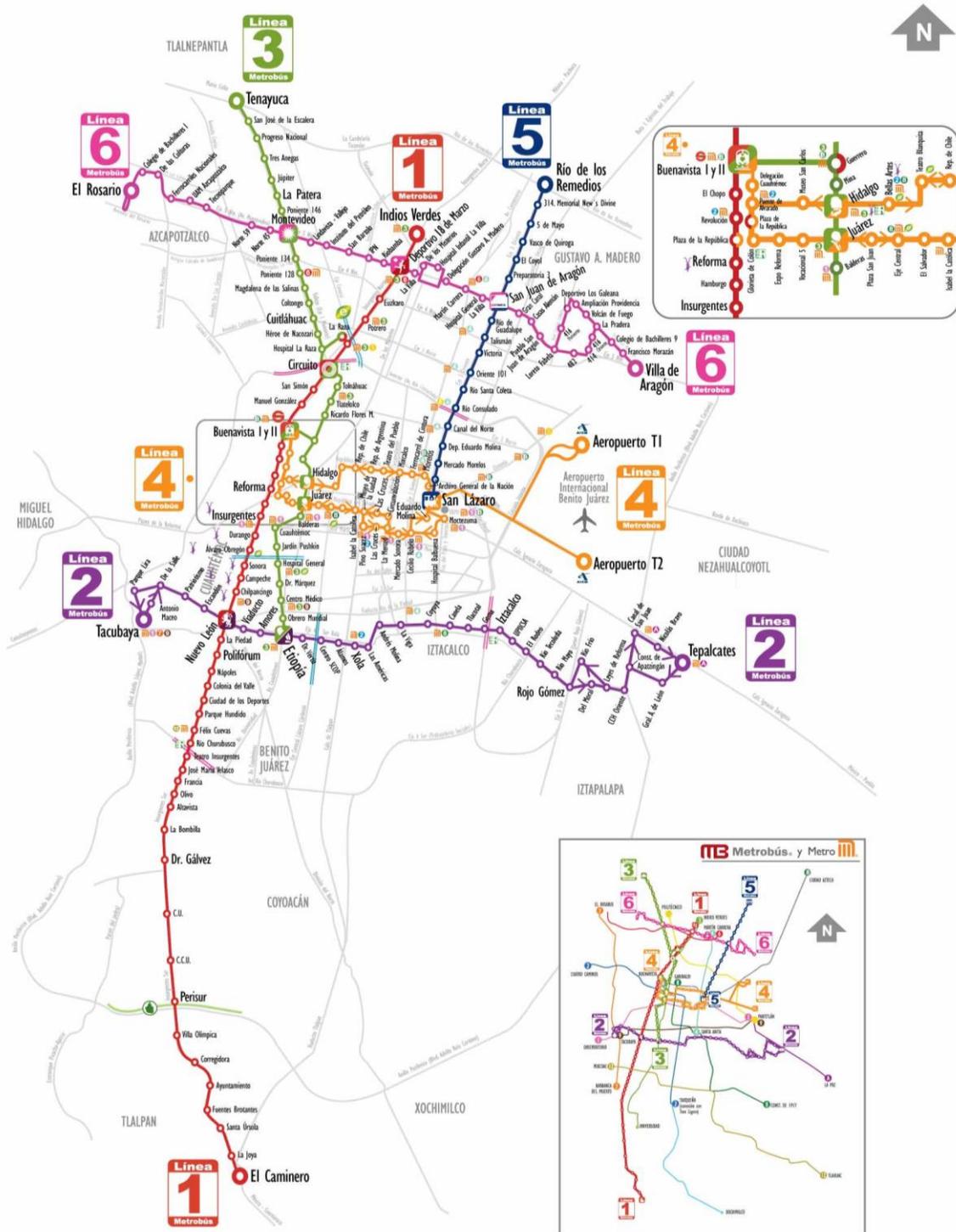


Figura 1.12. Red del Metrobús
Fuente: (Metrobús, 2016a)



Figura 1.13. Red del Metrobús
Fuente: (Propia)



Figura 1.14. Equipos instalados en estaciones Metrobús
Fuente: (Propia)

1.3.3. Centros de Transferencia Modal (CETRAM)

Un Centro de Transferencia Modal es un espacio donde concurren diversos modos de transporte de pasajeros y busca permitir a los usuarios del sistema integrado del transporte público, una intermodalidad accesible, incluyente, eficiente, segura, que facilite su movilidad urbana y metropolitana (Centros de Transferencia Modal, 2016).

Existen 45 centros de Transferencia Modal (CETRAM), que “abarcan aproximadamente 80 hectáreas, en las que hay 32 km de bahías, cobertizos, zonas comerciales y de servicios. Proporcionan servicio a 4 millones de usuarios al día y a 23 mil unidades de transporte público” (SEMOVI, 2015).

Los Centros de Transferencia Modal surgieron en 1969, como servicio complementario a las terminales del metro. Desde ese año y hasta 1993 fueron administrados por el STC, después pasaron a manos de las delegaciones políticas, y posteriormente, su administración y control fue transferido a la entonces Coordinación General de Transporte (GDF, 2011).

En el año de 1995, la institución encargada de los CETRAM fue la Secretaría de Transportes y Vialidad (SETRAVI). En ese contexto se otorgaron concesiones y se emitió la Ley de Transporte. Los primeros paraderos a los que se concedió un espacio y mobiliario fueron: Chapultepec, Puerto Aéreo, Zaragoza y San Lázaro (GDF, 2011).

Hoy en día estas instalaciones presentan graves problemas de deterioro, tanto en la instalación en sí misma como en su entorno, debido principalmente al comercio ambulante, la insuficiente infraestructura, la inseguridad y el poco o nulo mantenimiento que se les da (GDF, 2011).

A pesar de la importancia de los CETRAM, varios de ellos se encuentran desatendidos, se tiene una lista de 45 centros, pero varios requieren mantenimiento y conviene replantear la organización de los mismos, así como buscar su máximo aprovechamiento y desarrollo, darles la importancia como integradores y distribuidores de flujos de pasajeros y plantear estrategias que los integren en la ciudad (Camacho, 2014).

En la Tabla 1.9 se muestran las principales características de los cinco Centros de Transferencia Modal con mayor afluencia en la Ciudad de México, se presenta la superficie total con la que cuentan, el número de pasajeros diarios que transitan por el CETRAM, el número de rutas de microbuses que manejan, así como su conexión con las líneas de Metro.

Tabla 1.9. Centros de Transferencia Modal con mayor afluencia

NOMBRE	SUPERFICIE (m²)	AFLUENCIA (pasajeros diarios)	NÚMERO DE RUTAS	LÍNEAS STC	PARQUE VEHICULAR (unidades)
Pantitlán	88 949	1 100 000	29	1 (Pantitlán-Observatorio), 5 (Politécnico-Pantitlán), 9 (Pantitlán-Tacubaya), A (Pantitlán-La Paz)	2 632
Indios Verdes	64 714	950 000	52	3 (Indios Verdes-Universidad)	3 363
Taxqueña	38 006	750 000	18	2 (Taxqueña-Cuatro Caminos)	1 047
Chapultepec	30 233	500 000	4	1 (Pantitlán-Observatorio)	1 013
El Rosario	41 699	220 000	32	6 (El Rosario-Martín Carrera), 7 (El Rosario-Barranca del Muerto)	1 719

Fuente: (Elaboración propia con datos Camacho, 2014)

1.3.4. Comparación entre los sistemas de transporte público de pasajeros

Resulta interesante hacer un análisis del funcionamiento de los principales sistemas de transporte con los que se cuenta en el área de estudio, para identificar algunos indicadores, así como establecer una relación entre la demanda y la capacidad de cada uno de ellos.

En la Tabla 1.10 se muestra una comparación del total de pasajeros transportados que se registraron en el Metro, Trolebús, Tren Ligero, Metrobús y RTP durante el año 2015, esto debido a que aún no está disponible la información completa del año 2016, en algunos casos solamente se encuentran datos del primer trimestre de dicho año, lo que dificultaría hacer un adecuado análisis.

Como se puede ver, el STC en su portal web presenta información desglosada para cada una de sus líneas, sin embargo, encontrar este nivel de detalle para los demás sistemas es mucho más difícil.

Aunque en este caso solamente interesa la información referente a la Ciudad de México, en los datos señalados del Metro, se incluyen los pasajeros transportados de las estaciones que se encuentran también en el Estado de México, como es el caso de la estación Cuatro Caminos de la Línea 2 ubicada en el municipio de Naucalpan de Juárez, las estaciones Los Reyes y La Paz de la Línea A, Ciudad Azteca, Plaza Aragón, Olímpica, Ecatepec y Múzquiz de la Línea B en el municipio de Ecatepec y las estaciones Río de los Remedios, Impulsora y Nezahualcóyotl en el municipio de Nezahualcóyotl.

En el caso del Metrobús, para el total de pasajeros transportados en 2015, solamente se incluyen las primera cinco líneas, ya que la Línea 6, como se mencionó anteriormente comenzó a operar hasta enero de 2016 y la Línea 7 está en construcción.

Finalmente, la RTP muestra información del servicio Atenea por separado, pero la cantidad de pasajeros transportados por todos los demás servicios que brindan se encuentra agrupada, impidiendo hacer un desglose más detallado que permita identificar aquellos servicios más utilizados por la población.

Como se puede ver, el Metro es el modo de transporte que más usuarios traslada en la Ciudad de México, seguido del Metrobús, y resulta interesante encontrar que en tercer lugar se encuentra la Red de Transporte Público de Pasajeros, dejando atrás al Trolebús y Tren Ligero.

Además, en la Tabla 1.11, se presenta la longitud de operación de los mismos servicios de transporte público de pasajeros, la información en este aspecto se puede encontrar más detallada para cada uno de los diferentes sistemas.

Sin embargo, en el caso de la RTP no se presentan muchos datos al respecto, cabe señalar que este servicio no cuenta con infraestructura propia, es decir, las unidades circulan por la red vial al igual que los demás vehículos particulares, la longitud señalada en dicha tabla es la presentada por el Programa Integral de Transporte y Vialidad 2001-2006, ya que no se encontraron datos confiables más recientes.

Finalmente, en la Tabla 1.12 se muestra un resumen de las principales características de los sistemas de transporte público de la Ciudad de México, de esta manera es posible identificar con mayor claridad la situación en la que se encuentran, por ejemplo, si se observa la cantidad de pasajeros transportados durante el año 2015, el Metro aparece como el servicio que mayor cantidad de personas traslada, pero se debe recordar que es un sistema de transporte masivo y los trenes por sus dimensiones cuentan con mayor capacidad que las unidades de los demás sistemas como se puede apreciar en la misma tabla.

Es por eso que, aunque los valores que arroja la RTP son más pequeños, si se toman en cuenta otros factores, se puede determinar que existe sobrecupo en sus unidades en las diferentes rutas de los servicios que brinda, además es el sistema de mayor cobertura, brindando servicio en todas las delegaciones de la Ciudad de México.

Y, en cuanto a la flota vehicular de cada sistema, en la tabla solo se especifica el total general, pero cabe señalar que cuentan con diferentes tipos de unidades, en las cuales varía la capacidad y en algunos casos, el combustible que utilizan.

Tabla 1.10. Comparación afluencia por modo de transporte

METRO PASAJEROS 2015	TROLEBUS PASAJEROS 2015	TREN LIGERO PASAJEROS 2015	METROBÚS PASAJEROS 2015	RTP PASAJEROS 2015
LÍNEA 1 267 604 987	LÍNEA A -----	-----	LÍNEA 1 133 400 000	SERVICIO ATENEA 10 789 082
LÍNEA 2 286 952 605	LÍNEA CP -----		LÍNEA 2 53 800 000	
LÍNEA 3 234 744 867	LÍNEA D -----		LÍNEA 3 45 800 000	TODOS LOS OTROS SERVICIOS 71 083 876
LÍNEA 4 30 915 253	LÍNEA G -----		LÍNEA 4 20 500 000	
LÍNEA 5 85 067 083	LÍNEA I -----		LÍNEA 5 22 800 000	
LÍNEA 6 51 931 516	LÍNEA K -----			
LÍNEA 7 100 381 077	LÍNEA LL -----			
LÍNEA 8 138 985 549	LÍNEA S -----			
LÍNEA 9 119 071 205				
LÍNEA A 93 928 634				
LÍNEA B 160 309 766				
LÍNEA 12 53 936 100				
TOTAL 1 623 828 642	TOTAL 71 451 000		TOTAL 32 540 000	TOTAL 276 300 000

Fuente: (Elaboración propia con datos INEGI y STC, 2015a y STE y Metrobús, 2015)

Tabla 1.11. Comparación de longitud por modo de transporte

METRO	TROLEBUS	TREN LIGERO	METROBÚS	RTP
LÍNEA 1 18.83 km	LÍNEA A 36.60 km	LÍNEA 1 13.04 km de doble vía	LÍNEA 1 30.00 km	LONGITUD DE TODAS LAS RUTAS 3 098.60 km
LÍNEA 2 23.43 km	LÍNEA CP 11.00 km		LÍNEA 2 20.00 km	
LÍNEA 3 23.61 km	LÍNEA D 12.30 km		LÍNEA 3 17.00 km	
LÍNEA 4 10.75 km	LÍNEA G 44.90 km		LÍNEA 4 28.00 km	
LÍNEA 5 15.68 km	LÍNEA I 30.20 km		LÍNEA 5 10.00 km	
LÍNEA 6 13.95 km	LÍNEA K 17.80 km			
LÍNEA 7 18.78 km	LÍNEA LL 26.14 km			
LÍNEA 8 20.08 km	LÍNEA S 18.00 km			
LÍNEA 9 15.38 km				
LÍNEA A 17.19 km				
LÍNEA B 23.72 km				
LÍNEA 12 25.10 km				
TOTAL 226.49 km	TOTAL 196.94 km	TOTAL 13.04 km	TOTAL 105.00 km	TOTAL 3 098.60 km

Fuente: (Elaboración propia con datos INEGI y STC, 2015a y STE y Metrobús, 2015)

Tabla 1.12. Principales características de los sistemas de transporte público en la CDMX

CONCEPTO	STC (METRO)	RTP (Sistema M1)	METROBUS	TRANSPORTES ELÉCTRICOS	
				TROLE- BÚS	TREN LIGERO
Longitud (km)	226.49	3 098.60* (94 rutas)	105.00	196.94	13.04
Pasajeros transportados/ año (2015)	1 623 828 642	81 872 958	276 300 000	71 451 000	32 540 000
Pasajeros transportados 2015/km	7 169 538	No aplica*	2 631 429	362 806	2 495 399
Capacidad de sus vehículos (Número de pasajeros)	1 530–1 020	90	160 (articulados) 240 (biarticulados)	100	374
Flota vehicular (Número de vehículos)	390	1360	557	290	20
Cobertura (Delegaciones)	A. Obregón Azcapotzalco B. Juárez Coyoacán Cuauhtémoc G. A. Madero Iztacalco Iztapalapa Miguel Hidalgo Tláhuac V. Carranza	Todas las delegaciones de la Ciudad de México	A. Obregón Azcapotzalco B. Juárez Coyoacán Cuauhtémoc Madero Iztacalco Iztapalapa Miguel Hidalgo Tlalpan Carranza	Azcapotzalco B. Juárez Coyoacán Cuauhtémoc G. A. Madero Iztapalapa Miguel Hidalgo V. Carranza	Coyoacán Tlalpan Xochimilco

*RTP no cuenta con infraestructura especial para su funcionamiento, utiliza la red vial.

Fuente: (Elaboración propia con datos INEGI y STC, 2015a y STE y Metrobús, 2015)

1.4. PROBLEMÁTICA ACTUAL DEL TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS

Las concentraciones urbanas modernas tienen en el transporte de pasajeros un problema muy difícil de resolver, pero su solución no se puede tomar a la ligera ni postergar, ya que en la actualidad el desarrollo de un país depende en gran parte del transporte y la movilidad de las personas (López, 2009).

Se sabe “que una ciudad con un transporte público integral aumenta su competitividad económica al interconectar todos los elementos generadores de valor y al denotar una imagen de progreso y modernidad que atraigan tanto talento humano como inversiones que aumenten su dinamismo” (ONU-Hábitat, 2015), y en la ciudad de México el transporte público tiene muchas carencias.

Es por eso que se debe buscar ofrecer un mejor servicio en los diferentes sistemas de transporte público de pasajeros con los que se cuenta, con la finalidad de atraer a una mayor cantidad de usuarios y evitar que crezca el número de vehículos particulares, ya que de otra manera los problemas relacionados con la movilidad solamente irán en aumento junto con todas las consecuencias que ello genera.

En los siguientes apartados se explican algunas de las principales problemáticas relacionadas al transporte público de pasajeros en la Ciudad de México.

1.4.1. Políticas Públicas

Para comenzar, existen diversos organismos responsables de la prestación del servicio de transporte público de pasajeros, como ya se vio anteriormente, cada modo de transporte cuenta con sus propias características y particularidades de funcionamiento, sin embargo, el problema radica en que existe muy poca o nula coordinación entre ellos, por lo que hasta la fecha no se ha podido llevar a cabo un proceso de planeación integral pensando a largo plazo.

Además, cada que se da un cambio en la administración de la Ciudad de México, se adoptan nuevos programas, lo que dificulta aún más el proceso de planeación, ya que no se puede dar continuidad a las ideas que se generan y en ocasiones el tiempo que dura un gobierno no es suficiente para empezar a ver los beneficios de la implantación de ciertas medidas y así poder determinar, con pruebas sólidas, si son las correctas o es necesario modificarlas.

Esta falta de comunicación entre las autoridades encargadas tiene consecuencias que afectan directamente a los usuarios del transporte público de pasajeros, quienes se enfrentan a muchas ineficiencias para poder llegar a sus destinos.

1.4.2. Falta de información relacionada al transporte a nivel usuario y dependencias encargadas

Uno de los principales problemas que se encontraron con respecto a la información sobre transporte que se tiene en la Ciudad de México, es que existen algunas incongruencias entre los datos que se muestran en las distintas Secretarías, además algunas áreas se han dejado descuidadas y es muy difícil obtener información sobre ellas.

Algunos organismos presentan mayor orden en los datos sobre los modos de transporte que tienen a su cargo, tal es el caso del Sistema de Transporte Colectivo Metro o el Servicio de Transportes Eléctricos, por lo que su información resulta más confiable y además tienen estadísticas de años anteriores, facilitando el análisis y comparaciones de afluencia, número de vehículos, longitudes de operación, etc.

Por otra parte, en el portal de la Secretaría de Movilidad, que es uno de los organismos más importantes en el tema, se esperaría encontrar información de gran utilidad, pero sobre todo actualizada, sin embargo, no es así.

Otro punto importante es que en varios sitios web se muestra la información, pero no se indica la fuente y fecha de la misma, por lo que es muy difícil utilizarla para hacer algún tipo de estudio ya que no es posible conocer ni su origen ni la fecha de actualización.

En algunas otras páginas se encuentran enlaces rotos, información más enfocada a trámites que a proporcionar datos confiables, fuentes que se contradicen, etc.

Encontrar información sobre el transporte a nivel local no es tarea fácil, es necesario tener cuidado con la información que se va recabando, comparar los valores que se presentan y no tomar los datos a ciegas sin antes verificar su veracidad.

Además de esta falta de información, necesaria para hacer una planificación adecuada de la mejora de los sistemas de transporte público, tampoco los usuarios cuentan con herramientas que les permitan obtener datos sobre el transporte en tiempo real para hacer mejores elecciones para realizar sus viajes.

En la Tabla 1.15 se presentan diferentes grupos de usuarios del transporte público y la información que ellos requieren para lograr una adecuada comprensión de la manera de moverse por una determinada zona.

Los usuarios regulares en rutas cotidianas son los que menor cantidad de información requieren, debido a que ya conocen la ruta en la que se mueven, solamente es necesario indicarles cambios en horarios o paradas, si se llegan a presentar (Molinero y Sánchez, 1997).

Pero, por otra parte, los usuarios potenciales son uno de los grupos a los que mayor cantidad de información debería brindárseles, ya que no están familiarizados con los recorridos de las rutas, tarifas, paradas, horarios, etc.

Finalmente, el grupo en el que se encuentran los turistas, como era de esperarse, es el sector que mayor información requisita, debido al desconocimiento del transporte en la región (Molinero y Sánchez, 1997).

En la Ciudad de México, es difícil encontrar información para cualquiera de los grupos de usuarios que se mencionan en la Tabla 1.13, de manera general, la población presenta incertidumbre debido a que no pueden conocer los horarios de llegada o salida de las unidades de los sistemas de transporte, las diferentes rutas que los pueden llevar a su destino o las formas de hacer transferencias modales, etc.

Tabla 1.13. Grupos de usuarios y sus necesidades de información

Grupo de usuarios	Tipo de información requerida	Ubicación
Usuario regular en ruta cotidiana	Mapa de la red	Paradas
Usuario regular en ruta nueva	Mapa de la red + mapa de la ruta	Vehículos
Usuario potencial	Mapa de la red + mapa de la ruta + itinerario + tarifa	Terminales, tiendas, oficinas
Turista	Mapa de la red + mapa de la ruta + itinerario + tarifa	Sitios públicos

Fuente: (Molinero y Sánchez, 1997)

1.4.3. Autos particulares

Tanto el crecimiento físico como demográfico de cualquier ciudad, origina mayores demandas de infraestructura y servicios, entre ellos, vialidades y transporte que permitan la movilidad de las personas (ONU-Hábitat, 2015).

El problema es que, según el Programa Integral de Movilidad 2013-2018 (GDF,2014b), el diseño de las calles de la Ciudad de México ha tenido como enfoque principal el movilizar a los automóviles privados, dejando de lado las necesidades de los peatones, ciclistas y usuarios del transporte público, quienes compiten por el espacio residual.

Históricamente, la mayor parte de los recursos en infraestructura urbana se han orientado a cubrir las necesidades de los automóviles particulares, construyendo principalmente distribuidores viales, pasos a desnivel y puentes (ONU-Hábitat, 2015).

Estos hechos, aunados a la baja calidad del servicio de transporte público de pasajeros que predomina en la ciudad, incentivaron el aumento de los autos particulares.

Según el INEGI (2015b), la motorización en la Ciudad de México ha ido creciendo, como se muestra en la Figura 1.14, en el año 2014 ya se contaban con 4 737 749 automóviles; cabe señalar que dicha institución ya tiene disponibles datos del año 2015 para varios estados de la República Mexicana, no así para la Ciudad de México.

Es importante señalar, que de 2012 a 2014 se muestra un aumento de vehículos privados en la Ciudad de México mucho menor que en otros años, sin embargo, esto no representa que el problema esté solucionado, como se presenta en la Figura 1.15. En el Estado de México, en el mismo periodo se muestra un aumento apreciable, y según la EOD 2007, muchos de los viajes que tienen como destino la Ciudad de México se originan en esa región.

Sin embargo, esta información contrasta con la presentada por la Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA), dicha institución tiene a su cargo el Programa de Verificación Vehicular Obligatoria, que busca examinar las emisiones contaminantes de “todos los vehículos automotores matriculados y/o que circulen en el territorio de la Ciudad de México” (SEDEMA, 2017).

En el mismo año 2014, la SEDEMA reportó solamente 2.8 millones de verificaciones, si bien es cierto que existen algunos vehículos exentos, como los eléctricos y “los vehículos híbridos con motores de propulsión a gasolina y eléctrico” (SEDEMA, 2017), entre otros, las cifras mostradas por ambos organismos presentan una gran disparidad.

Uno de los problemas que se presenta y que puede, en cierta forma explicar esa notable diferencia, radica en que existen automóviles que se deben dar de baja en la Ciudad de México, esto puede deberse a distintas razones, por ejemplo, accidentes que implican pérdida total o simplemente que la unidad va a registrarse en otro estado.

Sin embargo, estas bajas no siempre se registran, por lo que el número de vehículos en circulación simplemente se va acumulando, brindando cifras que están lejos de la realidad. Lo que finalmente ocasiona que no se cuente con información actualizada sobre el parque vehicular en la Ciudad de México.

Esto representa un grave problema ya que, si ni siquiera se sabe con certeza el número de automóviles que se tienen circulando en la región, es mucho más complicado establecer estrategias para alcanzar los objetivos deseados.

De cualquier manera, si se continúa como hasta ahora con una orientación al uso excesivo del auto particular, seguirán presentándose diversos problemas relacionados al congestionamiento vial, incrementos en tiempos de desplazamiento, contaminación, etc.

Por ejemplo, el aumento en el tiempo de traslado promedio en la ciudad de México pasó de los 27 minutos que se tenían en el año de 1994 a 59 minutos en 2007, debido en gran medida a la congestión vial (INEGI, 2007).

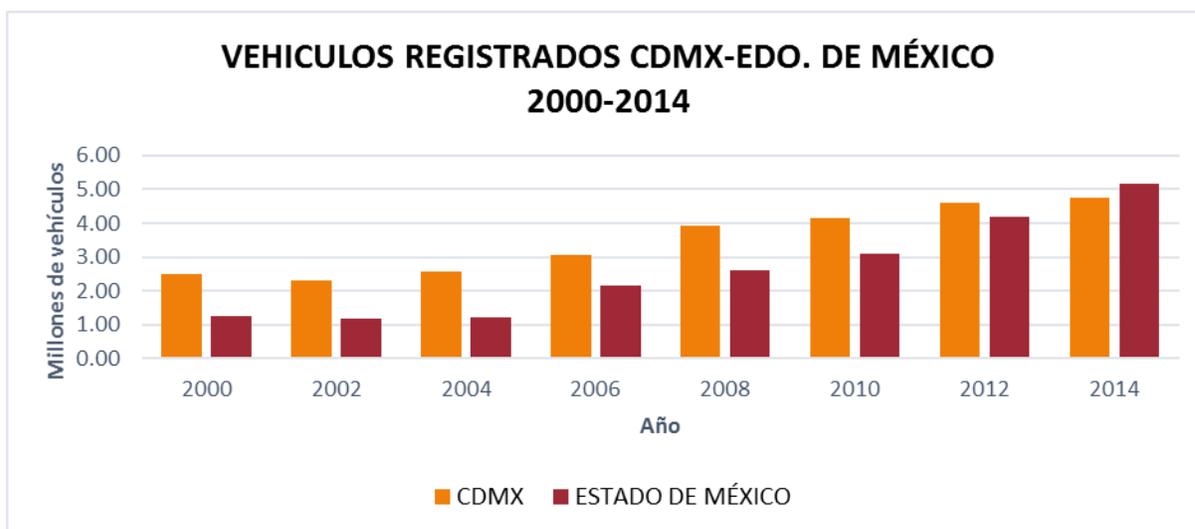


Figura 1.15. Comparación vehículos CDMX-Estado de México de 2000 a 2014
Fuente: (Elaboración propia con datos INEGI, 2015b)

1.4.4. Restricciones de circulación debidas a la contaminación ambiental

En 1989, debido a los graves problemas de contaminación ambiental que se presentaron en la Ciudad de México, se implantó como medida temporal, el programa Hoy no circula, conocido inicialmente como “Un día sin auto”, lo que buscaba era “retirar de la circulación, en los días laborales, el 20% de los autos particulares, sin importar si eran nuevos o no” (Contenido, 2014), finalmente pasó a convertirse en una medida permanente.

Sin embargo, en 2016 se hicieron algunos cambios a este programa debido a que se presentaron altos niveles de contaminantes suspendidos en el aire y se llegó a la Fase 1 de Contingencia Ambiental, se alcanzaron los 203 puntos de ozono del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), situación que no se presentaba desde el año 2002 (Contreras, 2016).

Debido a este grave problema, se endureció la restricción de la circulación vehicular del 5 de abril al 30 de junio de 2016, ya que en esa época se “presentan pocos vientos y lluvias, los contaminantes se concentran y al entrar en contacto con la radiación solar, generan altos niveles de ozono” (SEDEMA, 2016).

En cuanto a los servicios de transporte público de pasajeros, las unidades que contaban con placa federal o local y que cumplían con las disposiciones de verificación vigentes, estuvieron exentas de las modificaciones hechas al programa Hoy no circula (SEDEMA, 2016).

Los taxis, por su parte, sí debían seguir las reglas del programa con sus nuevas disposiciones, pero se les permitía circular de las 05:00 a las 10:00 horas del día que les aplicará la restricción (SEDEMA, 2016).

Tomando en cuenta que, una parte de los ciudadanos no podía utilizar su vehículo particular, era importante contar con servicios de transporte público de pasajeros para cubrir el aumento en la demanda durante este periodo, razón por la cual las medidas fueron un poco más flexibles con estas unidades.

Aún con estas nuevas restricciones, el año 2016 fue crítico en cuanto al tema de la contaminación ambiental, ya que no importa las medidas que se implanten, se siguieron alcanzando altos niveles de contaminantes.

1.4.5. Cobertura del transporte público, grupos vulnerables e inseguridad

Es cierto que se ha acusado al auto particular de muchos problemas de movilidad en la ciudad y que se busca que cada vez más personas decidan dejar su carro en casa y hagan sus desplazamientos en transporte público, pero éste presenta muchos puntos débiles que hacen que los ciudadanos lo consideren como un transporte inseguro e incómodo, y no lo tomen en cuenta como su primera opción para viajar.

En cuanto a la cobertura de servicios de transporte, cabe señalar que no se han distribuido equitativamente, existen zonas donde la cobertura de servicios es significativamente menor a otras.

Las delegaciones en las zonas sur-oriente, oriente, norte y la periferia de la Ciudad de México disponen de servicios más deficientes, con respecto a medios de transporte, equipamientos e infraestructura para la movilidad urbana, que el resto del territorio (CDHDF e ITDP, 2013).

Se han hecho esfuerzos para desarrollar nuevas opciones de transporte en el centro de la ciudad, como el Sistema Ecobici o el mismo Metrobús, pero los avances son muy limitados en las zonas periféricas, donde la oferta se encuentra dominada principalmente por el servicio de microbuses, que resulta ser la opción de más baja capacidad y a la vez la más contaminante (CDHDF e ITDP, 2013).

Según un estudio realizado por El Poder del Consumidor y el Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo (2014), se muestra una oferta de servicio de transporte público de pasajeros mal planeada y mal jerarquizada; una distribución desigual de la cobertura de las diferentes rutas que obliga a los usuarios a realizar múltiples cambios de vehículo, con impactos en sus tiempos de recorrido y costos de viaje.

De acuerdo con Eibenschutz y Goya (2009), las limitaciones en la movilidad afectan en mayor proporción a los grupos de menores ingresos que habitan en asentamientos periféricos alejados, ya que finalmente son ellos los que más usan el transporte público, pero menos opciones de traslado tienen.

Continuando con lo expuesto por los mismos autores, es claro que cualquier inversión en la modernización de los sistemas de transporte beneficiará en primera instancia a la población más vulnerable, por lo que es necesario que el gasto e inversión públicos se orienten hacia el mejoramiento y actualización de los sistemas de transporte público.

Y además de lo que ya se mencionó, existen ciertos grupos de población con necesidades específicas que generalmente no son tomadas en cuenta, por ejemplo, los adultos mayores y las personas discapacitadas. Las acciones para atenderlos se han limitado a establecer tarifas preferenciales, lo que en realidad no resuelven ningún problema (ONU-Hábitat, 2015).

Cabe señalar que en el transporte público también se presenta discriminación y violencia contra las mujeres, en promedio, el 90 % de las denuncias hechas en los módulos de seguridad en el Metro son por violencia contra la mujer (Dunckel-Graglia, 2013). De acuerdo con el Banco Mundial (2014), en la Ciudad de México al menos el 65% de las mujeres habían sido víctimas de algún tipo de violencia de género en el transporte público.

Debido a este problema, se impulsó el Programa Viajemos Seguras, orientado a prevenir la violencia contra las mujeres en el transporte público, pero no ha resultado suficiente para mejorar la situación pues solamente opera en los servicios de transporte público de pasajeros operados por la Administración Pública de la Ciudad de México, no así en los concesionados, que son los encargados de transportar a la gran mayoría de la población (Instituto de las Mujeres, 2016).

Y respecto a las personas discapacitadas, se puede apreciar una falta de transporte público especial que les permita realizar sus viajes de manera segura y cómoda, haciendo más difícil su desplazamiento por la ciudad (CDHDF e ITDP, 2013).

Finalmente, en una encuesta realizada en el año 2012 por el Instituto Mexicano para la Competitividad (2012), se encontró que nueve de cada diez usuarios del transporte público lo consideraban incómodo, ocho de cada diez lo veían como inseguro, siete de cada diez lento y siete de cada diez mujeres afirmaban tener miedo de ser agredidas sexualmente al usarlo.

De acuerdo con la misma encuesta, los microbuses representaban el tipo de transporte peor calificado en cuanto a la satisfacción de los usuarios, aproximadamente el 77% se encontraba insatisfecho con el servicio.

A pesar de que dicha encuesta se realizó en el año 2012, la percepción de los usuarios del transporte público no ha mejorado, se han llevado a cabo algunos otros sondeos, como el que hizo El Universal (2016), donde se encontró que las personas consideraban al transporte público aún más inseguro, con menor calidad y con la necesidad de hacer una transformación urgente.

En cuanto al aspecto de la seguridad, es común encontrar en los periódicos noticias sobre asaltos a mano armada en unidades de transporte público de pasajeros en algunas zonas de la ciudad, sobre todo en los microbuses, y en algunas ocasiones incluso se han reportado víctimas mortales.

Esta situación no ayuda en nada a la imagen, ya de por sí dañada del transporte público, por lo que es necesario buscar medidas para disminuir estos riesgos para los viajeros, asegurándoles que podrán realizar sus viajes sin temor de ser víctimas de la delincuencia.

1.4.6. Calidad de los servicios

Evaluar la calidad de los servicios que ofrecen los sistemas de transporte público de pasajeros no es sencillo, se trata de un concepto complejo que involucra diferentes aspectos.

Incluye atributos relacionados a la velocidad de operación, confiabilidad, seguridad, cobertura, limpieza y estética de las unidades, itinerarios, nivel tarifario, entre muchos otros (Molinero y Sánchez, 1997).

Para que la población opte por utilizar los servicios de transporte público sobre los privados, es necesario que éstos ofrezcan buena calidad, es decir, se debe buscar que el recorrido de los usuarios de su origen a su destino sea lo más agradable posible, con esto no se pretende que viajen con todas las comodidades, pero sí en un ambiente aceptable.

Se ha determinado que, un “tiempo de recorrido demasiado largo inhibe el uso del transporte público” (Molinero y Sánchez, 1997), pero también debe ser tomado en cuenta el tiempo de espera de los usuarios, ya que si es demasiado largo, puede afectar seriamente el nivel de servicio, en promedio las personas solamente aceptan esperar entre cero y cuatro minutos (Molinero y Sánchez, 1997).

Cuando al usuario se le brinda la oportunidad de realizar algunas actividades mientras espera, como la “observación de mapas de la red, adquisición de comida, teléfono a la mano” (Molinero y Sánchez, 1997), su percepción sobre el tiempo transcurrido cambia, se hace más amena la espera.

Sin embargo, en la Ciudad de México, existen algunos sistemas que ni siquiera tienen bien definidas las paradas, las unidades se detienen prácticamente en cualquier lugar donde el pasajero desee bajar o subir, si bien esto representa ciertas ventajas para las personas, también implica aumentos en los tiempos de recorrido que bien podrían evitarse.

Otro aspecto relacionado, son los itinerarios y la frecuencia que se maneja en las diferentes rutas de los servicios, sería útil que se utilizará algún método para optimizarlos, en algunos casos para hacer las programaciones se basan en la experiencia, un procedimiento que ha dado frutos durante mucho tiempo, pero si hoy se cuenta con herramientas tecnológicas que pueden cumplir esa función, es conveniente hacer las actualizaciones correspondientes y obtener mayores beneficios.

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, la apariencia de las unidades representa un punto clave, ya que cualquier detalle, aunque para algunos pueda parecer insignificante, influye en la evaluación que emite un usuario.

En la Ciudad de México, se pueden encontrar varios vehículos dedicados al transporte público que se encuentran en malas condiciones, se nota a simple vista que están emitiendo una gran cantidad de contaminantes y que ya no funcionan como deberían.

Si a esto se le suma que, en el interior de las unidades, la ventilación, iluminación y el estado en general de los asientos, las ventanas o los pasillos no es el óptimo, lo único que se logra es que la opinión de los pasajeros siga siendo negativa.

Como se puede apreciar, la calidad de los servicios es un aspecto que no ha mejorado en la mayor parte de los sistemas de transporte público de la CDMX y es imposible pensar en una mayor atracción de usuarios, si se sigue brindando un servicio de este nivel.

1.4.7. Atraso tecnológico

Como ya se ha mencionado anteriormente, en la mayoría de los servicios de transporte público de pasajeros se presentan atrasos tecnológicos que dificultan su operación y no les permiten brindar servicios de calidad a los usuarios.

El Sistema de Transporte Colectivo Metro ya cumplió más de 45 años de operación, sin embargo, se enfrenta a problemas como el retraso y saturación del servicio, falta de mantenimiento de los trenes, fallas técnicas, entre otros (Robles, 2014).

En gran parte de sus instalaciones, equipos y sistemas se tiene “un alto grado de desgaste y han rebasado las fechas en las cuales, por especificación de diseño, finaliza su vida útil. Además, existe un alto grado de obsolescencia tecnológica, originándose incompatibilidad con la tecnología instalada posteriormente” (Robles, 2014).

En cuanto al sistema de trolebuses, se tiene una escasez de piezas de refacción para las unidades, no solo en el país sino en el mercado internacional, además, “la obsolescencia tecnológica ha provocado que en promedio 60 trolebuses no salgan a servicio todos los días, ya sea porque permanecen en talleres para mantenimiento o porque presentan fallas” (Pazos, 2015).

Por su parte, algunas de las unidades de la RTP también cuentan con varios años de antigüedad y no se encuentran funcionando correctamente, es por eso que se planteó la idea de la actualización y puesta en marcha de un sistema más eficiente (Páramo, 2015).

Razón por la cual incluso se hizo el cambio de nombre a Sistema de Movilidad 1, buscando hacer una renovación de autobuses y que éstos tengan mejor accesibilidad tanto para personas de la tercera edad como para discapacitados, además de que generen menos emisiones (RTP, 2016b).

En cuanto a los microbuses, algunos de ellos ya se encuentran en malas condiciones y siguen operando a pesar de que se nota que ya es necesario hacer una renovación de la flota de vehículos.

Además, se tiene poco control y vigilancia del servicio que ofrecen los microbuses, lo que propicia algunos problemas, por ejemplo, los choferes efectúan descenso y ascenso de pasaje hasta en tercera fila sobre vialidades importantes, poniendo en riesgo la integridad de los usuarios; también se crean puntos de conflicto en zonas de intercambio modal, como en las estaciones del Metro (López, 2009).

Los conductores de las unidades, en su mayoría, no se encuentran capacitados para realizar su trabajo, en ocasiones no respetan el Reglamento de Tránsito, situación que puede ser la causante de muchos de los accidentes que se presentan.

A pesar de que en 2016 se comenzó con la chatarrización de algunos de los vehículos más antiguos, no se cuenta con herramientas tecnológicas y de comunicación que faciliten la unificación de los procesos de planeación, gestión de la operación y control de la prestación del servicio de transporte. Y aunque se cuenta con el diseño, no se ha concluido la implantación de un medio único de pago y un sistema de recaudación unificado (GDF, 2014b).

Por otra parte, en general a los usuarios de cualquiera de estos sistemas de transporte público, no se les brinda ningún tipo de información sobre las rutas y los horarios de las mismas, ni mucho menos de la conectividad entre los diversos modos, en el mundo ya existen varias ciudades que son referentes en este aspecto y han notado grandes beneficios al poner a disposición de la población, información clara y completa sobre el transporte, entre ellas se encuentran: Londres, París, Hong Kong, Tokio y Nueva York.

1.5. TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS DENTRO DE CIUDAD UNIVERSITARIA

Al sur de la Ciudad de México se encuentra ubicada la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), una de las instituciones educativas más importantes del país, en el ciclo escolar 2015-2016 contaba con un total de 349 539 alumnos y alrededor de 40 184 académicos (Portal de Estadística Universitaria UNAM, 2017).

Además, Ciudad Universitaria cuenta con alrededor de 2 183 edificios, su área total construida asciende a los 2 815 591 m² (Portal de Estadística Universitaria UNAM, 2017).

Como era de esperarse, fue necesario establecer servicios de transporte para trasladar a tal cantidad de personas dentro de un espacio tan amplio como Ciudad Universitaria.

Es por eso que se cuenta con dos servicios de transporte gratuitos para la comunidad: Bicipuma y Pumabús.

1.5.1. Bicipuma

Bicipuma es un sistema público de bicicletas que entró en funcionamiento en marzo de 2005, con la finalidad de brindar otra opción de transporte a los estudiantes, personal administrativo y docente de la UNAM [Dirección General de Atención a la Comunidad Universitaria (DGACU), 2015].

Se tienen varios módulos ubicados en diferentes lugares dentro de Ciudad Universitaria, además del Bicicentro Metro C.U., en estos lugares se realizan actividades de ascenso y descenso de los usuarios, así como revisión de las bicicletas y estacionamiento de las mismas.

De acuerdo con la información de la DGACU (2015), se tienen los siguientes módulos, que también se muestran en la Figura 1.16:

- Estadio Olímpico.
- Arquitectura.
- Filosofía y Letras.
- Derecho.
- Ingeniería.
- Medicina.
- Química.
- Anexo de Ingeniería.
- Tapatío Méndez.

- Ciencias.
- Ciencias Políticas.
- Bicicentro Planta Alta.
- Bicicentro Planta Baja.

En total se cuenta con 5 980 kilómetros de ciclopista, que permiten la circulación de las bicicletas para llegar a los diferentes destinos.

Cabe señalar que en cada módulo se tienen dos turnos (A y B), los encargados cuentan con un radiotransmisor, una computadora portátil, un escáner de huellas y un escáner de código de barras.

Antes de tener acceso a las bicicletas por primera vez, los usuarios deben darse de alta en el sistema de huella digital colocando el dedo índice sobre el escáner de huellas, además mediante el escáner de código de barras se registra el número de cuenta que viene inscrito en su credencial UNAM, posteriormente, en la pantalla de la computadora aparece la huella digital que registró el usuario cuando tramitó su credencial y al coincidir con la que se toma en el momento, la persona será libre de obtener una bicicleta en cualquier módulo de los anteriormente señalados, su registro tendrá vigencia durante un ciclo escolar.

El servicio está sujeto a disponibilidad y el horario de atención es de lunes a viernes de 06:30 a 17:00 horas.

Por otra parte, en la computadora portátil del encargado del módulo, se tiene acceso a un sistema en el que, al pasar el escáner de código de barras por la bicicleta y el casco que se lleva cada ciclista, se va creando un registro de los préstamos.

El préstamo dura como máximo 20 minutos y cuando la persona hace la entrega en algún otro módulo, el encargado tiene que hacer nuevamente el escaneo del código de la bicicleta y el casco para evitar sanciones al usuario.

Los coordinadores de Bicipuma tienen acceso a toda la información que se genera en los módulos, pero de cualquier forma los encargados mediante sus radios pueden estar pidiendo bicicletas en caso de que se agoten las unidades para préstamos, para eso se tienen algunas camionetas, mediante las cuales se reparten las bicicletas en donde hacen falta y en caso de ser necesario, se retiran las que se encuentran en mal estado y necesitan ser revisadas en el taller.

El último préstamo se puede hacer como máximo a las 16:30 horas, momento en el que se cierra el sistema de préstamos, después de esa hora y hasta las 17:00 horas, solo se reciben las bicicletas que los usuarios deban entregar.

Otra de las tareas de los encargados de los módulos es elaborar un inventario de resguardo, es decir, llenar un formato donde se escribe el número identificador de las bicicletas que quedan en su módulo y lo entregan a los encargados en el Bicicentro.

Para mayor seguridad, se cuenta con un sistema cerrado de cámaras en los módulos, para que los coordinadores estén checando las grabaciones y puedan remediar con rapidez cualquier problema, así como prevenir robos y daños a las unidades.

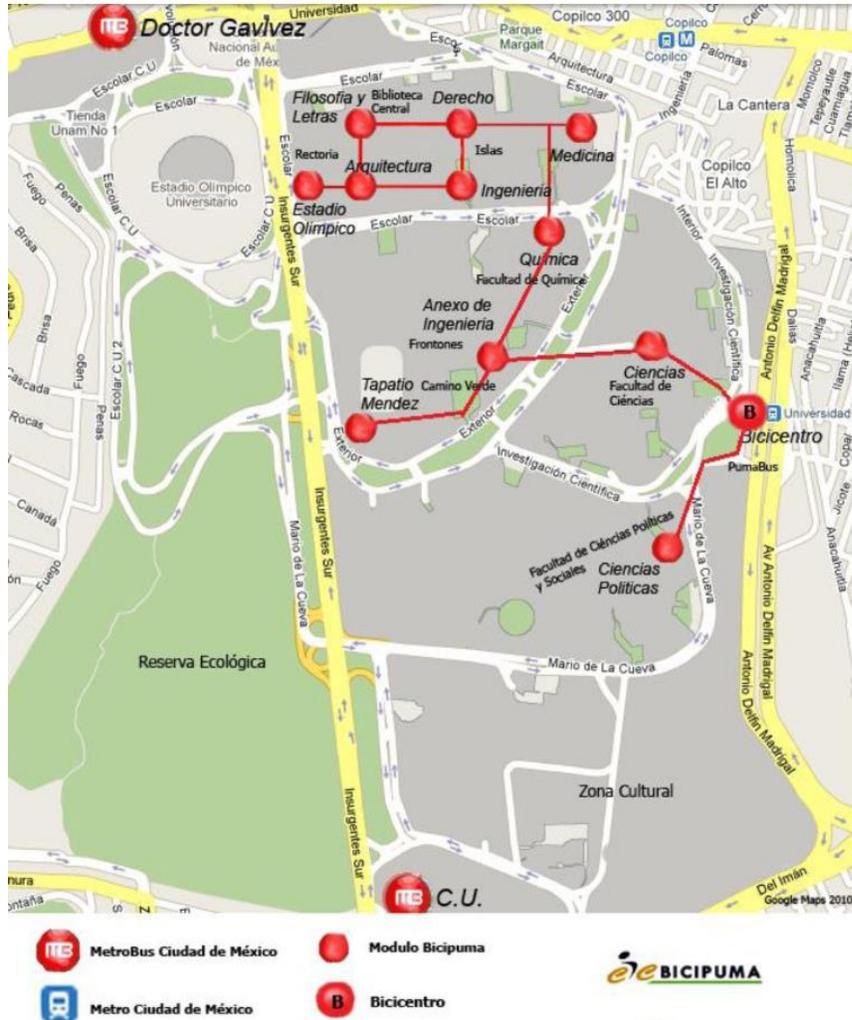


Figura 1.16. Bicipuma: Módulos, Bicipentro y ciclopista
Fuente: (DGACU, 2015)

1.5.2. Sistema de Transporte Interno Pumabús

Pumabús es un servicio gratuito que consta de 13 rutas más una especial para el traslado de personas con capacidades diferentes (Ruta 36), las principales características de cada una de ellas se presentan en la Tabla 1.14, en donde se aprecia la distancia aproximada que recorren, el número de paradas que tienen establecidas y los principales sitios a los que llegan.

La ruta número 12 presenta algunas variaciones en su itinerario a ciertas horas del día, es por eso que se agregó la ruta denominada 12.1 en la Tabla 1.14, sin embargo, ambos recorridos se hacen alternadamente.

Cabe señalar que la ruta 13 se puso en funcionamiento recientemente, por lo que aún no se cuenta con mucha información sobre ella, en la Figura 1.17 se aprecia su recorrido, va de la Facultad de Filosofía y Letras a la Zona Cultural, pasa por la Facultad de Derecho, Biblioteca Nacional, Unidad de Posgrado, Coordinación de Humanidades e Instituto de Investigaciones Jurídicas (Gaceta Digital UNAM, 2016).



Figura 1.17. Ruta 13 Pumabús
Fuente: (Gaceta Digital UNAM, 2016)

Además, en la Figura 1.18 se presentan de manera gráfica las diferentes rutas del sistema, en donde se puede apreciar su cobertura, las vías que recorren, paradas y paraderos.

Existen cuatro puntos de control o paraderos, marcados con círculos rojos en la Figura 1.17, éstos son: Metro CU, Metrobús CU, Estadio y Zona Cultural. Es desde estos lugares donde inician y terminan varias de las rutas y representan sitios de gran afluencia cuya conexión es básica para el funcionamiento del sistema.

Todas las rutas operan de 6:00 a 22:00 horas, de lunes a viernes, pero los fines de semana se hacen algunas modificaciones a dichos horarios. Los sábados solamente circulan las rutas 1,2,4,5 y 9 de 6:00 a 15:00 horas (Sistema de Transporte Interno Pumabús, 2014).

Mientras las rutas 3 y 10 tienen un horario de 6:00 a 23:00 horas los sábados y domingos (Sistema de Transporte Interno Pumabús, 2014).

Hasta hace algunos años, estaba permitido el estacionamiento de vehículos particulares en ambos costados de las vialidades dentro de Ciudad Universitaria, sin embargo, esto ocasionaba que solamente quedara un carril libre para la circulación, por lo que se prohibió esta práctica y se decidió dejar un carril exclusivo para el tránsito de las unidades del Pumabús.

Lo que se buscaba con esta medida era: disminuir el tiempo de recorrido de los autobuses, agilizar el tránsito, la disminución de la contaminación atmosférica, sonora y visual, además de la mejora del servicio que se brindaba (Sistema de Transporte Interno Pumabús, 2014).

Tabla 1.14. Características de las rutas de Pumabús

Ruta	Distancia (km)	Puntos de interés	Paradas
1) Metro Universidad - Circuito Interior	7.2	*Biblioteca Central *Torre II de Humanidades *Dirección General de Orientación y Servicio Educativos *Teatro Arq. Carlos Lazo *MUCA	16
2) Metro Universidad - Circuito Exterior	4.2	*Anexo de Ingeniería *Frontón Cerrado *Instituto de Investigaciones Antropológicas	10
3) Metro Universidad – Zona Cultural	7.2	*Espacio Escultórico *Salas de cine (Julio Bracho y José Revueltas) *Estacionamiento de Aspirantes *Coordinación e Institutos de Humanidades	15
4) Metro Universidad – Jardín Botánico	9.7	*Anexo de Ingeniería *Frontón Cerrado *Bomberos UNAM *Pumitas *Instituto de Ecología	14
5) Metro Universidad – Barda Perimetral Norte	8.3	*Biblioteca Central *Las Islas *Acceso Metro Copilco *Torre II de Humanidades *Coordinación e Institutos de la Investigación Científica	16
6) Estadio Olímpico	10.2	*Bomberos UNAM *Instituto de Ecología *Coordinación e Institutos de la Investigación Científica *Anexo de Ingeniería *Dirección de Medicina del Deporte	24
7) Estadio Olímpico – Circuito Interior	4.8	*Biblioteca Central *Acceso Metro Copilco *Torre II de Humanidades *Alberca Olímpica *Dirección General Orientación y Servicio Educativos *MUCA	16
8) Estadio Olímpico – Circuito Exterior	5.8	*Teatro Arq. Carlos Lazo *Alberca Olímpica *Anexo de Ingeniería *Frontón Cerrado *Tienda PUMAS	18

Tabla 1.14. Continuación

Ruta	Distancia (km)	Puntos de interés	Paradas
9) Metrobús CU-Facultades	4.1	*Frontón Cerrado *Biblioteca Central *Las Islas *Auditorio Alfonso Caso *Torre II de Humanidades *Anexo de Ingeniería	13
10) Metrobús CU-Zona Cultural	6.2	*Pumitas *Instituto de Ecología *Salas de cine (Julio Bracho y José Revueltas) *Teatro Juan Ruiz de Alarcón *Estacionamiento de Aspirantes	13
11) Metrobús CU - Campos Deportivos	5.8	*Estadio Olímpico Universitario *Pumitas *Instituto de Ecología *Servicios Médicos	14
12) Metrobús CU – Investigación Científica	-----	-----	-----
12.1) Tienda UNAM – Investigación Científica	-----	-----	-----

Fuente: (Sistema de Transporte Interno Pumabús, 2014)

Pumabús brinda conexiones con algunos módulos de Bicipuma, además de otros sistemas de transporte externo, como Metro y Metrobús (Sistema de Transporte Interno Pumabús, 2014).

De acuerdo con la Gaceta Digital UNAM (2016), Pumabús contaba hasta 2016 con un total de 65 autobuses para dar servicio en todas rutas, sin embargo, 50 de ellos se encuentran en circulación constante, pero el resto está en reserva.

A pesar de que no se tiene información exacta sobre el número de personas que utilizan este servicio de transporte, se estima que la demanda diaria total del sistema es de 146 000 usuarios (DGSG, 2014 citada por Cifuentes, 2016).

En la Tabla 1.15 se presenta información en porcentajes sobre los pasajeros que se trasportan en cada una de las 12 rutas y el número de autobuses que se tienen destinados para ellas.

De la información de la Tabla 1.15 se aprecia que las rutas más utilizadas son: 1,2 y 9. Mientras las menos solicitadas son: 10,11 y 12.

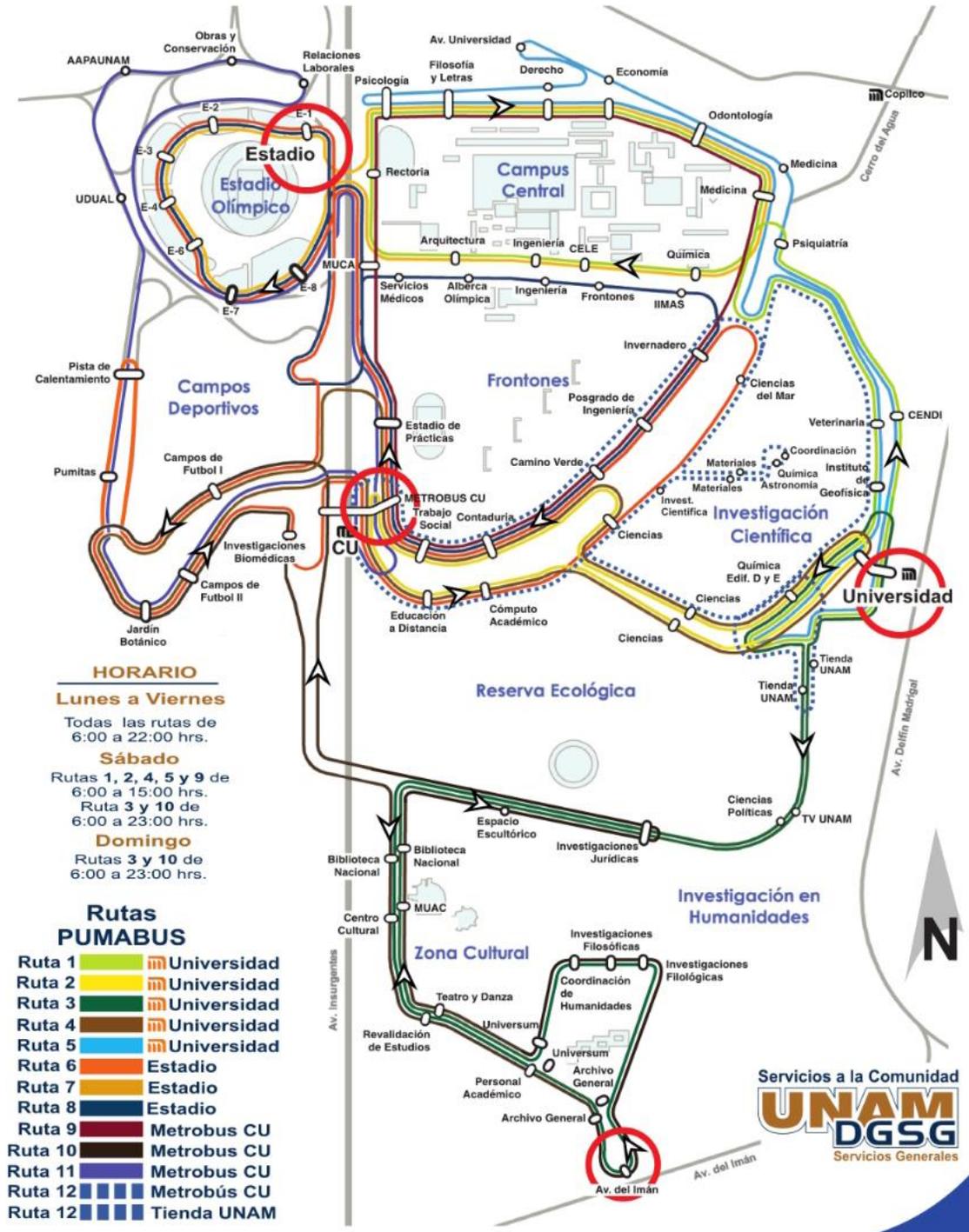


Figura 1.18. Rutas de Pumabús, Ciudad Universitaria
Fuente: (Sistema de Transporte Interno Pumabús, 2014)

Tabla 1.15. Número de unidades y demanda de las rutas de Pumabús

Ruta	Número de autobuses	Demanda (%)
1	7	16.5
2	7	17.1
3	7	9.1
4	5	3.5
5	6	13.2
6	4	3.5
7	5	10.6
8	4	10.4
9	5	14.2
10	6	1.2
11	3	0.3
12	2	0.4
36	1	-----

Fuente: (Cifuentes, 2016)

1.6. CONCLUSIONES

La Ciudad de México es de gran importancia a nivel nacional por todo lo que representa, sin embargo, también es una ciudad con muchos problemas en distintos aspectos, el transporte y la movilidad de sus habitantes son algunos de ellos, en los últimos años se ha visto como estas complicaciones han deteriorado la calidad de vida de las personas y si no se hace algo para resolverlas terminarán generando mayores dificultades.

Las autoridades por su parte, conscientes de que se debe actuar de manera rápida para generar un conjunto de soluciones ante esta situación, se han encargado de implantar diversos programas y estrategias, sin embargo, muchos de ellos no produjeron los resultados deseados y lejos de resolver conflictos, los agravaron.

Y es que una de las principales dificultades, es que no se cuenta con información suficiente para lograr hacer un análisis adecuado y verdaderamente identificar las estrategias que generarían cambios favorables, ni las propias Secretarías encargadas de temas relacionados con transporte y movilidad, tienen información completa que sirva para hacer una planeación integral a futuro.

Durante mucho tiempo, se consideró que la solución óptima para resolver todos o la mayoría de los problemas de transporte era simplemente la construcción de infraestructura para que los vehículos tuvieran más espacio para circular, pero lo que se estaba provocando con esto era el aumento del parque vehicular, en especial de los automóviles particulares.

Y es precisamente a los vehículos particulares a los que se les ha señalado como los principales causantes del alto congestionamiento vial y sobre todo de la contaminación que se presenta en la ciudad, por lo que el enfoque actual es brindarles prioridad a los peatones, a los medios de transporte no motorizados y al transporte público de pasajeros.

El problema radica en que la mayoría de los sistemas de transporte público de pasajeros con los que se cuenta en la ciudad, presentan serias deficiencias en el aspecto de seguridad, capacidad, cobertura, modernización, entre otros.

Estas razones hacen que la población opte por utilizar lo menos posible estos servicios y es por eso que se cae en una contradicción, mientras por una parte se busca que el número de viajes en auto particular disminuya, por otra parte, no se le da la importancia necesaria al mejoramiento de los sistemas de transporte público de pasajeros para incentivar a los habitantes a utilizarlos.

Además, algunas medidas que se han impulsado, como el programa Hoy No Circula mucho más estricto que se implantó durante algunos días en el año 2016, hacen necesario que los sistemas de transporte público de pasajeros estén en condiciones de dar servicio a todas esas personas que no pueden trasladarse con su auto, por lo que es importante generar cambios positivos que mejoren la calidad de los servicios de transporte público.

Pero este tipo de problemas no afectan únicamente a México, existen diversas ciudades alrededor del mundo que han estado envueltas en situaciones similares y, por lo tanto, se han visto en la necesidad de buscar alternativas innovadoras para mitigarlos.

Una de las soluciones que se ha encontrado, es el uso de Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT), que si bien no se pretende que resuelvan todas las dificultades que se tienen, sí representan una herramienta para lograr la mejora de los sistemas de transporte público de pasajeros, generando mejores niveles de servicio, disminuyendo las demoras y aumentando las velocidades de recorrido, además permiten brindar información en tiempo real a los usuarios y de esta manera facilitarles sus traslados.

Existen diferentes tipos de SIT, cada uno con características particulares, sin embargo, en México aún no se ha explotado todo su potencial y solamente han sido utilizados de manera aislada en algunos proyectos, sobre todo en carreteras y autopistas, pero no se les ha dado el impulso necesario para lograr su implantación en otras áreas donde también son capaces de generar grandes aportaciones.

En el caso particular de la Ciudad de México, todos los sistemas de transporte público de pasajeros tienen algunas áreas en las que se puede mejorar, sin embargo, una vez que se han identificado y analizado las principales características de cada uno de dichos sistemas, es posible encontrar las mejores opciones para comenzar con la implantación de sistemas inteligentes.

Tomando en cuenta la capacidad y la demanda que presentan, se identificó que el Sistema de Movilidad 1 (M1 antes RTP) o la Red de Trolebuses representan buenas alternativas para llevar a cabo la implantación de un SIT, en específico un Sistema Avanzado para el Transporte Público (SATP).

En el M1, se presenta una gran demanda por parte de la población, debido entre otros factores, a que sirve como un medio de enlace entre las zonas periféricas de la ciudad y los otros sistemas de transporte, además de la gran cantidad de rutas con las que cuenta, sin embargo, sus unidades no tienen una capacidad tan elevada como la que presentan, por ejemplo, los trenes del Sistema de Transporte Colectivo Metro, por lo que generalmente los autobuses tienen que realizar los recorridos con sobrecupo, lo que a la vez genera incomodidad para los usuarios y una baja calidad en el servicio.

Dentro de los servicios que brinda MI, Ecobús resulta ser el más viable para comenzar la utilización de un SATP, ya que de acuerdo con la información que se presenta en su página web, las unidades de sus rutas ya cuentan con localizadores satelitales (GPS), además de radiocomunicación entre el operador del vehículo y un centro de control y, por otra parte, sus motores cuentan con tecnología que hace que generen menos contaminantes.

Por su parte, el Sistema de Trolebús también se considera una buena opción sobre todo gracias a los beneficios ambientales que trae consigo, de hecho, actualmente se encuentra en renovación su parque vehicular ya que varias unidades estaban en malas condiciones, por lo que sería una buena oportunidad para modernizar todo el servicio en general.

Ahora bien, específicamente para Ciudad Universitaria, el sistema de transporte interno Pumabús, representa una alternativa para la implantación de un SIT, con la finalidad de beneficiar a la comunidad universitaria y facilitar la planeación de sus traslados.

Pumabús es utilizado diariamente por estudiantes y trabajadores de la Universidad principalmente, sin embargo, es difícil encontrar información sobre los recorridos y horarios de cada una de las diferentes rutas, los transbordos o las opciones para llegar a un determinado destino.

Es común encontrar personas preguntando por opciones para llegar a algún sitio, o largas filas esperando que arribe una unidad, sobre todo a determinadas horas del día, sin saber si aún deberán esperar por varios minutos.

Si bien ya se han desarrollado algunos proyectos como HIPERPUMA (<http://hiperpuma.iingen.unam.mx>), que permite conocer las diferentes alternativas para trasladarse de un origen a destino, aún no cuenta con información en tiempo real y esto representa solo una parte de lo que implica un SATP.

También se puede apreciar sobrecupo en algunas rutas, mientras otras son tan poco concurridas que bien podrían eliminarse o modificarse.

La implantación de un SIT no es tarea sencilla, se debe comprender primero la forma en la que trabajan, sus limitantes, la tecnología requerida, etc., y así determinar si realmente representan la solución al problema específico que se pretende resolver, ya que como se mencionó antes, sus beneficios van dirigidos a ciertos objetivos y no pretenden resolver la problemática en su totalidad.

Algo que sí se puede asegurar, es que mejoraría la percepción que tiene la población respecto a los sistemas de transporte público de pasajeros, hoy en día no cuentan con un buen prestigio, entre otras razones, debido a que información que se les brinda a los usuarios es escasa o nula.

El simple hecho de mostrar a las personas las rutas de autobús que circulan por una determinada vía, el destino de cada una de ellas, así como el tiempo aproximado que tardará en llegar la siguiente unidad, es decir, el tiempo que tendrán que esperar en la parada hasta que arribe un autobús que los lleve a su destino, representa una herramienta muy valiosa para la población.

A través de estos sistemas inteligentes, se les proporciona un conjunto de datos que les permiten hacer una mejor planeación de sus viajes y elegir la alternativa más adecuada para trasladarse, pero con base en información confiable y en tiempo real.

En los siguientes capítulos se tratarán más a fondo las implicaciones que tiene la implantación de un Sistema Inteligente de Transporte, sus componentes, y en específico la viabilidad de su implantación en el sistema Pumabús.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE

En el presente capítulo se abordan las principales características de los Sistemas Inteligentes de Transporte, comenzando con una definición general, para después presentar su clasificación, además de explicar algunos ejemplos de aplicación, tanto en México como en otros países.

2.1. CONCEPTOS BÁSICOS

Como se mencionó anteriormente, un Sistema Inteligente de Transporte (SIT o ITS por sus siglas en inglés) no es capaz de solucionar todos los problemas relacionados al transporte que se presentan en una región determinada, pero sí puede ayudar a aminorarlos.

Actualmente dentro de la literatura se pueden encontrar varias definiciones para explicar lo que es un SIT, mismas que han sido adoptadas en diferentes países o por organizaciones relacionadas con el tema alrededor del mundo, enseguida se presentan algunas de ellas.

El Departamento de Transporte de Estados Unidos (2011) en su definición, menciona que los sistemas inteligentes de transporte representan la aplicación de información y tecnología de las comunicaciones al transporte, con la finalidad de lograr una mayor seguridad y movilidad, pero también buscando reducir las externalidades que genera el transporte, enfocándose principalmente en el impacto al medio ambiente.

Por su parte Sussman (2005) establece que los sistemas inteligentes de transporte son una combinación de tecnología, sistemas de información y comunicación, además de algunos métodos matemáticos que se aplican a la infraestructura de transporte con la que se cuenta. Pero señala como punto importante, que además de las cuestiones tecnológicas y de sistemas necesarias para implantarlos, existe un conjunto de aspectos institucionales que se deben tomar en cuenta para lograr su adecuado funcionamiento.

Además, el Departamento de Infraestructura y Desarrollo Regional del Gobierno Australiano (2015), afirma que un SIT implica la aplicación de la tecnología al transporte y su infraestructura, para lograr que se dé una transferencia de información entre los sistemas, logrando así una mejora en diferentes aspectos, entre ellos la seguridad, la productividad y el impacto medioambiental.

Según Rye (2006), un sistema inteligente de transporte es la aplicación de tecnología informática al sector transporte, es decir, un SIT es el encargado de reunir datos sobre el funcionamiento del sistema de transporte, para después hacer un procesamiento de la información obtenida y posteriormente poder utilizarla, ya sea para mejorar la gestión del sistema en general o para proporcionar información a los usuarios y que así, ellos puedan tomar mejores decisiones acerca de los viajes que tienen que realizar.

Finalmente, de acuerdo con el Instituto Mexicano del Transporte, un SIT es la “aplicación de tecnología avanzada de captura y proceso de información, comunicaciones y control para mejorar la eficiencia y seguridad en un sistema de transporte” (Acha y Espinosa, 2004).

De acuerdo con Acha y Espinosa (2004), un SIT ayudará a lograr mejoras en el sistema de transporte mediante la disminución de los accidentes, la reducción de los tiempos de viaje que se realizan, el uso de medios de pago que faciliten el acceso a los diferentes sistemas de transporte público de pasajeros y la aportación de información oportuna a los viajeros.

Como se puede ver, en las definiciones que se mencionaron anteriormente se aprecia que existe un término común en todas ellas y es el aspecto tecnológico, es decir, coinciden en que los sistemas inteligentes se basan en el uso de la tecnología aplicada a los diferentes sistemas de transporte y la infraestructura que utilizan.

Sin embargo, para entender mejor el funcionamiento de los SIT, es necesario explicar cómo surgieron y cuáles son las principales funciones que se les han dado, así como su clasificación y características particulares.

2.2. ANTECEDENTES

Los principales avances en el área de los Sistemas Inteligentes de Transporte se han dado en países como Estados Unidos, Japón y en general, en la mayoría de los países europeos, los cuales en ocasiones han trabajado en conjunto.

Enseguida se explica la manera en que se desarrollaron los SIT en los países antes mencionados y los primeros proyectos de este tipo que se implantaron.

De acuerdo con Seguí y Martínez (2004), en Estados Unidos los Sistemas Inteligentes de Transporte surgen durante la década de los años 90, cuando las estrategias tradicionales que hasta entonces se utilizaban para resolver los problemas de congestión dejaron de ser la primera opción y se decidió apostar por nuevas alternativas.

Es por eso que, en 1988 el grupo de estudio Mobility 2000 comenzó a investigar la forma en que la tecnología podía ayudar a resolver los problemas de congestión vial, pero cabe señalar que ya se tenía un antecedente desde 1968 cuando se creó un programa llamado Electronic Route Guidance System (ERGS) (Acha y Espinosa, 2004).

ERGS es considerado el sistema de navegación más antiguo en Estados Unidos, su desarrollo estuvo a cargo del Bureau of Public Roads, organismo antecesor de la actual Federal Highway Administration (FHWA) organismo encargado, entre otras cosas, de la construcción y mantenimiento de carreteras, puentes y túneles en dicha nación (Haghighat y Kim, 2009).

El principal objetivo del ERGS era guiar a los conductores para llegar a sus destinos sin contratiempos, para ello se debía contar con un dispositivo a bordo del vehículo para lograr la interacción entre los usuarios y el sistema (Dong, 2011).

Posteriormente, en 1990 se estableció la Intelligent Vehicle Highway Society of America (IVHS America), un comité de asesoría utilizado por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos, que en 1994 cambió de nombre a ITS América (Acha y Espinosa, 2004).

Actualmente, ITS América es una organización reconocida a nivel mundial y está “dedicada al avance de la investigación, el desarrollo y despliegue de sistemas inteligentes de transporte” (ITS América, 2016).

Pero a la par, se llevaron a cabo proyectos similares en Europa, como el denominado ALI (Autofarer Leitung und Informationssystem) que comenzó en 1979 y en el cual Alemania jugó un rol clave (Chen, 1992).

ALI era un sistema que se utilizaba para brindar información y orientación a los usuarios de las carreteras para llegar a sus destinos de la manera más rápida y segura.

Otro programa de gran relevancia fue PROMETHEUS (Program for European Traffic with Highest Efficiency Unprecedented Safety), lanzado en 1986 y proyectado para durar solamente 7 años, estuvo bajo la coordinación de la plataforma EUREKA (European Research Coordination Agency), una iniciativa que contaba con 19 países europeos y cuyo principal objetivo era aumentar la competitividad industrial de la zona, estimulando el desarrollo e investigaciones cooperativas (Departamento de Transporte de Estados Unidos, 2014).

De acuerdo con Chen (1992) los principales objetivos de PROMETHEUS eran:

- Brindar a los conductores información haciendo uso de las nuevas tecnologías.
- Establecer una conducción cooperativa, es decir, tener una red de comunicación entre los vehículos para dar a los conductores información relevante sobre los congestionamientos en las rutas hacia sus destinos.

Por su parte, el proyecto DRIVE (Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe) que comenzó su primera fase en 1989, unos años después de PROMETHEUS, estuvo bajo la coordinación de la Comisión de las Comunidades Europeas (CEC), contó con alrededor de 1 000 investigadores y técnicos especialistas de diferentes áreas, buscando aumentar la eficiencia del tráfico y reducir los impactos adversos al medio ambiente que traen consigo los automóviles (Departamento de Transporte de Estados Unidos, 2014).

La principal diferencia de DRIVE fue que se enfocó en las características propias de los usuarios de los vehículos, ya que se consideró que este aspecto también tenía que ser considerado para hacer una correcta implantación de un sistema inteligente (Barfield y Dingus, 1998).

Este programa continuó su evolución y se logró una nueva etapa de desarrollo denominada DRIVE II, en esta parte se hizo especial hincapié en la implantación de proyectos piloto resultado de las investigaciones llevadas a cabo en la primera fase (DRIVE I) (Barfield y Dingus, 1998).

A pesar de que los programas DRIVE y PROMETHEUS eran independientes entre sí, se requería una cooperación entre ambos para lograr un objetivo común. Es por eso que, la mejora del funcionamiento en general del sistema de transporte era el objetivo principal de PROMETHEUS, mientras DRIVE se centró en la influencia de la parte humana en este tipo de sistemas (Departamento de Transporte de Estados Unidos, 2014).

Ahora bien, con la finalidad de llevar estos nuevos productos e información al mercado lo más rápido posible, en 1991 se crea ERTICO (*European Road Transport Telematics Implementation Coordination Organization*), que ayudó a identificar las principales estrategias que ayudarían a explotar los recursos generados por programas como DRIVE, PROMETHEUS y otros proyectos independientes que se estaban desarrollando, la meta era asegurar el dominio europeo en cuanto a sistemas inteligentes de transporte (ERTICO ITS Europe, 2016).

Por su parte, Japón desde los años 60 ha realizado inversiones para la investigación e implantación de algunos tipos de sistemas inteligentes de transporte en su territorio a través de la Agencia Nacional de Política (NPA) (Acha y Espinosa, 2004).

Alrededor de 1970, la NPA estableció el primer centro de control computarizado de señal en Tokio y en la década de los 80, la industria automotriz japonesa colaboró en el desarrollo y lanzamiento de los sistemas vehiculares de información y navegación (Departamento de Transporte de Estados Unidos, 2014).

Además, en 1976 la NPA apoyó un proyecto denominado CACS (Comprehensive Automobile Traffic Control System) mediante el cual fue posible encontrar la evidencia suficiente para asegurar que las tecnologías emergentes de SIT traerían cambios positivos para los sistemas de transporte y beneficios para los usuarios de los mismos (Acha y Espinosa, 2004).

Bajo el mismo contexto, así como en Europa se impulsaron los proyectos PROMETHEUS y DRIVE, en Japón se tenía el AMTICS (Advanced Mobile Traffic Information and Communication System) y RACS (Road Automobile Communication System), que cumplían objetivos similares.

También se creó el *Super Smart Vehicle Systems* (SSVS) y el Next Generation Highway Traffic System (NeGHTS), en donde se integraban varias ideas para mejorar en diversos aspectos como la seguridad y el congestionamiento vial (Chen y Hyun, 1991).

Pero de acuerdo con Sayeg y Charles (2006), los logros más importantes a los que ha llegado Japón son:

- VICS (Sistema de Información y Comunicación Vehicular) puesto en marcha desde 1996, su principal objetivo es ofrecer información en tiempo real del tráfico a los usuarios de los sistemas de transporte. Cabe señalar que VICS surge como resultado del desarrollo de dos programas anteriores, RACS y AMTICS.
- UTMS (Sistema Universal de Gestión del Tráfico) cuyo objetivo es generar un intercambio de información del tráfico en tiempo real entre diferentes centros de control del tráfico.

De hecho, en Japón se elaboró un plan nacional en julio de 1996 que lleva por título Plan Estratégico para ITS en Japón, en donde se establece un esquema de despliegue de sistemas inteligentes de transporte en el país, dicho plan ha sido modificado a lo largo de los años, pero hoy en día Japón es considerado uno de los países más adelantados en cuanto a SIT, incluso por encima de Estados Unidos o algunos países europeos en ciertos aspectos (Sayeg y Charles, 2006).

En la Tabla 2.1 se muestra un resumen de los principales programas sobre Sistemas Inteligentes de Transporte que se llevaron a cabo en Estados Unidos, Europa y Japón, los pioneros en estos temas.

Finalmente, Canadá también cuentan con su propio organismo ITS, creado en 1997, algunos años después que en otros países, es una sociedad de profesionales sin fines de lucro que busca difundir los beneficios de los Sistemas Inteligentes de Transporte y brinda una plataforma de colaboración y aprendizaje (ITS-STI Canada, 2012).

ITS Canadá, cuenta con miembros tanto públicos como privados y busca promover SIT, pero coordinando los intereses de sus distintos promotores, desde su inició sus funciones han sido la investigación, desarrollo e implantación de estas tecnologías dentro de su territorio, así como brindar asesoría en proyectos en estas áreas (ITS Canadá, 2016).

Tabla 2.1. Principales programas SIT por región geográfica

País/Continente	Primer Programa SIT	Año	Programas Posteriores	Año
Estados Unidos	ERGS	1968	Mobility 2000	1987
			IVHS America	1990
Europa	ALI	1979	PROMETHEUS	1986
			DRIVE I	1989
			DRIVE II	1992
Japón	CACS	1976	RACS	1986
			AMTICS	1987
			NeGHTS	1989
			SSVS	1992

Fuente: (Chen y Hyun, 1991)

Uno de los puntos a favor de Canadá es el hecho de que se ha preocupado por desarrollar una arquitectura SIT, misma que proporciona “un marco unificado para guiar el despliegue coordinado de los programas de este tipo dentro del sector público y privado” (Sayeg y Charles, 2006). Las actividades que ITS Canadá desarrolla son muy similares a las de ITS América, de manera que han logrado llevar a cabo algunos proyectos de manera conjunta (Ministerio de Fomento Español, 2010).

Si bien es cierto que los países mencionados anteriormente han desarrollado proyectos interesantes, y cada uno ha avanzado a su propio ritmo y posibilidades en cuanto a implantación de sistemas inteligentes, en los últimos años se puede apreciar que se han hecho algunas colaboraciones entre ellos.

Desde 1997, la Unión Europea puso en marcha un extenso programa de colaboración técnica con China en varias áreas tanto industriales como tecnológicas. Por su parte, China tiene programas de cooperación con otros países como Japón, Australia y Estados Unidos (Sayeg y Charles, 2006).

La cooperación internacional se lleva a cabo principalmente entre los organismos ITS más importantes que se encuentran en los países más desarrollados en el tema como los que ya se mencionaron, por ejemplo, ITS América, ERTICO e ITS Japón.

Precisamente fue entre estos organismos que, en el año 2002, presentaron un documento en donde exponen el futuro de los Sistemas Inteligentes de Transporte, establecieron que el transporte debe estar disponible para la mayor parte de la población y esto se logrará mediante el uso de los nuevos equipos y la tecnología de comunicaciones del transporte (Sayeg y Charles, 2006).

2.3. BENEFICIOS DE LA IMPLANTACIÓN DE SIT

Los beneficios generados por la implantación de un Sistema Inteligente de Transporte son muy variados e incluyen diferentes ámbitos, enseguida se presentan algunos de ellos y se explica la forma en la que pueden ayudar a disminuir los problemas relacionados al transporte.

Resulta importante resaltar que los SIT no resuelven todas las dificultades en el ámbito del transporte, ya que a la vez se requiere de la intervención de personas en actividades complementarias de gestión y operación (Acha y Espinosa, 2004).

La mayor parte de las soluciones tecnológicas implantadas son de gran utilidad, pero es importante que su funcionamiento esté coordinado y reglamentado para poder aprovechar todos sus beneficios (Pérez, 2001).

Lo que no se puede negar, es que actualmente “el uso de las nuevas tecnologías aplicadas al transporte se ha convertido en una de las principales esperanzas en lo que a cuestiones tan vitales como el control de rutas o la gestión del transporte público se refiere” (Pérez, 2001).

En la Figura 2.1 se muestran las diferentes aplicaciones que se le han dado a los Sistemas Inteligentes de Transporte, así como los impactos que han tenido para los diferentes grupos de población, como los conductores de vehículos particulares, personas que utilizan el transporte público e incluso para el medio ambiente, etc.

Los SIT ayudan a mejorar la movilidad tanto de las personas como de mercancías, reduciendo las demoras durante los viajes que se realizan y ofreciendo medios de pago más eficientes y cómodos, entre otras ventajas (Acha y Espinosa, 2004).

También juegan un papel importante en la implantación de esquemas de restricción de tráfico tales como la aplicación de peajes a los usuarios de las vías o estrategias encaminadas a hacer un uso efectivo del espacio limitado que tienen gran parte de las ciudades, es decir, colaboran para llevar a cabo una mejor gestión de los sistemas viales y de su funcionamiento (Sayeg y Charles, 2006).

Y al maximizar la capacidad de las vialidades existentes, se reduce la necesidad de construir caminos adicionales, que ya se ha visto que finalmente no aportan soluciones a largo plazo a los problemas que se presentan (Ezell, 2010).

En todo caso, los SIT pueden convertirse en las mejores estrategias para combatir el crecimiento del parque vehicular, de la congestión del tráfico y de la contaminación, factores que se han convertido en una amenaza para la calidad de vida de la población (Pérez, 2001).

Por otra parte, las ciudades líderes en cuanto a aplicación de estas tecnologías, también “las han utilizado para que sus sistemas de transporte sean integrados en lugar de monomodales, ofreciendo mejores servicios de transporte y formulando propuestas de valor más atractivas al usuario” (Houghton, Reiners y Lim, 2009).

El simple hecho de contar con información en tiempo real sobre las diferentes rutas y sus horarios, incrementa la seguridad y confianza de los usuarios de los sistemas de transporte público, además es una herramienta que les ayuda a planificar mejor sus desplazamientos considerando las condiciones de tráfico prevalecientes en el momento de realizar su viaje (Pérez, 2001).

Estas ventajas no solamente están enfocadas a los usuarios, también se obtienen beneficios para los operadores, ya que se logra un manejo eficiente de la flota vehicular, además de importantes ahorros, por ejemplo, en combustible.

También se puede mejorar la programación de las rutas de un sistema con base al número de usuarios y otros factores, disminuyendo la mala accesibilidad y el sobrecupo que suele presentarse.

Así, los SIT son un medio eficaz para alcanzar diferentes objetivos, ya que mejorando el sistema de transporte se beneficia a cada persona individualmente, pero también a la sociedad en conjunto (Rye, 2006).

IMPACTO POSITIVO EN	VEHICULOS PARTICULARES			TRANSPORTE PÚBLICO			MANEJO FLOTAS DE TRANSPORTE				AUTORIDAD GOBIERNO		MEDIO AMBIENTE		
	TIEMPO DE VIAJE	CONFORT	SEGURIDAD	TIEMPO DE VIAJE	COSTOS DE OPERACION	CALIDAD DE SERVICIO	SEGURIDAD	TIEMPO DE VIAJE	COSTOS DE OPERACION	CALIDAD DE SERVICIO	SEGURIDAD	CALIDAD DE SERVICIO	SEGURIDAD	CALIDAD DEL AIRE	ENERGIA
APLICACIONES TELEMÁTICAS															
<i>Información vial y de tráfico</i>															
VMS, (VARIABLE MESSAGE SIGN)	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓
<i>Transporte público</i>															
LOCALIZACION DE VEHICULOS, GPS GIS				✗	✓	✗	✗					✗	✗		
PRIORIDAD AL TRANSPORTE PUBLICO				✗	✓	✗						✓		✓	✓
INFORMACION AL PASAJERO				✓	✓	✗	✓					✗	✗		
REGULACION DE FRECUENCIAS				✗	✓	✗	✓					✗	✗	✓	✓
<i>Pagos automáticos</i>															
TARJETAS INTELIGENTES PARA EL TRANSPORTE COLECTIVO				✓	✓	✗	✗					✗	✗		
PEAJES AUTOMATICOS URBANOS Y CONTROL DE ACCESO A ZONAS	✗	✓		✗		✓		✗				✗	✓		
CONTROL DE ESTACIONAMIENTOS, PAGO Y UBICACION DE ESPACIOS DISPONIBLES	✗	✗	✓	✓				✓				✓	✓	✓	✓
<i>Manejo eficiente de flotas</i>															
LOCALIZACION DE VEHICULOS, GPS GIS, SISTEMAS DE COMUNICACION MOVIL								✗	✗	✗	✗		✓	✓	✓
<i>Asistencia al conductor</i>															
NIGHT VISION Y MAPAS DIGITALES	✗	✗	✗					✗	✓	✓	✗		✗		

VACIO: SIN IMPACTO O DE POCA IMPORTANCIA ✓ : IMPACTO IMPORTANTE ✗ : GRAN IMPACTO

Figura 2.1. Beneficios de la implantación de SIT

Fuente: (Pérez, 2001)

Y es que una buena movilidad mejora la calidad de vida de la población en una ciudad y “aumenta la capacidad de los individuos y las organizaciones para contribuir al crecimiento de la economía” (Intelligent Mechatronic Systems, 2016).

Por otra parte, los SIT mejoran la preparación, prevención, protección, respuesta y recuperación en caso de que se presente una situación de desastre natural o que requiera medidas especiales de seguridad. Además de disminuir el número de accidentes de tráfico y de muertes asociadas a éstos (Houghton, Reiners y Lim, 2009).

Hasta hace algunos años, el objetivo de diversas estrategias era minimizar los daños o pérdidas, tanto humanas como materiales, debidas a los accidentes de tránsito, pero con la aparición de los SIT, lo que se busca es reducir la ocurrencia de accidentes, que si bien no se pueden eliminar completamente por formar parte de las externalidades del sistema de transporte, sí se pueden evitar muchos de ellos con la aplicación de medidas correctas y así minimizar las consecuencias de su ocurrencia con una respuesta eficaz.

Los beneficios en cuanto a seguridad no solamente están enfocados en los conductores de vehículos particulares, también se busca proteger a los peatones, ciclistas, motociclistas, en general, a todos los usuarios del sistema de transporte de una ciudad (Maccubbin et al., 2008).

De hecho, los SIT se han implantado en muchos lugares con el principal objetivo de mejorar la seguridad en las vialidades, debido a que las estadísticas indican que los accidentes de tráfico constituyen una de las principales causas de muerte en la población (Maccubbin et al., 2008).

Otro de los retos en la actualidad, es el relacionado al transporte y la contaminación, las fuentes móviles, como camiones, autobuses, automóviles particulares, etc. son señalados como uno de los principales contaminantes a nivel mundial, y la posibilidad de reducir los congestionamientos y ayudar a las personas a hacer una conducción de sus vehículos de manera eficiente, hace que los SIT también traigan consigo beneficios ambientales.

Finalmente, no se trata de dejar de utilizar los automóviles, autobuses, taxis, etc., se debe buscar la forma de mejorar la calidad del aire que se respira sin generar problemas de movilidad, para lo cual los SIT ofrecen soluciones.

2.4. TIPOS DE SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE: DESCRIPCIÓN Y EJEMPLOS

Para lograr un mejor entendimiento del funcionamiento de los SIT, conviene hacer una clasificación y de acuerdo con Sussman (2005), algunas de las categorías en las que se comúnmente se han dividido son las siguientes:

- Sistemas Avanzados de Gestión del Transporte.
- Sistemas Avanzados de Información al Viajero.
- Sistemas Avanzados de Control de Vehículos.
- Sistemas de Operación de Vehículos Comerciales.
- Sistemas Avanzados de Gestión de Estacionamientos.
- Sistemas de Predicción del Tráfico en Tiempo Real.
- Sistemas Avanzados de Transporte Rural.
- Sistemas Avanzados para el Transporte Público.

2.4.1. Sistema Avanzado de Gestión del Transporte (SAGeT)

Un Sistema Avanzado de Gestión del Transporte (SAGeT) busca reducir la congestión vehicular ayudando a mejorar la eficiencia en la utilización de la infraestructura vial existente. Los problemas que tratan son los relacionados a la congestión causada por los patrones habituales de transporte (Sistemas de gestión de la congestión), pero también aquellos causados por incidentes en las vías (Sistemas de gestión de incidentes) [University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI), 2013].

Su funcionamiento y principales características se explican enseguida.

2.4.1.1. Descripción

Los principales objetivos de un SAGeT son: maximizar la capacidad disponible de las vialidades, minimizar el impacto de los incidentes, es decir, reducir las probabilidades de que éstos se produzcan, pero en caso de que ya se hayan presentado, actuar rápidamente para disminuir los retrasos asociados a ellos, y contribuir a la regulación de la demanda, proporcionando a los viajeros información actualizada que les sirva para realizar sus traslados (Mitta, Kelly y Folds, 1996).

Estos sistemas se encargan de obtener información en tiempo real (generalmente mediante sensores o videocámaras instaladas en las distintas vialidades), para después hacer el análisis correspondiente y finalmente divulgar la información mediante las tecnologías que tengan disponibles para proporcionar a los viajeros datos relevantes sobre el tráfico y de ser posible, algunas recomendaciones de viaje (Sussman, 2005).

Según Mitta, Kelly y Folds (1996), un SAGeT está integrado por diferentes subsistemas que lo ayudan a cumplir sus funciones, entre ellos se encuentran los siguientes:

- Sistema de Control del Tránsito (SACT): compuesto por un conjunto de elementos que, al interactuar y comunicarse entre sí, permiten realizar la coordinación de las señales de tránsito de manera eficiente y segura.
- Modelos de predicción: son los encargados de utilizar la información en tiempo real que se está recolectando, así como datos históricos e incluso pronósticos del tiempo si se cuenta con ellos, para predecir los flujos de tránsito de la manera más exacta posible.
- Sistema de detección y localización de incidentes: captan y verifican la ocurrencia de incidentes en las vías y se encarga de determinar su localización exacta.
- Sistemas de asesoramiento y respuesta a incidentes: ayuda a determinar las acciones que se deben llevar a cabo una vez que se ha presentado un incidente, por ejemplo, informar a los usuarios de la red del acontecimiento y mostrar rutas alternas, o en ciertos casos, ordenar el cierre completo de la vialidad de ser necesario.
- Sistema de diseminación de la información: encargado de hacer llegar la información del tránsito a todos los usuarios del sistema de transporte, esto se puede hacer mediante letreros de leyenda variable, vía internet o mediante el uso de algún dispositivo electrónico.
- Sistemas de planificación de transporte intermodal: tienen la capacidad de hacer una simulación de las diferentes configuraciones que se pueden presentar en una red vial, con la finalidad de lograr una mejor planeación de su funcionamiento o para hacer una intervención adecuada ante la presencia de eventos especiales.
- Sistema de gestión de datos: encargado de verificar la validez e integridad de los datos recolectados por los sensores en las vialidades. Asimismo, deberá archivar todos estos datos para usarlos cuando se requiera.
- Sistemas de apoyo a la comunicación: sirve para gestionar la comunicación dentro de un mismo centro de control de tránsito o incluso entre dos o más de ellos y otras entidades externas a un SAGeT.

Cabe señalar que el Sistema de Control del Tránsito, representa uno de los subsistemas de mayor relevancia dentro del SAGeT, y a su vez está compuesto por diferentes elementos, entre los que se encuentran: dispositivos instalados en las vialidades para obtener información en tiempo real de la situación del tránsito, como cámaras o sensores, además de los semáforos y los controladores semaforicos, los sistemas de comunicación y el centro de control.

El centro de control es el lugar donde se recibe toda la información recabada por los diversos dispositivos que se localizan en las vías y se utiliza, entre otras cosas, para hacer una adecuada coordinación de las señales de tráfico dependiendo de la situación del tránsito prevaleciente en el momento, y para proporcionar datos a los usuarios del sistema de transporte en general.

En la Figura 2.2, se muestra de manera general el funcionamiento de un SAGeT, se representan los detectores y videocámaras instalados en las vialidades, dispositivos que recolectan información que es recibida en el Centro de Control del Tránsito, es importante señalar que la comunicación entre éstos, se debe dar de manera continua y en el menor tiempo posible, en la figura se indica que debe ser en un tiempo máximo de 2 minutos, de esta manera, es posible detectar cuando se presenta algún accidente y poder actuar de manera oportuna. Lo que se busca es minimizar las externalidades y afectar lo menos posible a los conductores de los demás vehículos, es por eso que se les envía la información en tiempo real para advertir del conflicto que se presentó y evitar que continúen en la misma ruta donde se tiene el problema.

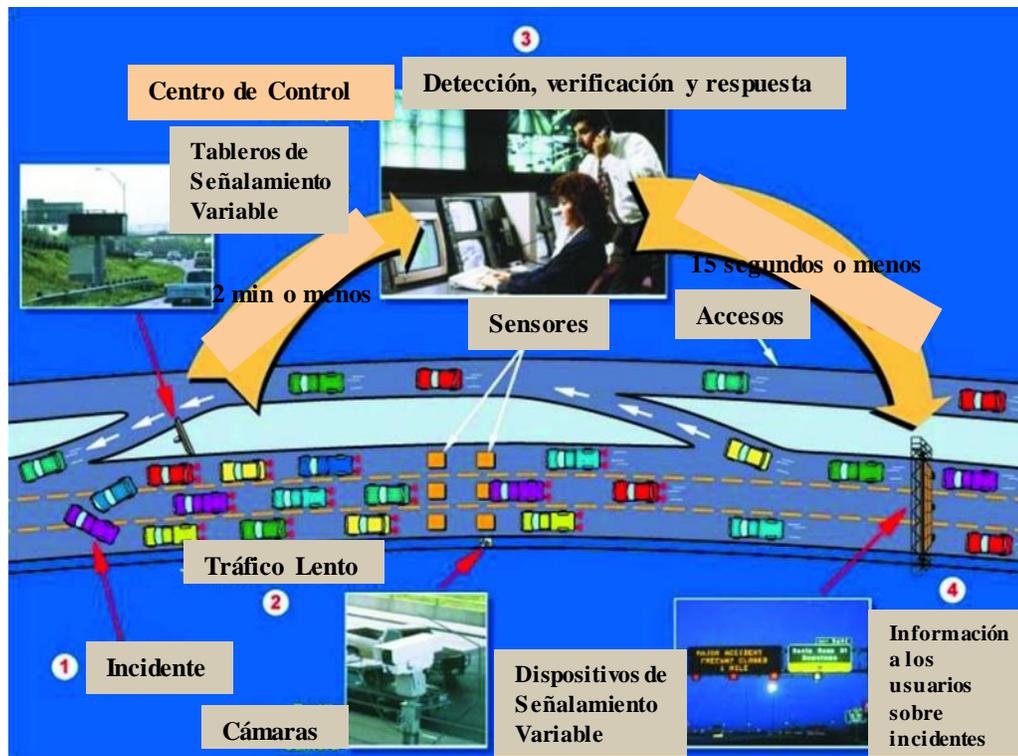


Figura 2.2. Funcionamiento de un SAGeT
Fuente: (Southwest Research Institute, 2016)

2.4.1.2. Ejemplo de aplicación: Japón

Uno de los primeros países en implantar este tipo de sistemas fue Japón, comenzó a desarrollar ambiciosos programas para mejorar la operación del sistema de transporte en sus vialidades desde hace algunos años.

En 1970 se estableció un Centro de Información del Tránsito (JARTIC), cuyo propósito era obtener información relacionada con el transporte en las vialidades mediante diversos dispositivos para después poder proporcionarla a la población en general (Takeyama y Sakamoto, 1996), dicho centro ha sido actualizado constantemente buscando que sea capaz de adecuarse a las necesidades y tecnologías que han surgido.

El proceso se da de la siguiente manera: toda la información que se genera tanto por los equipos instalados en las vías como por otros organismos es recolectada en el JARTIC, mismo que se encuentra en comunicación con otros centros especializados, como el Centro de Información y Comunicación Vehicular (Taniguchi, 2012).

Por su parte, el Centro de Información y Comunicación Vehicular, al recibir la información proveniente del JARTIC, además de otra que se le envía directamente, como la relacionada a la disponibilidad de lugares de estacionamiento, se encarga de procesarla y editarla para dejarla en condiciones de ser enviada mediante diferentes medios a los usuarios de las vías (Hollborn, 2002).

La transmisión de la información se puede dar por medio de estaciones de radio, infrarrojos o microondas (Vehicle Information and Communication System, 2016).

Las estaciones de radio transmiten información sobre la situación vial de la región y también en las áreas circundantes, dos veces cada cinco minutos (Hollborn, 2002).

Y para los casos de infrarrojos y microondas, se instalan dispositivos en las vialidades, como se muestra en la Figura 2.3, capaces de enviar la información necesaria a los dispositivos a bordo de los vehículos, y así cumplir con el objetivo de informar a los automovilistas sobre los congestionamientos, tiempos de viaje, restricciones debidas a accidentes, construcciones o condiciones climáticas (Vehicle Information and Communication System, 2016).

El esquema general del funcionamiento de este sistema se muestra en la Figura 2.4, pero como ya se vio, implica todo un proceso de recolección y análisis de datos antes de llegar a los resultados finales.



Figura 2.3. Equipos necesarios para la transmisión de información
Fuente: (Oki Electric Industry, 2011)



Figura 2.4. Funcionamiento sistema avanzado de gestión del transporte Japón
Fuente: (Oki Electric Industry, 2011)

2.4.2. Sistema Avanzado de Información al Viajero (SAIV)

Los viajeros tienen la necesidad de recibir información precisa y oportuna para tomar las decisiones adecuadas para la realización de sus viajes, los Sistemas Avanzados de Información al Viajero (SAIV) buscan brindar una solución a esta situación (Noonan y Shearer, 1998).

De acuerdo con Sussman (2005), un SAIV proporciona datos a los viajeros, ya sea a bordo de sus vehículos, o en sus casas, oficinas, etc. La información que brinda incluye, localización de accidentes o algún otro tipo de problema vial, congestionamientos, rutas óptimas, restricciones de carriles, entre otras, enseguida se presenta la descripción general de un SAIV.

2.4.2.1. Descripción

En general, los SAIV, se dividen en dos grandes categorías, aquellos que brindan información antes del viaje y los que la proporcionan una vez que ya se está en camino al destino deseado. De cualquier forma, la información puede ser distribuida utilizando diversas tecnologías de comunicación (Noonan y Shearer, 1998).

Ambas categorías, pueden traer impactos positivos, la disponibilidad de información antes de realizar un viaje, ayuda a hacer una mejor planificación y tomar decisiones con base en información actualizada al momento, y la orientación cuando ya se está en una ruta, puede ahorrar tiempos de viaje, evitar los congestionamientos viales o mejorar el rendimiento de la red de transporte en general (Noonan y Shearer, 1998).

Para cumplir con su objetivo principal, un SAIV debe llevar a cabo dos procesos, primero recopilar la información y después difundirla. La recolección de datos requiere de un complejo sistema de vigilancia con cámaras, dispositivos de detección de vehículos o sensores de tráfico, etc. Sin embargo, estos datos como ya se señaló anteriormente, tienen muchos más usos (Kristof, Lowry y Scott 2005).

Por otra parte, para llevar la información hasta los usuarios se suelen utilizar diferentes métodos, generalmente no se emplea uno solo sino varios al mismo tiempo, por ejemplo, páginas de internet, aplicaciones en teléfonos celulares o pantallas instaladas en las estaciones de los diferentes sistemas de transporte, entre otras, esto debido a que cada uno de los métodos es capaz de llegar a una porción diferente de los viajeros, buscando así una mayor cobertura (Kristof, Lowry y Scott 2005).

Con los SAIV, “cada viajero individualmente y la red de transporte en general, pueden ser más productivos” (Levinson, 2003). Los viajeros ahorran tiempo al tomar mejores decisiones dependiendo de las condiciones que prevalezcan al momento de realizar su recorrido, mientras que la red por su parte, mejora su rendimiento.

Los SAIV ayudan a un sistema de transporte de diferentes formas, por ejemplo, distribuyendo la demanda a diferentes rutas y horas del día, atrayendo más pasajeros y usando la capacidad existente de una manera más adecuada (Departamento de Transporte de Estados Unidos, 2005).

Se ha comprobado que las personas sí modifican sus rutas de viaje con base en la información que un SAIV les proporciona, el tipo de cambio que realizan depende del momento en el que reciben los datos (antes del viaje o en ruta) y la tecnología que tengan a su disposición (Departamento de Transporte de Estados Unidos, 2005).

En la Figura 2.5, se muestra el funcionamiento a grandes rasgos de un SAIV, en el que mediante la información recolectada gracias a diferentes dispositivos, se brinda a los usuarios información relacionada a: retrasos en los diferentes sistemas de transporte, accidentes que se han presentado, tiempos de viaje o rutas alternativas, buscando que así, las personas puedan cambiar su ruta, el modo de transporte que utilizarán, la hora de salida o de ser posible, el destino de su viaje, cuando sea necesario.

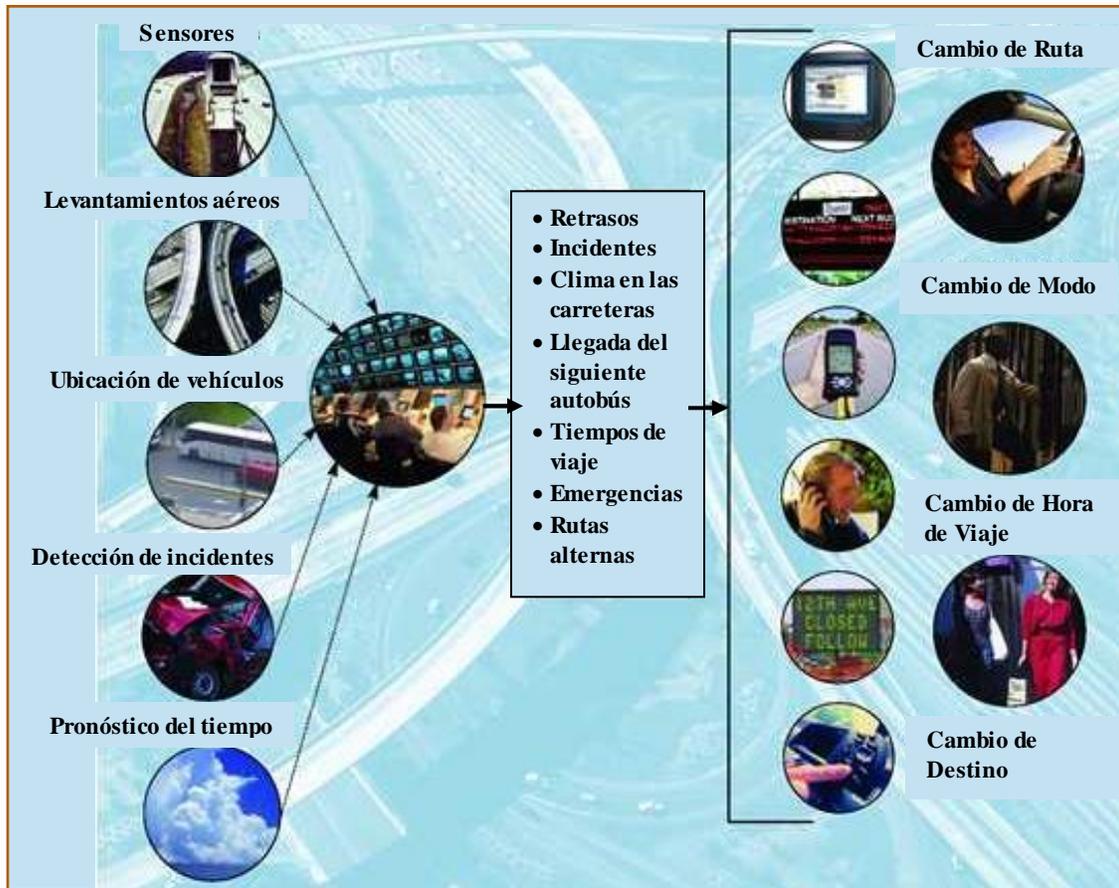


Figura 2.5. Funcionamiento de un SAIV
Fuente: (Departamento de Transporte de Estados Unidos, 2005)

2.4.2.2. Ejemplo de aplicación: Canadá y Francia

Un ejemplo de Sistema Avanzado de Información al Viajero es el proyecto que se desarrolló en Canadá, específicamente en Columbia Británica, denominado DriveBC, mediante el cual se le brinda información en tiempo real a la población acerca de las condiciones de tráfico en las vialidades, además de datos sobre el clima (ITS Products, 2015).

DriveBC busca generar un transporte seguro y eficiente, tanto de personas como de mercancías, por lo que la información que se va generando, es presentada a la población mediante su página web o también a través de un servicio telefónico automatizado y gratuito (DriveBC, 2016).

Cabe señalar que, la información sobre las condiciones de la vía y los incidentes es recolectada por organismos gubernamentales encargados de la operación de las vialidades de la región, mientras los datos climatológicos se obtienen gracias a las estaciones meteorológicas instaladas, mismas que están a cargo del Ministerio de Medio Ambiente de Canadá (ITS Products, 2015).

En la Figura 2.6, se presenta el portal de DriveBC, en donde se muestran los incidentes viales, además se indican algunas vías que han sido cerradas parcialmente por mantenimiento, tanto las que están en esa condición el día de la consulta, como aquellas que ya se tienen programadas para algunos días posteriores, también se especifica el horario en el cual se mantendrá dicha situación, y es posible checar las condiciones climatológicas pronosticadas.

Además, en la misma página web es posible ver los mensajes que se muestran mediante los sistemas de leyenda variable que se tienen instalados.

Finalmente, se visualizan imágenes en tiempo real de algunas vialidades, se especifica que mientras algunas de las imágenes se están actualizando en intervalos de entre 15 y 30 minutos, otras lo hacen cada 1 o 2 minutos (Figura 2.7), se pueden consultar las imágenes de un día anterior, mismas que se reproducen en forma de video, lo cual se hace en la misma página web mediante una función llamada “Replay the Day”.

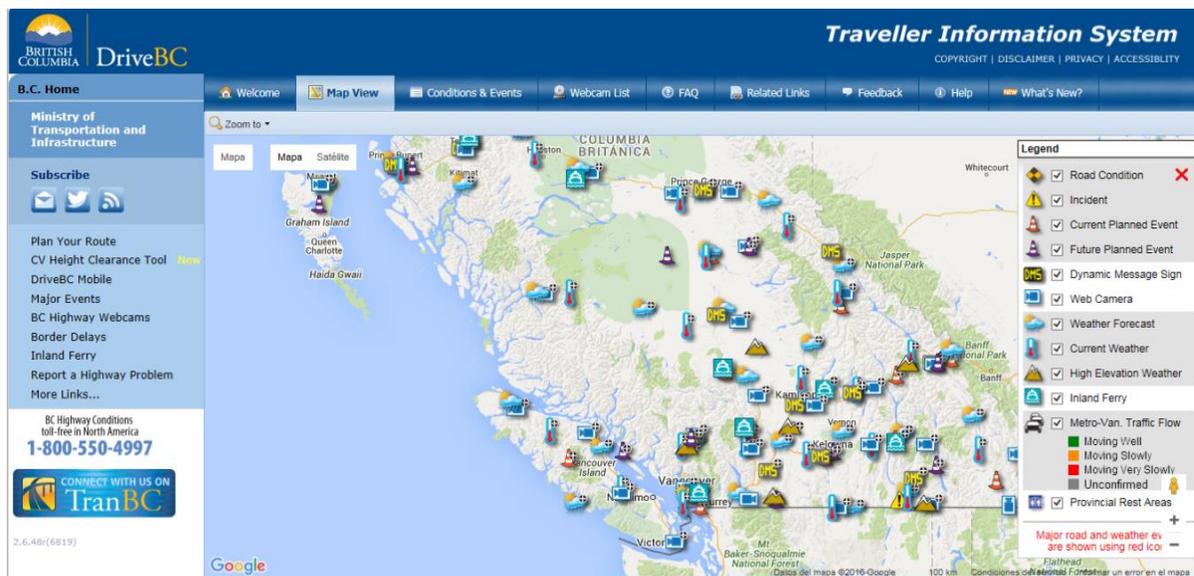


Figura 2.6. DriveBC
Fuente: (DriveBC, 2016)

BC HighwayCams - Highway 97 (Northern Region)

[This page will reload in 102 seconds \(click to stop\)](#); Northern, Southern Interior and Vancouver Island images will update every 15 to 30 minutes; Lower Mainland images will update about every two to four minutes.



Figura 2.7. Imágenes en tiempo real
Fuente: (DriveBC, 2016)

Por su parte, en Francia también se cuenta con un sistema de este tipo, en su caso, la compañía encargada de proveer estos servicios de información de tráfico en tiempo real es Mediamobile, una filial del grupo TDF (Télédiffusion de France), ellos comercializan sus servicios bajo la marca de V-Traffic, y han trabajado en otros proyectos en diversos países europeos como: Alemania, Suecia, Finlandia, Noruega, Dinamarca y Polonia (Mediamobile, 2013).

Mediamobile se encarga de recopilar datos del tráfico en tiempo real desde diferentes fuentes, tanto públicas como privadas, después distribuye la información para que la población la pueda consultar, y lo hace a través de diferentes medios, por ejemplo, radio, televisión, aplicaciones para teléfonos celulares o vía internet (Mediamobile, 2013).

En la Figura 2.8, se muestra la información que se presenta en la página web de V-Traffic Francia, al igual que en el ejemplo pasado de Canadá, es posible verificar incidentes que se han presentado en las vialidades, algunas restricciones de circulación, como cierre de carriles debido a mantenimientos, además de los horarios contemplados para realizar los trabajos.

Este sistema también ofrece la opción de ver a través de internet lo que están grabando las cámaras que se tienen instaladas en algunas zonas, primero se despliega una pestaña en donde se presenta el conjunto de cámaras que se tienen disponibles y se indica el nombre de la vía en la que se encuentran para que el usuario puede seleccionar alguna de ellas, una vez que se hace la elección, se muestra un video en tiempo real a través del cual es posible cerciorarse a la situación del tráfico en esos instantes (Figura 2.9).

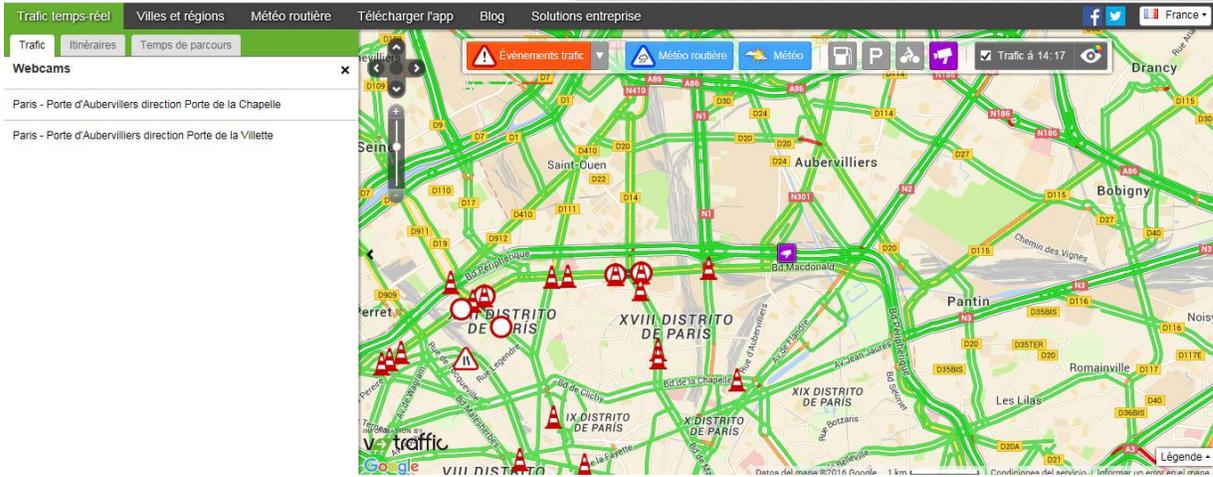


Figura 2.8. Sistema V-Traffic en Francia
Fuente: (V-Traffic, 2016)

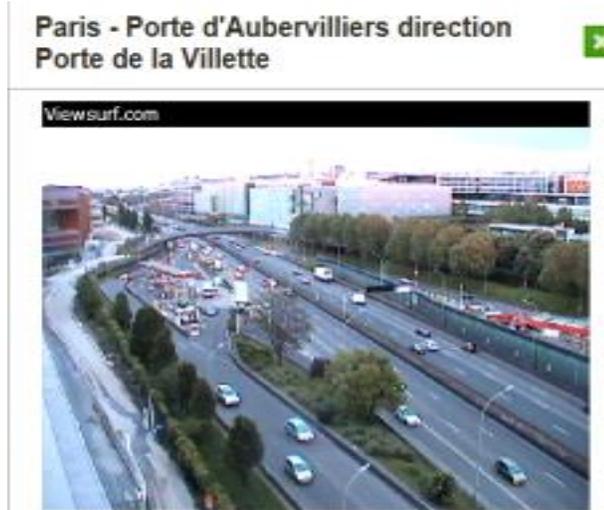


Figura 2.9. Cámaras instaladas en vialidades (Francia)
Fuente: (V-Traffic, 2016)

2.4.3. Sistema Avanzado de Control de Vehículos (SACV)

Los Sistemas Avanzados de Control de Vehículos (SACV) están orientados a complementar el trabajo que hace el conductor de un vehículo, un automovilista promedio tiene un tiempo de reacción ante algún incidente, obstáculo o señalización en la vía, de 2.5 segundos, con un sistema de este tipo, este tiempo puede reducirse significativamente, además de ayudar a elevar el nivel de seguridad que se tiene al conducir (Goldsmith, 1998).

En el apartado siguiente se explica la manera en la que funciona un SACV y las principales ventajas que traen consigo.

2.4.3.1. Descripción

Un SACV no solo mejora la precisión en la conducción de un auto, genera también un uso más adecuado del espacio vial, es cierto que, por la dinámica del flujo del tránsito y las características propias de cada vehículo, se requiere cierto espacio para operar correctamente, pero gran parte del espacio entre vehículos se debe a las precauciones que toman las personas tras el volante (Goldsmith, 1998).

Dentro de los SACV se encuentran: los sistemas de prevención de colisiones longitudinales, laterales y en los cruces, sistemas para mejorar la visibilidad del automovilista y algunos dispositivos de emergencia que anticipan una colisión inminente y activan los sistemas de seguridad [National Agency for Automotive Safety & Victim's Aid (NASVA), 2016].

Según NASVA (2016), algunos ejemplos de SACV son:

- Sistemas de frenado: mediante un radar se detectan obstáculos en la vía y se le envía una advertencia al conductor para evitar una posible colisión (la indicación se puede dar de manera acústica, visual o ambas), además en caso de que el choque sea inevitable, se activa un sistema de frenado automático para reducir las lesiones que puedan sufrir los pasajeros del vehículo.
- Sistema de asistencia para mantenerse en el carril: apoya al conductor en el manejo del volante para reducir las maniobras que debe hacer, busca que el vehículo se mueva dentro de los límites de su carril.
- Sistema adaptativo del control de la velocidad y del frenado: mientras se mantiene la velocidad a la que se maneja el vehículo, un radar puede detectar los vehículos que circulan alrededor de él y busca mantener una distancia apropiada con el vehículo delantero más cercano.

La situación ideal es que se logre establecer una conectividad entre vehículos, es decir, que las unidades cuenten con dispositivos que les permitan mantener una comunicación entre ellos para generar mayores beneficios, tales como la reducción de la congestión y un aumento en la seguridad, al reducir las cifras de accidentes viales (ITS International, 2012).

En la Figura 2.10, se muestra un ejemplo de la comunicación que se puede dar entre automóviles en una vialidad, se observa que de esta manera es posible enviar información a los demás conductores para que tomen mejores decisiones sobre sus rutas, pero es indispensable que todos los vehículos estén en condiciones para recibir los datos.

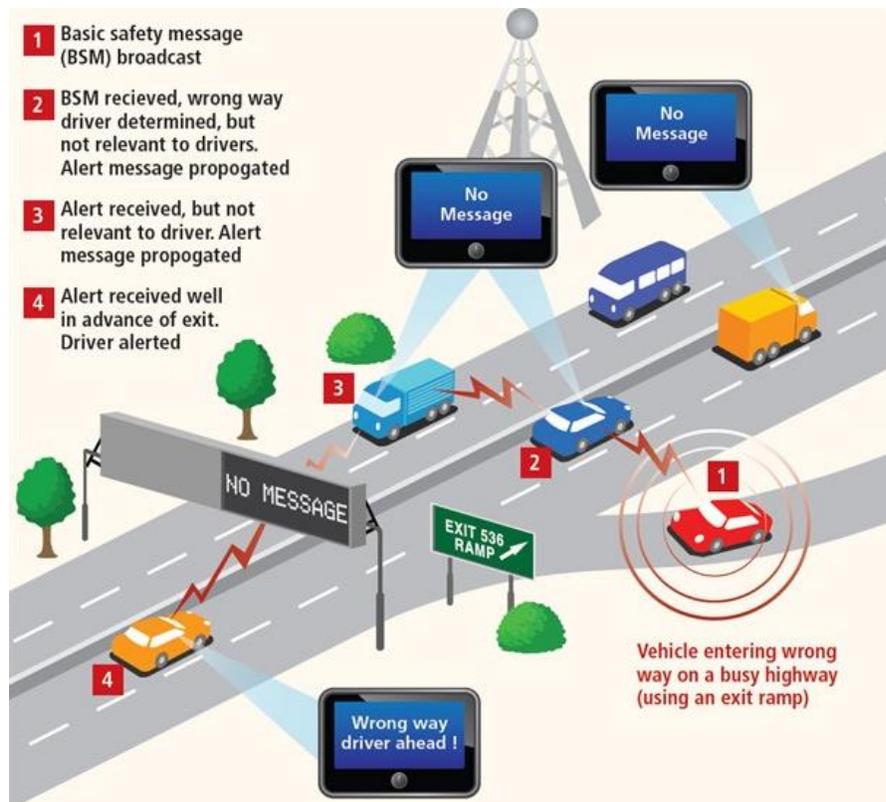


Figura 2.10. Comunicación entre vehículos SACV
Fuente: (ITS International, 2012)

2.4.3.2. Ejemplo de aplicación: Eco-Drive

Como se mencionó anteriormente, los Sistemas Avanzados de Control de Vehículos buscan ayudar a los conductores a desempeñar mejor su papel dentro del vehículo y tienen aplicaciones en diversas áreas, como frenado automático, sistemas adaptativos del control de la velocidad, pero también existen algunos que buscan controlar la emisión de contaminantes.

Una de estas aplicaciones es EcoDrive, que se convirtió en un dispositivo “capaz de interactuar directamente con los conductores y que puede ayudarles a cambiar sus hábitos de conducción para reducir las emisiones de sus vehículos” (Microsoft Environment, 2009).

EcoDrive está basado en un sistema Bluetooth llamado Blue&Me. En los automóviles equipados con este sistema, se valora la forma de conducir del automovilista. “La manera en que acelera, frena y cambia de marchas es medida automáticamente y analizada con el objetivo de reducir el consumo de combustible y las emisiones” (Esteban, 2008).

Dicha aplicación funciona de la siguiente manera: en una computadora el usuario instala un programa donde establece las principales características de su vehículo, al momento de realizar algún viaje, conecta un dispositivo USB a un puerto ubicado en el salpicadero o guantera del automóvil, al terminar su recorrido lo desconecta y en la computadora podrá descargar toda la información referente a su último recorrido (García, 2008).

De esta manera, el usuario puede analizar su consumo de combustible y emisiones generadas, mediante un índice denominado EcoIndex (Esteban, 2008).

Actualmente se cuenta con una nueva versión de EcoDrive, llamada EcoDrive Live, un sistema integrado a bordo de los vehículos, mediante el cual es posible tener toda la información que se está generando durante el viaje pero en tiempo real, es decir, ya no es necesario esperar hasta tener acceso a una computadora para descargar todos los datos recolectados durante un recorrido (Castro, 2012).

Mediante una pantalla touchscreen de 5" (Figura 2.11), EcoDrive Live va mostrando los valores de cuatro parámetros fundamentales del modo de conducir:

- Aceleración.
- Desaceleración.
- Cambio de marcha.
- Variación de velocidad.

Después otorga una puntuación en estos aspectos, que va de una a cinco estrellas, con base en esto se obtiene el EcoIndex, pero el sistema también va brindando algunos consejos al conductor, por ejemplo, los momentos exactos en los que debe realizar los cambios en las funciones de manejo (Sandoval, 2014).



Figura 2.11. EcoDrive
Fuente: (Fiat, 2016)

2.4.4. Sistema de Operación de Vehículos Comerciales (SOVC)

Los Sistemas de Operación de Vehículos Comerciales (SOVC) aplican varias de las tecnologías de los SIT para mejorar la operación y seguridad de los vehículos comerciales y flotillas, ayudan a tener una mayor seguridad, acelerar las entregas, ser más eficientes operativamente, responder de manera adecuada ante algún incidente y reducir los costos operativos (Artemio y De la Torre, 2006).

Enseguida se explican las principales características de estos sistemas y la forma en la que trabajan para cumplir sus objetivos.

2.4.4.1. Descripción

Uno de los objetivos de un SOVC, es generar un estado de seguridad tanto en el vehículo como para los emisores y/o receptores de la carga o material que se transporta.

De acuerdo con Artemio y De la Torre (2006), los SOVC utilizan tecnologías tales como:

- Identificación automática de vehículos
- Clasificación automática de vehículos
- Localización automática de vehículos
- Pesaje en movimiento
- Computadoras a bordo
- Comunicación en dos sentidos en tiempo real
- Transmisiones digitales de tráfico en tiempo real
- Horarios y rutas dinámicas en redes

Mediante estos sistemas, como se muestra en la Figura 2.12, cada vehículo será capaz de comunicar su ubicación en tiempo real, para lo cual son necesarios dos elementos básicos, un dispositivo a bordo de las unidades, (por ejemplo, GPS) y un centro de control central que sea capaz de recibir y analizar los datos (Carbonell, 2003).

En este centro se realiza la planificación de las operaciones, basándose en estadísticas de recorridos, personal, salarios, etc., con ello se elaboran estrategias para lograr la “reducción de recorridos en vacío, optimización de itinerarios, reducción de horas de personal, economía de combustibles, rápida respuesta frente a emergencias, mejor servicio al cliente” (Carbonell, 2003), entre otras.

Además, el mismo conductor del vehículo, puede estar al tanto, durante todo el recorrido, del estado de la carga que transporta y del funcionamiento del mismo vehículo, para poder dar aviso ante cualquier problema que se presente (Espinoza, s.f.).

La gestión de flotas es una actividad de gran importancia en cualquier organización, por pequeña que ésta sea, sirve para garantizar que los vehículos con los que se cuenta están siendo utilizados de manera eficiente para realizar su trabajo (Rye, 2006).

Estos sistemas también son gran importancia cuando se trasladan materiales peligrosos, ya que, por las características de éstos, cualquier problema podría generar graves daños, por lo que se debe tener un control de la ubicación de la unidad para ser capaces de responder rápidamente y de manera adecuada ante cualquier eventualidad para evitar daños mayores (Espinoza, s.f.).

Lo que se busca a través de los SOVC es establecer procedimientos para evitar riesgos durante los recorridos, garantizando incluso disminución de ciertos costos, además de la creación de redes clave con servicios de emergencia, bomberos, ambulancias, etc. para dar una respuesta coordinada ante cualquier incidente, es decir, se debe contar con un plan de acción bien estructurado (Carbonell, 2003).

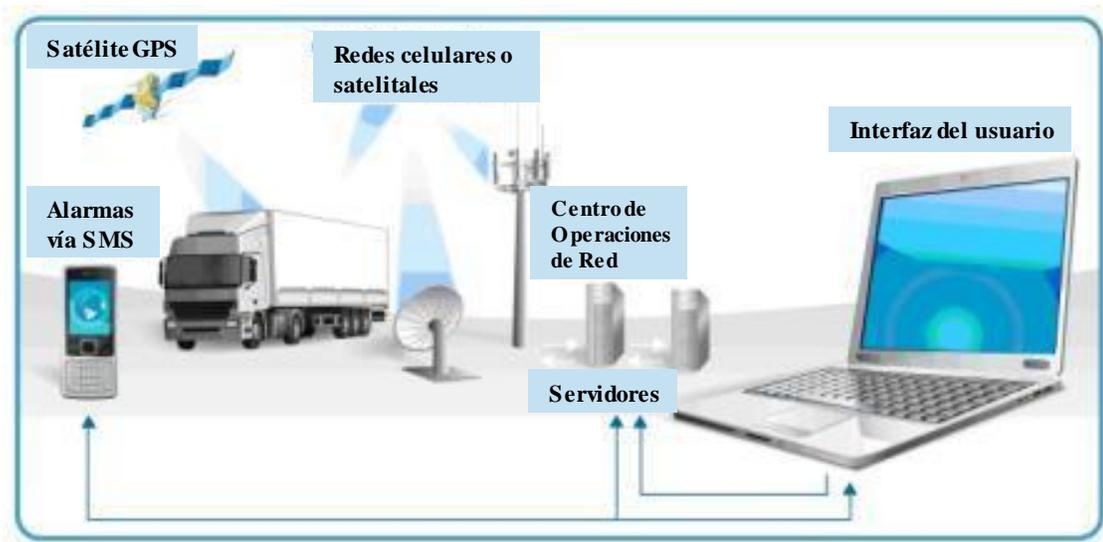


Figura 2.12. Funcionamiento de un SOCV
Fuente: (Planetpin, 2015)

2.4.4.2. Ejemplo de aplicación: Omnitracs, Encontrack y Flotasnet

Enseguida se presentan ejemplos de empresas que se encargan de la implantación de SOVC y algunos trabajos que han desarrollado.

La empresa Omnitracs ya se encuentra llevando a cabo proyectos en México y ofrece “soluciones de seguridad y logística para la industria de transporte que buscan la seguridad de la carga y gestión de flotas, incluyendo aplicaciones de *software*, *hardware* y servicios de información” (Omnitracs, 2016).

Entre sus servicios, se encuentra la localización de las unidades mediante el sistema de navegación GPS, permite la comunicación entre el operador del vehículo y un centro de control de la compañía, además de generar reportes históricos de mensajes y posiciones (Omnitracs, 2016).

También es capaz de emitir alertas cuando una de las puertas de la unidad se abre, cuenta con sensores de carga, acceso a la información generada mediante internet y ofrece cobertura en México, Estados Unidos y Canadá.

En la Figura 2.13, se muestra un ejemplo de la información que se despliega mediante su página web, en donde se puede visualizar la ubicación de las unidades y el recorrido que van siguiendo, permitiendo a los encargados, supervisar que se siga la ruta planeada y otras características propias del vehículo y la carga que transporta.

Otra compañía que ofrece soluciones para la gestión de flotillas es Encontrack, también cuenta con rastreo satelital de los vehículos, que permite tener monitoreo y supervisión constante para conocer la ubicación precisa de las unidades que se encuentran realizando la distribución de mercancías (Encontrack, 2016).

Es posible también “planificar rutas mediante la instalación de un *software* [...], con el que se han logrado reducir los costos de operación” (Encontrack, 2016).

Este *software* que utilizan es producto de una alianza que establecieron con Opti-Time, una empresa francesa que se encarga de desarrollar *software* para mejorar los procesos logísticos de las empresas dedicadas al reparto de mercancías (Encontrack, 2016).

Encontrack trabaja en diversos ámbitos y ha colaborado con empresas dedicadas al transporte de pasajeros, pequeños, medianos y grandes transportistas, flotillas de empresas, taxis, financieras, etc.

Finalmente, la compañía Flotasnet también proporciona herramientas para la localización, control y gestión de flotas, minimización de costos, entre otros (Flotasnet, 2013).

Entre los principales servicios que esta empresa ofrece están: el seguimiento en tiempo real de la mercancía, control para evitar posibles robos, trazabilidad de la carga, además del control de entregas y recepción de mercancías, pero también permite elaborar un plan de ayuda para los conductores buscando que realicen un manejo de la unidad que permita la reducción del consumo de combustible y se evite el desgaste prematuro de las unidades (Flotasnet, 2013).

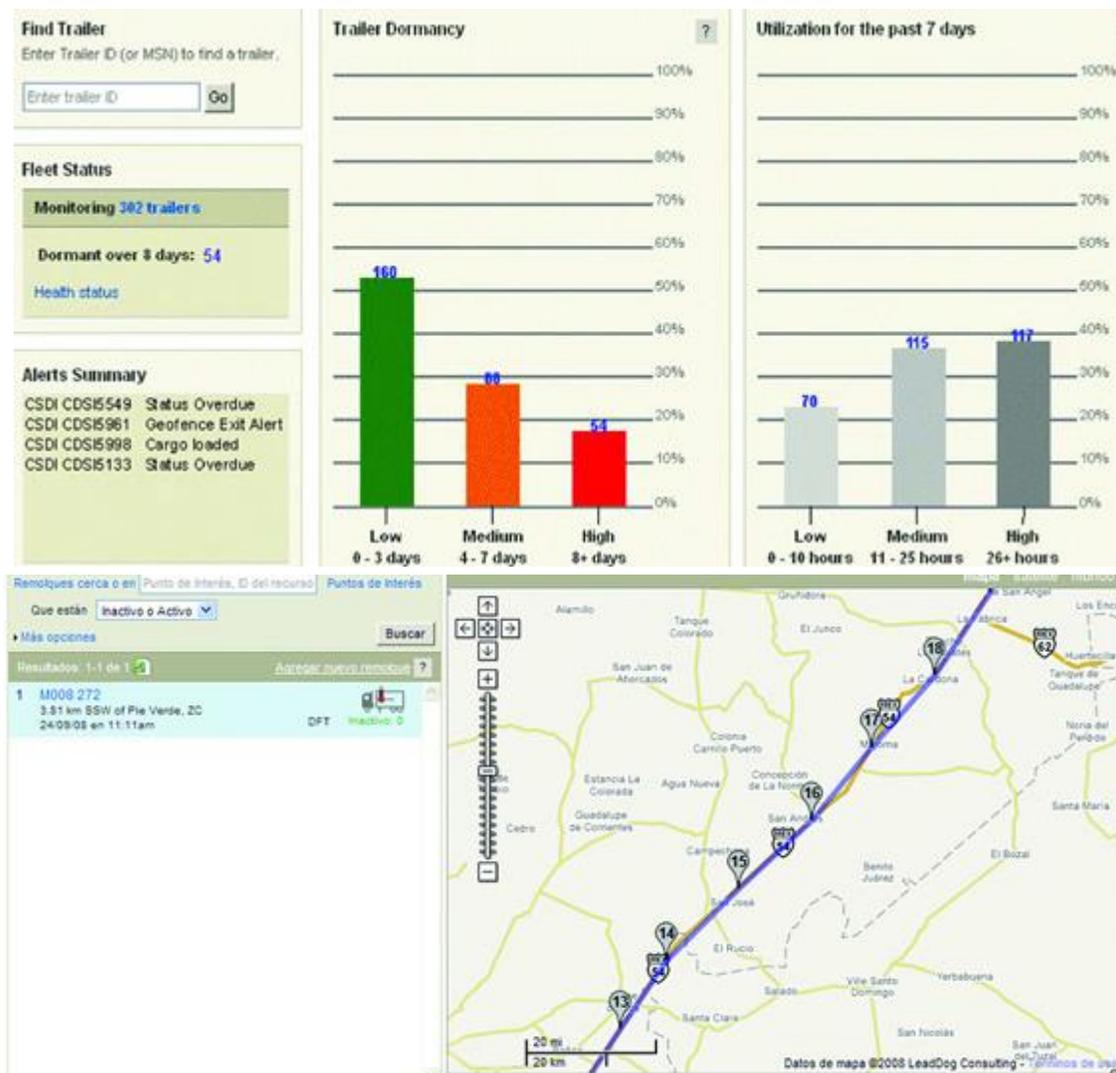


Figura 2.13. Servicios de Omnitrac
Fuente: (Omnitracs, 2016)

A través de una computadora que cuente con conexión a internet, el encargado de la flota puede hacer la gestión de la misma, lo que ofrece la plataforma Flotasnet es un acceso a un número ilimitado de usuarios, mantenimiento online de la información relacionada a la flota, cartografía de Google Maps y el envío y recepción de información a través de teléfonos inteligentes, correos electrónicos o informes programados (Flotasnet, 2013).

En las Figuras 2.14 y 2.15 se muestran ejemplos de la información que puede estar recibiendo la empresa sobre sus unidades a lo largo de sus rutas.



Figura 2.14. Plataforma Flotasnet
Fuente: (Flotasnet, 2013)

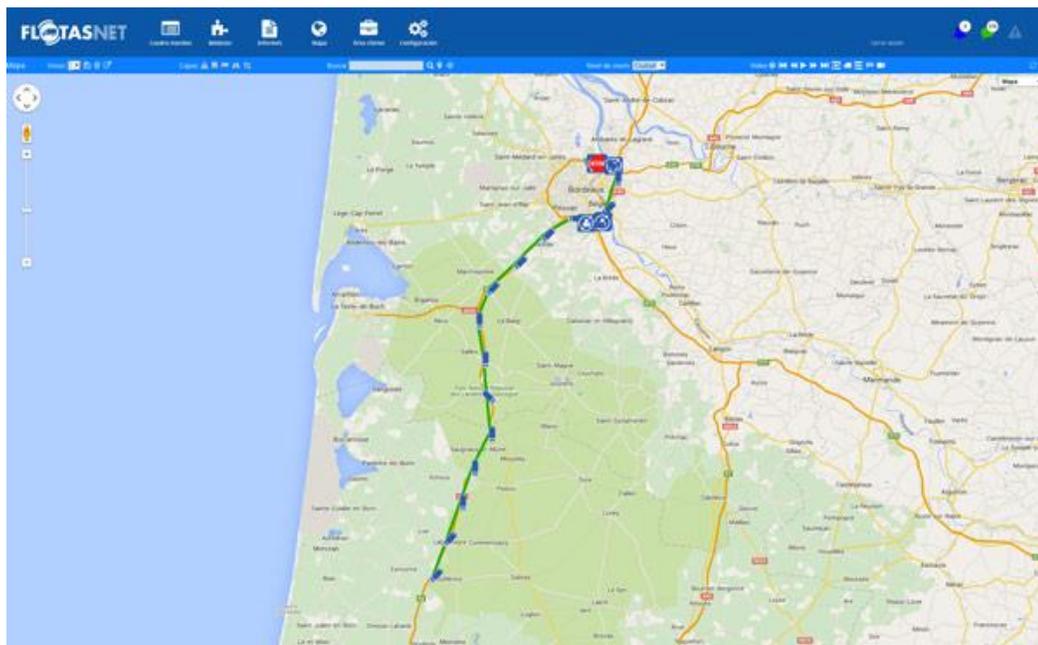


Figura 2.15. Seguimiento en tiempo real
Fuente: (Flotasnet, 2013)

2.4.5. Sistema Avanzado de Gestión de Estacionamientos (SAGE)

A medida que se incrementa el parque vehicular en una zona, también los problemas de estacionamiento van en aumento, y es que dejar vehículos detenidos en algún lugar equivocado puede causar diversos problemas como: congestión, colas, accidentes y por supuesto, el uso ineficiente de la vialidad (Singh y Sharma, 2012).

Los Sistemas Avanzados de Gestión de Estacionamientos (SAGE) buscan ayudar al usuario a tener información sobre los lugares disponibles en los estacionamientos cerca de su destino, así como dirigirlos para llegar en menor tiempo al sitio adecuado.

2.4.5.1. Descripción

Encontrar un lugar de estacionamiento suele ser un problema para los conductores, debido a que, aunque existan espacios disponibles, los usuarios no tienen forma de saber dónde se encuentran éstos, ni mucho menos otros datos importantes, como horarios o costos (Federal Highway Administration, 2007).

La ausencia de información oportuna y en tiempo real, ocasiona que los conductores tomen decisiones equivocadas, por ejemplo, no realizar un viaje, presenten frustración o estrés al no encontrar un lugar cercano para dejar su vehículo, lo cual puede afectar su estilo de conducción, o incluso que tomen la decisión de dejar su automóvil en lugares prohibidos (Federal Highway Administration, 2007).

Existen tres cuestiones básicas que a los conductores les interesa saber: primero si existen o no lugares de estacionamiento cerca de su destino, pero no basta con que existan, también es necesario conocer cuántos lugares vacíos o disponibles tienen, además del costo por dejar su vehículo en ese lugar (Singh y Sharma, 2012).

Los Sistemas Avanzados de Gestión de Estacionamientos ayudan a los conductores a encontrar lugares de estacionamiento disponibles, de una manera rápida, reduciendo la frustración y mejorando el nivel de servicio (Federal Highway Administration, 2007).

Los SAGE se encargan de obtener información acerca de los espacios de estacionamiento disponibles, la procesan y la presentan a los conductores mediante sistemas de leyenda variable o algún otro medio (Velmurugan, 2008).

Representan un sistema global que comprende un conjunto de dispositivos, como sensores, puertas de enlace, gestión de ingresos y el centro de *software* de notificación administrativa y analítica (Metro Infrasy, 2014).

Además de brindar información sobre la cantidad de espacios vacíos y ocupados, los sistemas avanzados de gestión de estacionamientos más sofisticados tienen señalamientos en cada nivel del estacionamiento indicando donde se encuentran los lugares disponibles, en algunos casos incluso enfrente de cada espacio se coloca un señalamiento (Figura 2.16) (Federal Highway Administration, 2007).

Algunos sistemas también permiten al usuario, elegir un espacio entre los lugares disponibles que se tienen, pagarlo por medio de su teléfono, internet o algún otro dispositivo, y de esta manera tener su lugar reservado (Federal Highway Administration, 2007).



Figura 2.16. Sistemas de Gestión de Estacionamientos
Fuente: (Skyscrapercity, 2016)

2.4.5.2. Ejemplo de aplicación a nivel mundial: Milwaukee, Estados Unidos

En Estados Unidos, uno de los principales sistemas de gestión de estacionamientos es el instalado en la ciudad de Milwaukee, Wisconsin, mediante una página web se muestra a los conductores y a la población en general, la ubicación de los estacionamientos cercanos a sus destinos (Figura 2.17).

Para esto, el usuario deberá elegir de una lista desplegable el lugar al que se dirige y en pantalla se mostrarán las opciones de estacionamiento que tiene disponibles, además se presenta información sobre las tarifas que cobran en cada uno de estos lugares, así como el teléfono y dirección exacta y el nombre del encargado del establecimiento.

Pero cabe señalar que este sistema no brinda información en tiempo real sobre los lugares vacíos con los que cuenta el estacionamiento, por lo que el principal inconveniente es que el conductor podría encontrarse con todos los espacios ocupados al momento de llegar al estacionamiento que eligió.

Por otra parte, en Alemania también se tiene un sistema de gestión de estacionamientos, ya que uno de los principales problemas a los que se enfrentaban los conductores, era el reducido espacio permitido para estacionarse en las vialidades.

Se tienen instalados algunos señalamientos que indican el lugar donde está permitido que los conductores estacionen su automóvil en las calles de la ciudad, sin embargo, estos espacios no son suficientes por lo que los conductores deben buscar estacionamientos establecidos para dejar sus vehículos sin riesgo de ser multados (Purcell, 2013).

Este sistema sí muestra en tiempo real la cantidad de espacios disponibles que se tienen en cada establecimiento para dejar los vehículos y así dirigir a los conductores hacia el lugar donde deben ir y evitar que estén dando vueltas sin encontrar un espacio disponible.

En la Figura 2.18 se puede ver uno de los señalamientos en donde se indica la dirección de los estacionamientos, así como la cantidad de lugares disponibles en cada uno de ellos.

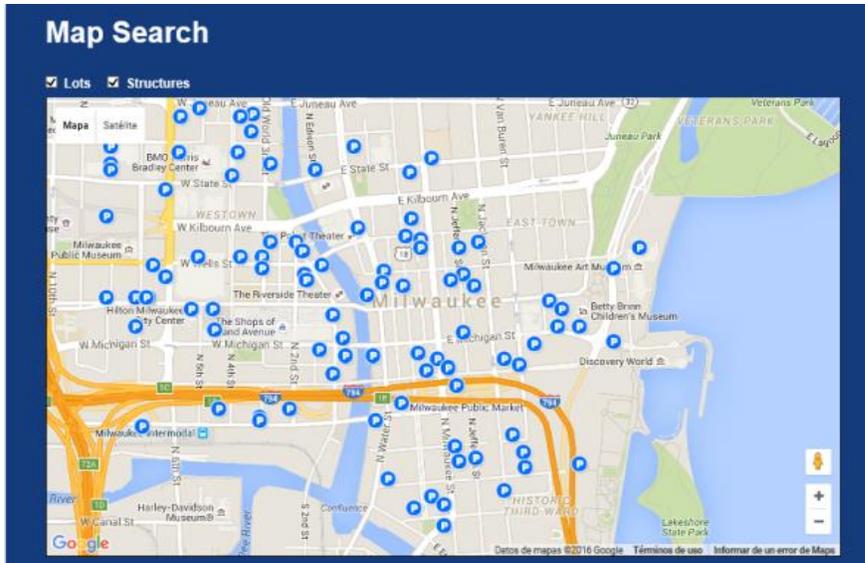


Figura 2.17. Sistema de Gestión de Estacionamientos en Milwaukee
Fuente: (Park Milwaukee, 2016)



Figura 2.18. Sistema de Gestión de Estacionamientos Alemania
Fuente: (Purcell, 2013)

2.4.6. Sistema de Predicción del Tráfico en Tiempo Real

Los Sistemas de Predicción del Tráfico en Tiempo Real forman parte de uno de los pasos críticos en la operación de un Sistema Inteligente de Transporte, lo que hacen “es crear una imagen viva de las condiciones del tráfico” (TomTom, 2012).

Pero estas predicciones implican todo un proceso para lograr acercarse a la realidad, se deben basar tanto en condiciones actuales como en datos históricos, enseguida se explica el funcionamiento de un sistema de este tipo.

2.4.6.1. Descripción

El éxito de la implantación de varias de las tecnologías asociadas a los Sistemas Inteligentes de Transporte depende en gran medida de la puntualidad y precisión de las estimaciones o predicciones de tráfico que se hagan (Madera, 2007).

Por ejemplo, los Sistemas Avanzados de Gestión del Transporte y los Sistemas Avanzados de Información al Viajero, necesitan hacer uso de los Sistemas Avanzados de Predicción del Tráfico para poder cumplir con sus objetivos principales (Madera, 2007).

Y para lograr hacer una predicción acertada, es necesario utilizar información histórica pero también información en tiempo real, con la finalidad de ser capaces de responder y hacer una mejor gestión según las condiciones que prevalezcan en el momento.

La información histórica se compone de todos aquellos datos que se reciben día con día por parte de los diferentes mecanismos de recolección, mismos que pasan a formar parte de una base de datos (García, 2015).

De esta manera, el registro histórico indica, por ejemplo, el tiempo promedio que toma a un vehículo recorrer una determinada vialidad a cierta hora y en cierto día, y lo compara con el tiempo real que se necesita en ese momento basado en sensores y demás dispositivos instalados en campo (García, 2015).

Sin embargo, uno de los problemas más comunes que se presenta, es que no todas las vías cuentan con sensores que permitan conocer el flujo y tiempos de recorrido de los vehículos que la transitan, generalmente, en el mejor de los casos, solo las vialidades principales están correctamente equipadas.

En la Figura 2.19 se muestra de manera general, el funcionamiento de un sistema de este tipo, en donde con base a los datos en tiempo real que se generan y otros que ya se tienen con anterioridad, se hace una predicción del tráfico para las siguientes horas.

Como se mencionó anteriormente, la información que mediante estos sistemas se obtiene, debe ser compartida con otros tipos de SIT para que ellos cumplan sus funciones, todo esto con el objetivo de que se haga una mejor planeación y manejo del tráfico en las ciudades.

De manera general, un Sistema de Predicción del Tráfico en Tiempo Real busca anticiparse a las condiciones futuras para identificar los problemas de congestión vial y tratar de eliminarlos o minimizarlos, en lugar de solamente responder a ellos una vez que ya se han presentado.

Es importante mencionar que todas las predicciones tienen cierto error asociado, ya que en ocasiones se presentan eventos que no se tenían contemplados, desde accidentes hasta cierres viales de diferente naturaleza, pero lo que se busca es reducir la incertidumbre que hasta hace tiempo prevalecía, sobre las condiciones del tráfico que se presentarán en las vialidades.

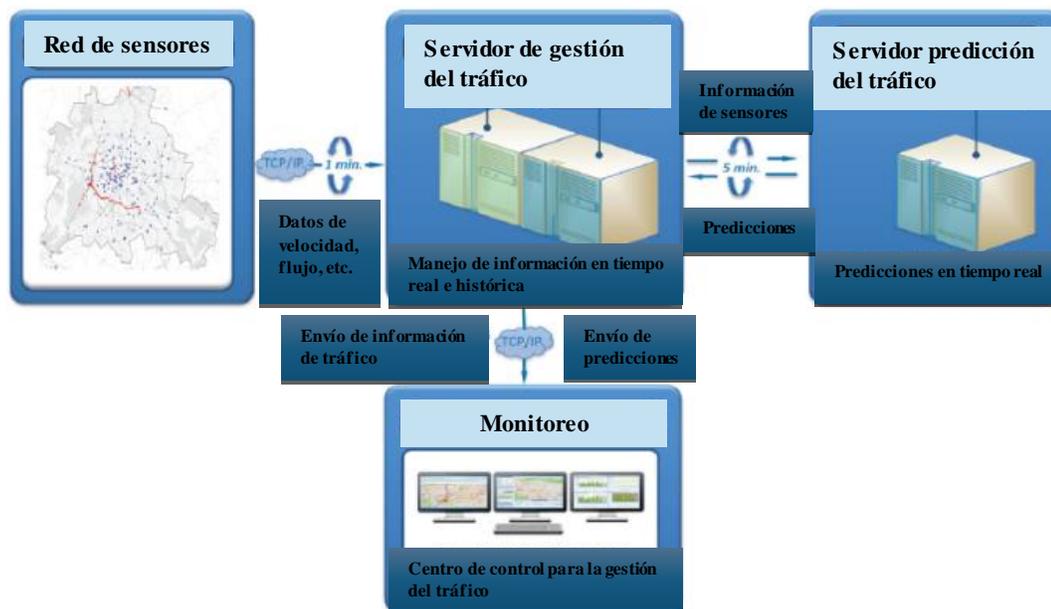


Figura 2.19. Sistemas de Predicción del Tráfico
Fuente: (Bierhoff et. al., 2013)

2.4.6.2. Ejemplo de aplicación a nivel mundial: Aimsun y Optima

Existen algunas empresas españolas que se dedican a la planificación y simulación de tráfico, y en los últimos años, aprovechando los avances tecnológicos buscan generar mejoras en los sistemas de transporte de las ciudades.

Un caso de éxito fue desarrollado en una carretera de Madrid, España, que contaba con túneles de más de 50 km. de longitud, en donde se implantó un sistema operativo especializado que ayudaría a las personas u organizaciones encargadas de dicha vía a tomar decisiones en tiempo real para resolver los problemas que se pudieran presentar (iCEX, 2016).

Para la implantación de dicho *software* fue necesaria la colaboración de una empresa de modelos de simulación de tráfico llamada *Transport Simulation Systems* (TSS) con sede en Barcelona, España, misma que ha trabajado en diversos proyectos en diferentes ciudades alrededor del mundo (TSS, 2015).

Ellos desarrollaron un programa de simulación en los años 80 llamado *Aimsun*, ya que se dieron cuenta que los modelos de simulación “que se empleaban para la planificación estratégica podían predecir el crecimiento del tráfico y la población a gran escala, pero que no servían a la hora de establecer las mejores soluciones para cambios del tráfico de pequeña envergadura” (iCEX, 2016).

Estos programas eran muy útiles, sin embargo, no se podían aplicar para hacer una gestión del tráfico utilizando información en tiempo real, como se puede notar, hoy en día cada vez en más lugares se tiene información de este tipo, por esta razón los modelos de simulación también se vieron obligados a evolucionar.

Fue así que se tomó como base el programa *Aimsun* original para desarrollar “modelos *Aimsun* a gran y pequeña escala, que pueden emplear los gestores del tráfico urbano para determinar en tiempo real, las consecuencias de cambios en el tráfico, lo que les permite adoptar decisiones rápidas basadas en previsiones derivadas de los modelos” (iCEX, 2016).

En el centro municipal de control del tráfico en Madrid, España, “las simulaciones gráficas se muestran en una pantalla, lo que permite que el controlador visualice las consecuencias de elecciones concretas a una velocidad 10 o 20 veces más rápida de lo que se produciría en el mundo real” (iCEX, 2016).

El *software Aimsun* empleado en Madrid, ahora denominado *Aimsun 8 Expert*, se ha comenzado ya a utilizar para simular el tráfico de otras ciudades en 60 países, incluida la totalidad del territorio nacional de Singapur (TSS, 2015).

Otro ejemplo de *software* de este tipo es *Optima*, creado por el Grupo PTV que ofrece servicios relacionados con datos, consultoría, investigación y *software* relacionados con el transporte tanto público como privado (PTV Group, 2017a).

Optima maneja información en tiempo real y algoritmos que le permiten proporcionar predicciones de la situación del tránsito en la red entera para los 60 minutos posteriores a la consulta (PTV Group, 2017b).

Otro *software* creado por la misma compañía, denominado *PTV Visum*, sirve para crear un modelo de transporte para un día típico, en donde se representarán los servicios de transporte y la demanda mediante matrices, para después transferir esta información a *Optima*.

Una vez en *Optima*, estos datos se combinan con la información en tiempo real que se está generando y se hacen ajustes en algunos valores, como las velocidades en las vías, para considerar la situación del tránsito que se presenta en el momento.

De acuerdo con la información presentada por *PTV Group* (2017b), *Optima* puede generar predicciones sobre:

- los impactos que pueden traer algunos incidentes o eventos no previstos.
- la situación del tránsito incluso en vialidades en donde no se cuente con sensores instalados, debido a que para hacer los cálculos toma en cuenta la estructura de la red total, el flujo del tránsito y el comportamiento de los usuarios.
- las consecuencias que generaría la elección de diferentes estrategias e incluso permite hacer comparaciones para verificar cuál es la mejor opción.

Actualmente este *software* se utiliza en Rumania y en la región italiana de Piamonte (PTV Group, 2017b).

2.4.7. Sistema Avanzado de Transporte Rural (SATR)

Conviene comenzar señalando que con el término rural se hace referencia a aquellas regiones en las que no se tiene el mismo acceso a los recursos y elementos de infraestructura como en las áreas metropolitanas, por ejemplo, algunas comunidades aisladas, centros urbanos periféricos, entre otros (Smith, 2016).

En muchas ocasiones, se considera que la implantación de sistemas inteligentes en estas zonas no es necesaria, sin embargo, en los siguientes párrafos se analiza su importancia, objetivos y principales características.

2.4.7.1. Descripción

Los objetivos principales de un Sistema Avanzado de Transporte Rural son: la reducción de los tiempos de viaje, la disminución del número y gravedad de los accidentes para minimizar las tasas de mortalidad, mejoras en el nivel de flujo, reducción de costos de transporte y mayor satisfacción de los usuarios (Acha, 2006).

Como ya se mencionaba anteriormente, la mayoría de las investigaciones sobre aplicaciones de SIT se centraron en las áreas urbanas durante mucho tiempo, se creía que las zonas rurales no constituían un tema de gran relevancia, pero desde 1991 se comenzaron a reconocer las necesidades de estas regiones y a estudiar Sistemas Inteligentes de Transporte que se adaptaran a sus particularidades (Rural ITS, 2016).

Una de las principales razones de esta preocupación, fue que se identificó que las tasas de mortalidad en las zonas rurales son mucho más altas que en las zonas urbanas, debido principalmente a que se tienen sistemas de telecomunicaciones limitados en estas regiones, por lo que “la gestión de incidencias y la difusión de la información es mucho más difícil” (Smith, 2016).

Sin embargo, el reto en la implantación de los SATR, es que en los ambientes rurales es poco frecuente encontrar niveles altos de congestión, por lo que en los estudios costo-beneficio, generalmente es difícil justificar su implantación, además las grandes distancias que se tienen que recorrer para atender algún accidente en las vías rurales implican un gran esfuerzo para los involucrados (Kumar y Albert, 2005).

De acuerdo con Smith (2016) y Rural ITS (2016), algunos de los servicios que ofrecen los SATR son:

- Gestión de emergencias: dentro de los cuales se incluyen los servicios prestados por la policía, bomberos, servicios médicos y algunas otras organizaciones relacionadas. En algunos casos, los vehículos policiales cuentan con dispositivos portátiles que les permiten automatizar los informes relacionados con accidentes.
- Información a los viajeros: se proporcionan datos relevantes a los conductores, desde condiciones meteorológicas y guía para llegar a sus destinos, hasta información sobre cierre de tramos carreteros, etc. También se pueden incluir los sistemas de pago con tarjetas inteligentes y los sistemas de leyenda variable.
- Servicios de operación y mantenimiento: sirven para tener un monitoreo de las condiciones de la carretera y poder identificar cualquier problema que se presente para actuar de manera eficiente y no interrumpir el paso de los vehículos.
- Información sobre los servicios y oportunidades en las regiones: lo que genera mejoras en la productividad de empresas, organizaciones e individuos, promoviendo el movimiento más eficiente de los bienes y vehículos comerciales.

2.4.7.2. Ejemplo de aplicación a nivel mundial: Canadá

En Ontario, Canadá, se cuenta con un Sistema Avanzado de Transporte Rural y enseguida se presentan sus principales características.

En la superficie de rodamiento de sus carreteras tienen instalados diferentes tipos de sensores mediante los cuales se puede conocer el número de vehículos que están circulando por las vías, pero también cuentan con sistemas de cámaras para monitorear la situación del tránsito en tiempo real (Ministerio del Transporte de Ontario, 2007).

Además, se tienen sensores atmosféricos que se encargan de proporcionar información sobre las condiciones climáticas, por ejemplo, velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad, entre otros (Ministerio del Transporte de Ontario, 2007).

Por otra parte, debido al clima frío que prevalece en Canadá, se consideró necesario instalar sensores especiales que permitieran conocer el estado del pavimento de las carreteras, es decir, éstos detectan la presencia de nieve o hielo en la superficie, así es posible llevar a cabo acciones para evitar accidentes debido a esta condición, pero también facilitan las labores de mantenimiento que se deben realizar, ya que permiten conocer cuáles son las vialidades más afectadas y que requieren acciones inmediatas.

Pero toda la información que se va recolectando gracias a estos diferentes dispositivos, puede ser puesta a disposición de los usuarios a través de distintos métodos, por ejemplo, mediante los sistemas de leyenda variable (Figura 2.20).

En cambio, si el usuario está por emprender un viaje y desea conocer las condiciones de la carretera, también se creó una página web, mediante la cual se tiene acceso a diferentes cámaras que muestran las condiciones de las vías en diferentes zonas, tal como se muestra en la Figura 2.21.

Por otra parte, en Canadá y en especial en Ontario desde hace algunos años se impulsó el uso de vehículos eléctricos como medida para proteger al medio ambiente, y una de las acciones que se llevó a cabo fue la apertura de una red de estaciones de recarga operadas por el gobierno (Bradley, 2009).

Es por eso que también a los usuarios se les proporcionan datos sobre las estaciones de recarga que podrán encontrar a lo largo de su recorrido, además de incidentes, cierres totales o parciales de tramos carreteros, construcciones y centros de apoyo a los usuarios (Barnet, 2014).



**Figura 2.20. Letreros de leyenda variable, Ontario, Canadá
Fuente: (Ministerio de Transporte de Ontario, 2007)**

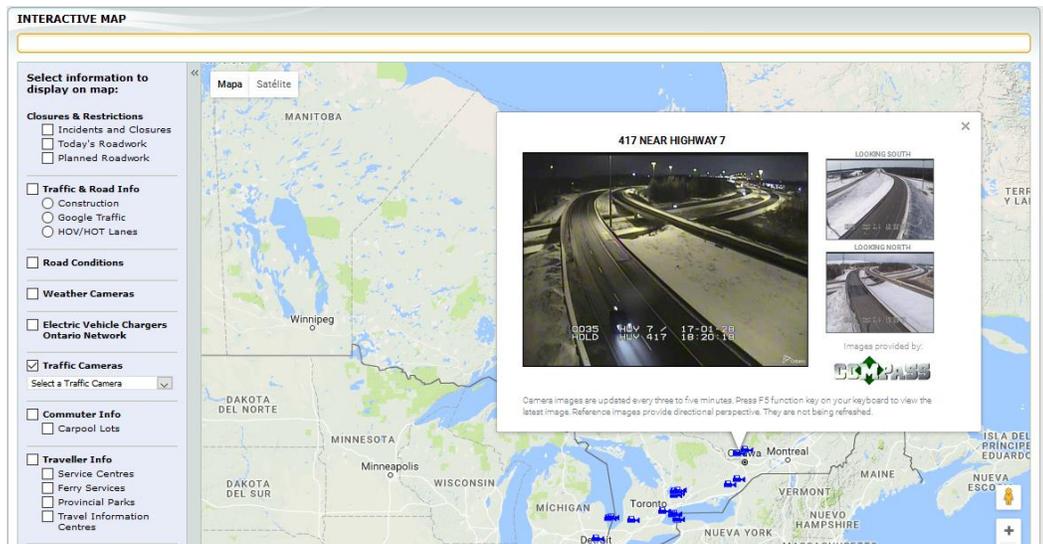


Figura 2.21. Cámaras sistema de carreteras Canadá
Fuente : (Ontario, 2017)

2.4.8. Sistema Avanzado para el Transporte Público (SATP)

Los Sistemas Avanzados para el Transporte Público representan un conjunto de tecnologías orientadas a aumentar la seguridad y eficiencia de los sistemas de transporte público de una región, buscando de esta manera ofrecer a los usuarios de los mismos, mayor acceso a la información sobre la operación del sistema (Casey et al., 2000).

Los SAPT logran cumplir sus objetivos gracias a la ayuda de otros tipos de Sistemas Inteligentes de Transporte, como los SAIV, SACV y SAGeT. En los apartados siguientes se explican las principales funciones que cumplen, sus características y algunos ejemplos de implantaciones exitosas.

2.4.8.1. Descripción

Mediante la aplicación de la telemática, los SATP pueden mejorar el desempeño de los sistemas de transporte público, que benefician tanto a los operadores de dichos servicios, como a los mismos usuarios.

Cabe señalar que la telemática es “una disciplina científica y tecnológica que surge de la evolución y fusión de la telecomunicación y de la informática” (Salazar, 2013).

Es decir, la telemática integra, por una parte:

“la capacidad de transmisión de datos e información ofrecida por las Telecomunicaciones, mediante las redes de comunicaciones para extender y ampliar el tratamiento de la información y de los datos que ocupan a la Informática” (Medina, 2008).

Entre los beneficios que se buscan alcanzar con la implantación de un Sistema Avanzado para el Transporte Público se encuentran: mayor adherencia a los itinerarios planeados por los diferentes servicios de transporte público, mejorar la eficiencia en la operación, reducir tiempos de viaje y costos de mantenimiento, además de aumentar la seguridad para los usuarios (Yang y Zhou, 2003).

De esta manera, se logra que el transporte público sea un servicio mucho más confiable y fácil de usar, por lo que se convierte en una opción más atractiva para realizar los diferentes traslados de la población.

En general, los subsistemas básicos que componen un SATP se dividen en tres grandes grupos (Adeleke, Alaro y Akinpelu, 2013):

- Bases de datos geográficos digitales: permiten la visualización de los mapas de la zona en la que se brinda el servicio, se utilizan tanto por los operadores como por los usuarios que requieren conocer la información.
- Sistemas de programación de viajes: con el principal objetivo de reducir los tiempos de espera de los viajeros en las paradas o estaciones, todo esto basado en una programación automática de las rutas para asegurar que los usuarios podrán realizar sus viajes. También guarda datos sobre pasajeros y viajes realizados.
- Equipos de localización de vehículos: permiten conocer la ubicación de las unidades de transporte público, por lo que es posible construir una visión en tiempo real del estado de todos los vehículos activos en el sistema de transporte público.

Generalmente la localización de vehículos se da por medio de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), el cual puede brindar, a través de una red de satélites y un receptor instalado en el vehículo, las coordenadas de la localización exacta de la unidad.

Pero también se puede hacer por medio de radiofrecuencias, un sistema que funciona mediante antenas y espectros de frecuencia, mismos que captan la señal que emite un dispositivo a bordo del auto (Adeleke, Alaro y Akinpelu, 2013), como estos, existen algunos otros métodos que se tratarán posteriormente.

Por otra parte, la distribución de la información en tiempo real hacia los usuarios comúnmente se hace por medio de mensajes de texto, páginas web, quioscos equipados con pantallas para que las personas consulten los datos o por medio de pantallas instaladas en las estaciones de llegada y salida de las unidades (Adeleke, Alaro y Akinpelu, 2013).

Como se puede ver, la aplicación de las tecnologías SATP es capaz de brindar a los tomadores de decisiones en el aspecto del transporte público, una mayor cantidad de información, que les sirva para elegir aquellas alternativas que realmente hagan más eficiente la operación de estos sistemas, y aumenten la comodidad y el número de usuarios de los mismos (Casey et al., 2000).

Además, un SATP es capaz de brindar a los pasajeros una mayor certeza sobre los horarios de llegada y salida de las unidades o rutas, y en esta misma categoría también se incluyen a los sistemas de pago de tarifas electrónicos, que hacen mucho más rápido y sencillo el ingreso y uso de los sistemas de transporte público (Ezell, 2010).

Es así que un SATP se vale de las diversas herramientas que ya se han mencionado dentro de los otros tipos de Sistemas Inteligentes de Transporte, pero en este caso, busca darles un uso especial para mejorar el funcionamiento de los sistemas de transporte y sus elementos.

A grandes rasgos, las tecnologías SATP pueden ser clasificadas principalmente en cinco categorías (Tabla 2.2), cada una de las cuales se compone de una variedad de opciones que están disponibles para ayudar a cumplir con las funciones del servicio (Casey et al., 2000).

Tabla 2.2. Categorías de las tecnologías SATP

CATEGORÍA	EJEMPLO
SISTEMAS DE GESTIÓN DE FLOTAS	Sistemas automáticos de localización de vehículos. <i>Software</i> de operación del tránsito. Sistemas de comunicación. Sistemas de Información geográfica. Contadores automáticos de pasajeros. Sistemas de prioridad de señales de tráfico.
SISTEMAS DE INFORMACIÓN AL VIAJERO	Sistemas de información de tráfico antes del viaje. Sistemas de información de tráfico en terminales. Sistemas de información de tráfico en los vehículos
SISTEMAS DE PAGO ELECTRÓNICO	Tarjetas inteligentes. Sistemas de distribución de las tarifas.
GESTIÓN DE LA DEMANDA DEL TRANSPORTE	Coordinación de servicios. Centros de gestión de la demanda.
VEHÍCULO INTELIGENTE	Sistemas de prevención de colisiones.

Fuente: (Casey et al., 2000)

2.4.8.2. Ejemplo de aplicación a nivel mundial: Londres y Nueva York

Londres “ha sido pionero en la innovación de los sistemas de transporte público” (Rivas et al., 2007). En Londres se cuenta con pago electrónico para utilizar sus sistemas de transporte público, se lleva a cabo mediante la tarjeta Oyster (Figura 2.22), una tarjeta magnética recargable que simplifica los pagos en los diferentes sistemas, como metro y autobuses, además de hacer el proceso mucho más eficiente, los precios que se pagan son menores utilizando la tarjeta que comprando los boletos normales (*Transport for London, 2016*).

La forma de utilizar la tarjeta es acercarla a los lectores instalados en las entradas de los modos de transporte con que se cuenta en la ciudad, se comprueba la validez y se da acceso al usuario, al momento de salir se sigue un procedimiento parecido, al deslizar la tarjeta por el lector se indica el cobro que se realizó por el viaje que acaba de concluir, mismo que se descuenta del crédito que se tiene en la tarjeta (*Transport for London, 2016*).

Cabe señalar que la cobertura que brindan sus sistemas de transporte es bastante buena, se cuenta con cerca de 19 500 paradas de autobuses establecidas, y se estima que estas unidades “mueven a alrededor de 6 millones de personas diariamente” (Paz, 2014).

Además, se brinda información a los usuarios sobre los horarios y destinos de las rutas en cada una de las paradas, como se muestra en la Figura 2.23, lo que permite a las personas tomar decisiones basadas en datos en tiempo real para realizar sus traslados.

Sumado a esto, los autobuses de transporte público de pasajeros que circulan por la ciudad, cuentan con un sistema de prioridad semafórica, mediante el cual se les brinda preferencia de paso, por ejemplo, al llegar a una intersección, mediante el control de los semáforos se les permite continuar su recorrido, buscando que lleguen a las paradas en el tiempo señalado y sin demoras (Rivas et al., 2007).

El sistema de prioridad (Figura 2.24), funciona mediante la instalación de detectores en las vialidades, así, al pasar un autobús, se envía una señal al detector que se encarga de informar al controlador del semáforo, mismo que gestiona las luces para brindarle la prioridad al autobús (*Transport for London*, 2006).



Figura 2.22. Tarjeta Oyster
Fuente: (*Transport for London*, 2016)



Figura 2.23. Información en tiempo real autobuses en Londres
Fuente: (*The International Press & Media Group*, 2016)



Figura 2.24. Sistemas de prioridad de paso al transporte público de pasajeros
Fuente: (Zaiac, 2015)

Por otra parte, en Estados Unidos, específicamente en la ciudad de Nueva York, también se cuenta con servicios de información al viajero, la información se brinda a través de pantallas en las estaciones o mediante el sitio web del Transporte Metropolitano (González-Sánchez, 2013).

Se pueden encontrar mapas del sistema subterráneo en general, pero también se tiene la opción de consultar en tiempo real los horarios de llegada de los trenes, primero se debe seleccionar la línea, después se elige la estación de interés, y se despliega en la pantalla el conjunto de rutas que pasan por el lugar seleccionado y el tiempo que tardarán en arribar, tal como se muestra en la Figura 2.25.

Pero estos sistemas avanzados de información al viajero no son exclusivos de un solo sistema de transporte de la zona, también se cuenta con información sobre las diferentes líneas de autobuses que dan servicio.

En la misma página web, se puede consultar información sobre tiempos de salida o llegada de las unidades de las líneas de autobuses neoyorquinos, para esto es necesario ingresar el nombre de la intersección, la ruta de autobús o el código de la parada donde se encuentra la persona que requiere los datos.

Después se muestran en pantalla los horarios programados de la/las rutas que se solicitaron (Figura 2.26), se puede desplegar la distancia aproximada a la que se encuentra la unidad con respecto a la parada elegida, entre otros datos, pero si no es posible que el usuario cheque la información por medio de internet, se tiene la opción de mandar un mensaje de texto con el código de seis dígitos de la parada en la que se encuentra y se le enviará la información pertinente.

Además, tienen una aplicación para teléfonos celulares, donde se tiene acceso a un mapa con información en tiempo real donde se muestra la ubicación de los autobuses a lo largo de la ruta que se desea tomar, se puede solicitar información sobre una ruta en específico o buscar las paradas o rutas que queden cerca del lugar donde se encuentra la persona.

Este sistema de información al viajero brinda sus servicios con ayuda de la tecnología GPS, así como medios de comunicación inalámbrica que es el método que se utiliza en la zona para conseguir la ubicación de sus autobuses en tiempo real (Metropolitan Transportation Authority, 2016a).

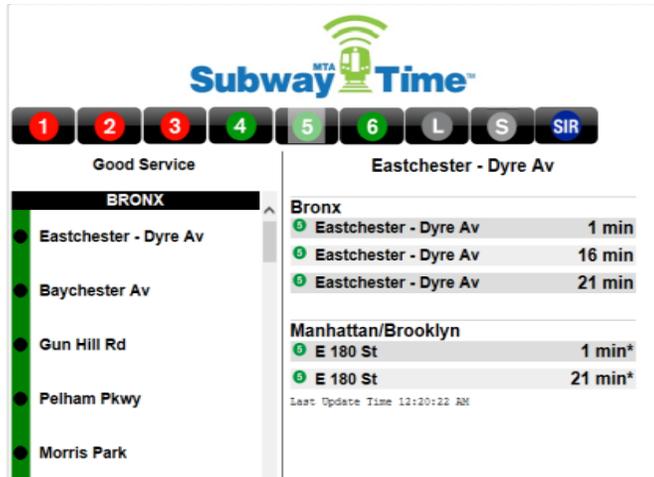


Figura 2.25. Información en tiempo real Metro Nueva York
Fuente: (Metropolitan Transportation Authority, 2016b)

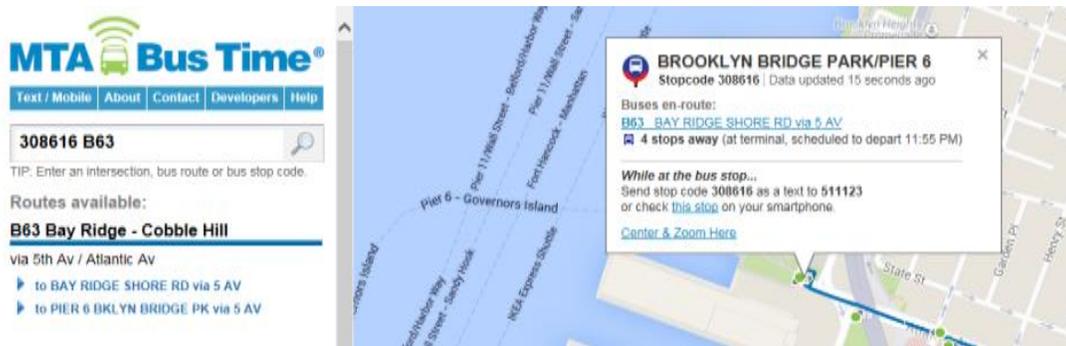


Figura 2.26. Información en tiempo real Metro Nueva York
Fuente: (Metropolitan Transportation Authority, 2016a)

2.5. ORGANISMOS SIT INTERNACIONALES Y ARQUITECTURAS SIT

Actualmente existen diversos organismos SIT en diferentes países alrededor del mundo. Los objetivos de contar con ellos son: crear un vínculo entre la sociedad, las empresas públicas y privadas y las universidades para elaborar proyectos integrales que ofrezcan soluciones a los problemas de transporte relacionados con SIT, así como crear conciencia sobre el valor de los mismos, además de integrar afiliados de otros países para poder compartir experiencias (Hernández, 2014).

En la Figura 2.27 se muestran los principales organismos SIT a nivel mundial, ERTICO en Europa, ITS Japón representando a Asia e ITS América establecido en Estados Unidos, dichas entidades se encargan también de organizar el congreso mundial sobre Sistemas Inteligentes de Transporte, llevado a cabo cada tres años, mismo que constituye un punto de encuentro para profesionistas y proveedores de SIT alrededor del mundo, donde también acuden representantes del gobierno de diferentes países, empresas del sector privado y estudiantes de varias universidades (Departamento de Transporte de Estados Unidos, 2006).

Por otra parte, un punto importante para la adecuada implantación de un Sistema Inteligente es establecer una arquitectura SIT, es decir, un marco común para la integración de los Sistemas Inteligentes de Transporte, que se compone tanto de acuerdos institucionales como de la integración técnica para la ejecución de los proyectos relacionados (Federal Highway Administration, 2015).

En general, para hacer el diseño e implantación de un SIT, la arquitectura se basa en los requerimientos de los usuarios, identifica los subsistemas básicos, define las funciones de cada uno de ellos y establece los datos que deben ser transferidos entre éstos.

Los SIT tienen la capacidad de brindar varios servicios a los usuarios de manera simultánea, esto a pesar de ser un gran beneficio, también implica que aumente la complejidad para la integración de la información y es ahí donde la arquitectura SIT juega un papel importante.

Para aprovechar todos los beneficios que un SIT trae consigo, es necesario que tanto los sistemas como el equipo sean compatibles (Acha y Espinosa, 2004), de nada serviría contar con todo lo requerido si no es posible que se dé un intercambio de información entre los componentes y se logre su trabajo en conjunto.

En los siguientes apartados, se tratan más a detalle a cada uno de los tres principales organismos mencionados anteriormente, así como la arquitectura SIT en Europa, Asia y América.

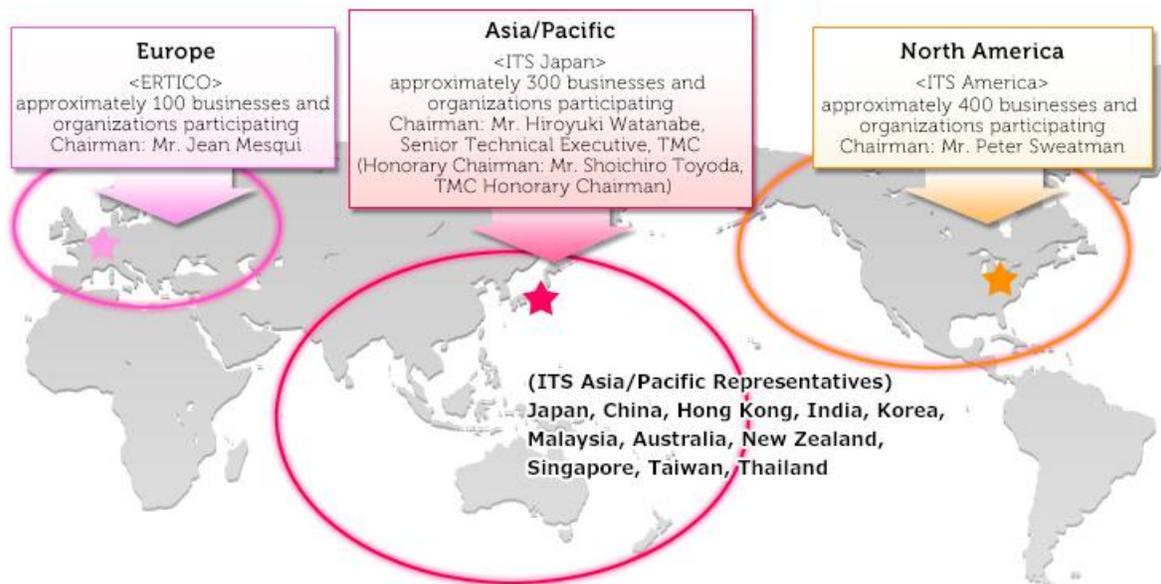


Figura 2.27. Principales organismos SIT
Fuente: (Toyota, 2013)

2.5.1. ITS América

Es la organización más grande en Estados Unidos dedicada a la investigación, desarrollo y despliegue de sistemas inteligentes de transporte. Actualmente cuenta con más de 450 miembros, entre los que se encuentran empresas públicas, privadas, instituciones académicas y de investigación (ITS América, 2016).

A lo largo de los años ITS América ha servido para proporcionar soluciones que permitan avanzar en el mejoramiento de los sistemas de transporte, ha acelerado el despliegue de soluciones de tecnología y el desarrollo de medidas innovadoras para satisfacer las demandas de las generaciones futuras (ITS América, 2016).

Es importante mencionar que ITS América trabaja de manera coordinada con el Departamento de Transporte de los Estados Unidos, para cubrir las necesidades y objetivos que se tienen en esta materia.

Por otra parte, Estados Unidos fue de los primeros países en establecer una arquitectura SIT y el organismo ITS América fue uno de los impulsores de esta iniciativa (Yokota y Weiland, 2004).

De acuerdo con el Departamento de Transporte de los Estados Unidos (2015), la arquitectura SIT utilizada en Estados Unidos se compone de tres capas:

- Institucional: donde se encuentran todos los organismos, políticas, mecanismos de financiamiento y los procesos necesarios para la implantación, operación y mantenimiento de un SIT.
- Transporte: se analizan las características los sistemas de transporte con los que se cuenta, sus subsistemas y los datos o información que se requiere en cada uno de ellos, esta parte es la más importante dentro de la arquitectura nacional.
- Comunicación: implica el intercambio oportuno de datos para cumplir con la función de los Sistemas Inteligentes de Transporte.

En la Figura 2.28 se muestra de manera esquemática la arquitectura SIT en Estados Unidos, como se puede apreciar, la capa de Transporte está compuesta de varios elementos, uno de ellos son los servicios a los usuarios, que hace referencia a los sistemas inteligentes que se van a implantar, en pocas palabras los servicios que se desarrollarán para generar las mejoras deseadas.

En cualquier arquitectura SIT que se establezca, en la primera etapa se deben definir y priorizar los servicios a los usuarios, en la Tabla 2.3, se muestran los diferentes servicios que se pueden ofrecer, a partir de la cual, se seleccionan aquellos de mayor importancia en la región o zona de estudio.

En específico en la arquitectura para los Estados Unidos, dichos servicios se clasifican en ocho grupos: Gestión del Tráfico y los Viajes, Gestión del Transporte Público, Pagos Electrónicos, Operación de Vehículos Comerciales, Gestión de Emergencias, Sistemas Avanzados de Seguridad en los Vehículos, Gestión de la Información y Gestión de Mantenimiento y Construcción (Departamento de Transporte de Estados Unidos, 2015).

Tal como se muestra en la Figura 2.28, existe una sección denominada arquitectura lógica, que tiene que ver con todos los procesos que se deben llevar a cabo para poder brindar los servicios a los usuarios, ya que varios de ellos deben trabajar en conjunto y compartir información para cumplir con sus objetivos.

En la Figura 2.29 se muestra un diagrama del flujo de información que se debe intercambiar para cumplir las funciones de los SIT, las flechas indican la dirección de transmisión de la información, mientras los círculos muestran los procesos que posteriormente se descompondrán en procedimientos más detallados en los subsecuentes niveles de la arquitectura lógica.

Por su parte, la arquitectura física, define aquellas entidades físicas que conforman a un Sistema Inteligente de Transporte.

El aspecto de la seguridad hace referencia a la necesidad de que los componentes del SIT sean confiables y estén disponibles para poder brindar servicio a la población cuando se requiera. Los paquetes de servicios representan partes de la arquitectura física, que están encargados de ciertos servicios en específico, por ejemplo, aquellos que se encargan del control de las señales de tráfico.

Finalmente, la arquitectura lógica y física permite identificar aquellos elementos que deben ser normalizados y la manera en la que se dará el intercambio de información, es por eso que la arquitectura SIT sirve de marco de referencia para el desarrollo de normas.

Desde 1997, en Estados Unidos se exigió que cualquier proyecto se debía desarrollar en conformidad con lo expuesto en la arquitectura SIT, es posible hacer algunas modificaciones dependiendo de las características locales de la zona en cuestión, pero siempre guiándose por la arquitectura nacional (Yokota y Weiland, 2004).

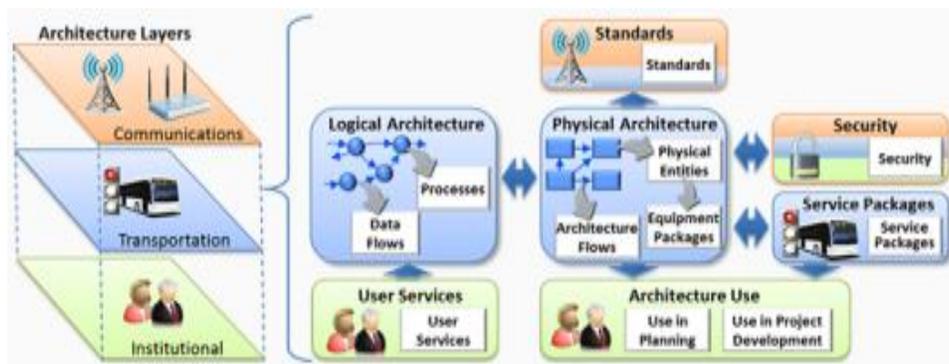


Figura 2.28. Arquitectura ITS en Estados Unidos
Fuente: (Departamento de Transporte de Estados Unidos, 2015)

Tabla 2.3. Servicios a los usuarios

Clasificación	Tipo de Servicio
Control del tráfico	Planeación del transporte Control del tráfico Gestión de incidentes Gestión de la demanda Vigilancia/aplicación del reglamento de tránsito Mantenimiento de la infraestructura
Información al viajero	Información antes del viaje Información durante el viaje para los conductores Información de transporte público durante el viaje Servicios de información personal Guía de rutas para la navegación
Sistemas vehiculares	Mejoramiento de la visión Operación automática de los vehículos Sistemas para evitar colisiones longitudinales Sistemas para evitar colisiones laterales Sistemas de seguridad ante choques inminentes

Tabla 2.3. Continuación

Clasificación	Tipo de servicio
Vehículos comerciales	Clasificación de vehículos comerciales Procesos administrativos de vehículos comerciales Inspección automática de seguridad en carreteras Monitoreo de seguridad a bordo del vehículo comercial Gestión de flotas de vehículos comerciales
Transporte público	Gestión de los sistemas de transporte público Gestión del transporte público en respuesta a la demanda Gestión compartida del transporte
Emergencias	Notificación de emergencias y manejo del personal de seguridad Gestión de los vehículos de emergencias Notificación de incidentes con materiales peligrosos
Pago electrónico	Transacciones electrónicas
Seguridad	Seguridad en los viajes públicos Mejora de la seguridad de los usuarios vulnerables Intersecciones inteligentes

Fuente: (World Road Association, 1999)

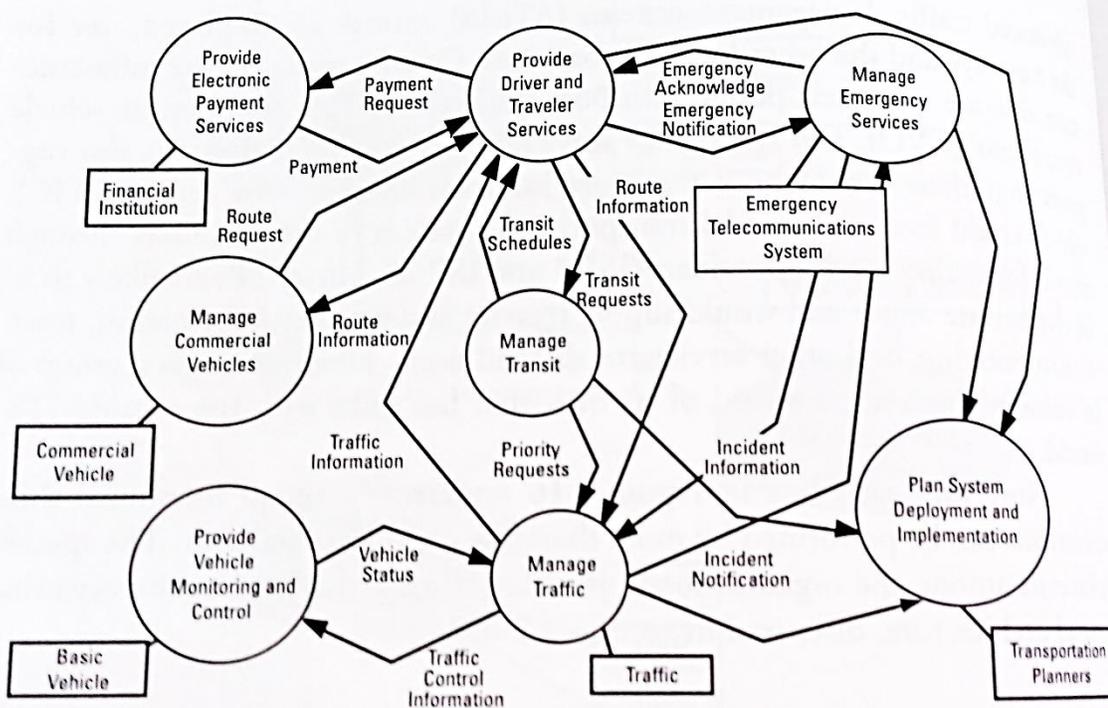


Figura 2.29. Arquitectura lógica
Fuente: (World Road Association, 1999)

2.5.2. ERTICO-ITS EUROPE

Es una asociación en la que se encuentran aproximadamente 100 empresas e instituciones que participan en la producción de Sistemas Inteligentes de Transporte. En conjunto todos estos socios de ERTICO llevan a cabo una serie de actividades para desarrollar e implantar SIT con el propósito de salvar vidas, proteger al medio ambiente y mantener una alta movilidad en las ciudades (ERTICO ITS Europe, 2016).

ERTICO fue fundada en 1991 y desde entonces ha colaborado en proyectos para lograr mejoras en la movilidad tanto de personas como de mercancías en toda Europa, además se ha encargado de darle un seguimiento a las estrategias implantadas (ERTICO ITS Europe, 2016).

Entre sus socios se encuentran: *Transport for London* (Reino Unido), Dirección General de Tráfico (España), Universidad Chalmers (Suecia), TomTom, IBM (International Business Machines Corporation), Grupo PTV, Panasonic, Huawei, Mitsubishi Electric, Xerox, Siemens y FIA (Fédération Internationale de l'Automobile), entre muchas otras.

Algunos de los proyectos en los que ERTICO está involucrado son: LOCOPROL, para la localización y protección de trenes con base en satélites, EVI, que es un estudio de viabilidad de identificación vehicular electrónica y *FRAME-S*, una estructura para la arquitectura y mantenimiento de los SIT en Europa, entre otros (Sayeg y Charles, 2006).

Por otra parte, también en Europa se tiene una arquitectura SIT mejor conocida como *FRAME*, la primera versión de ella fue elaborada dentro de los trabajos de un proyecto denominado KAREN (Keystone Architecture Required for European Networks) y se publicó en el año 2000 (Ministerio de Fomento Español, 2010).

Desde entonces dicha arquitectura ha ido sufriendo algunas modificaciones con el fin de mantenerla actualizada, pero en general se afirma que “se apoya en herramientas informáticas y comienza tomando en cuenta los deseos o necesidades de los diversos grupos de interés involucrados” (*Frame Architecture*, 2016).

De acuerdo con Yokota y Weiland (2004), *FRAME* se compone de:

- Servicios a los usuarios, las partes interesadas establecen los servicios que se desea que el SIT desarrolle.
- Arquitectura funcional, en donde se indican las funciones que el SIT debe cumplir para poder brindar los servicios a los usuarios, así como los datos o información requeridos por el sistema.
- Arquitectura física, describe todos los elementos tangibles que se requieren para que se dé la implantación del sistema y se cumplan los objetivos.
- Arquitectura de las comunicaciones, donde se describen los elementos necesarios para que se lleven a cabo los enlaces para la adecuada comunicación entre los diversos elementos con que se contará.
- Normalización, se explican las normas existentes en Europa en las cuales está basada la arquitectura SIT que han desarrollado.

Así, dicha arquitectura en el aspecto de servicios a los usuarios cuenta con diez grupos funcionales (*Frame Architecture*, 2016):

- Medios para pago electrónico
- Medios para seguridad y emergencia,
- Gestión de tráfico,
- Gestión de transporte público,
- Sistemas a bordo de los vehículos,
- Sistema de asistencia en la conducción,
- Cumplimiento de la ley,
- Gestión de flotas para el transporte de mercancías,
- Soporte para Sistemas Cooperativos y
- Transporte Multimodal

Pero dentro de la arquitectura *FRAME* pueden hacerse subconjuntos que se personalizarán dependiendo de la región en donde vayan a ser implantados o del tipo de proyecto del que se trate, ya que como su utilización no atañe a un solo país, sino a varios, cada uno cuenta con sus características propias (Figura 2.30).

La principal ventaja que se ha generado en la Unión Europea gracias a la aplicación de esta arquitectura, es la creación de proyectos con un lenguaje común, que permiten que se dé un avance de los Sistemas Inteligentes de Transporte de manera conjunta y eficiente.

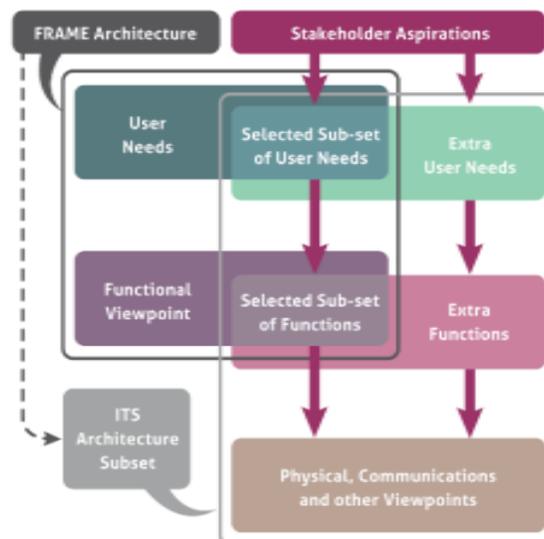


Figura 2.30. Arquitectura ITS Unión Europea
Fuente: (Frame Architecture, 2016)

2.5.3. VERTIS-ITS Japón

VERTIS (Vehicle, Road and Traffic Intelligence Society) es el organismo SIT más importante en Japón. Fue puesto en marcha en 1994 y sus principales objetivos son: promover la investigación y el desarrollo de los Sistemas Inteligentes de Transporte en todos sus campos de aplicación, además de lograr un intercambio de experiencias e información con otros organismos en América y Europa, promover los debates en estos temas y organizar Congresos Mundiales de SIT (ITS Japan, 2001).

Lo que se busca es que los SIT beneficien a tantas personas como sea posible, VERTIS “aspira a facilitar la creación de sistemas de transporte seguros, cómodos y amigables con el medio ambiente, proporcionando una base para el crecimiento económico sólido” (ITS Japan, 2001).

VERTIS trabajó en conjunto con el gobierno japonés para establecer una arquitectura SIT en el año de 1999, el objetivo era la construcción e integración de sistemas inteligentes de transporte, así como el desarrollo de estándares SIT (Yokota y Weiland, 2004).

Para la elaboración de la arquitectura SIT en Japón se siguieron dos principios básicos: se quería asegurar que la arquitectura sería capaz de adaptarse a los avances tecnológicos que se fueran presentando y evolucionaría con ellos, además de que ayudaría a generar proyectos compatibles en diferentes lugares del país (Yokota y Weiland, 2004).

En la arquitectura japonesa, se incluye una enumeración de servicios a los usuarios, una arquitectura lógica, una arquitectura física y la normalización SIT (Yokota y Weiland, 2004).

Dentro de los servicios a los usuarios se encuentran: Sistemas de navegación, Sistemas de cobro electrónico, Asistencia en la conducción, Gestión del tráfico, Gestión de las vialidades, Gestión del transporte público, Operación de vehículos comerciales, Apoyo a los peatones y Operación de Vehículos de emergencia.

La Figura 2.31 se muestra un esquema en donde se aprecian de manera general los elementos con los que cuenta la arquitectura física SIT desarrollada en Japón.

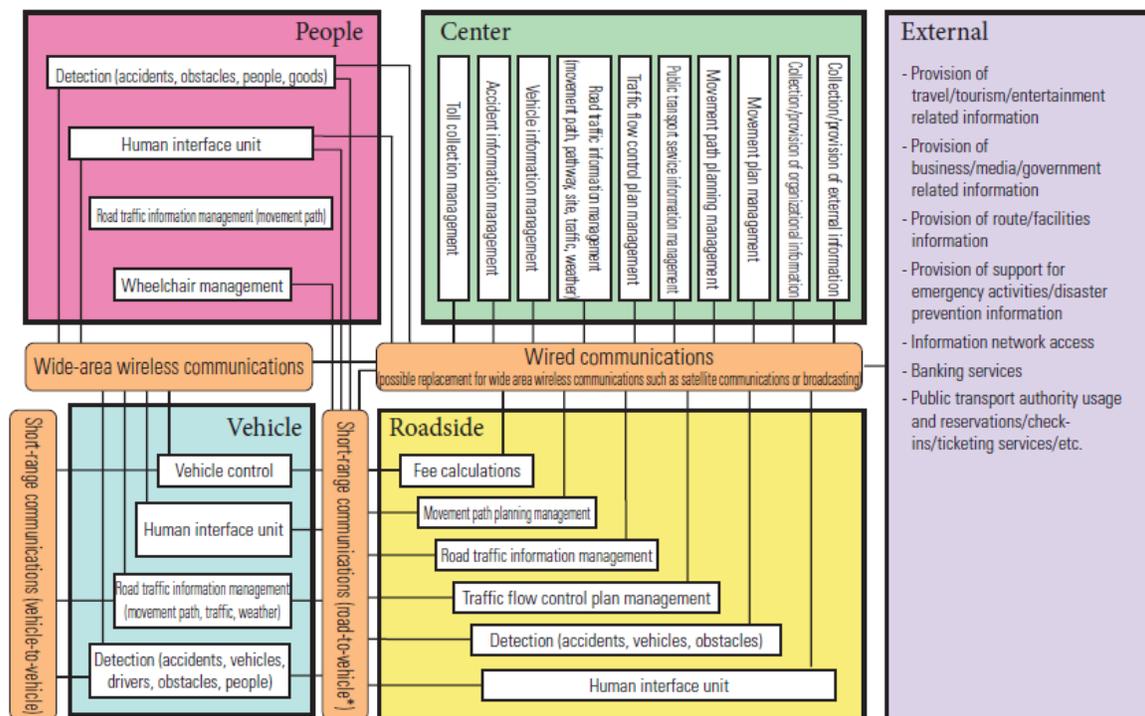


Figura 2.31. Arquitectura ITS Japón
Fuente: (Hasegawa, 2013)

2.5.4. Comparación entre las arquitecturas SIT

Como se puede apreciar, las arquitecturas SIT desarrolladas en Japón, Estados Unidos y Europa, cuentan con algunos puntos en común, dichos elementos son importantes, debido a que han servido de base para el desarrollo de arquitecturas SIT en otros países que aún no se encuentran tan avanzados en estos temas, si bien cada región cuenta con características propias, el hecho de tener ejemplos que sirvan de guía ha resultado ser un punto clave.

Dentro de las similitudes se encuentra que, los países identificaron que para lograr un desarrollo coordinado en cuanto a la aplicación de SIT, debían tener una guía que sirviera de ayuda para la introducción y puesta en marcha de proyectos de este tipo, así fue como se comenzaron a crear las arquitecturas en cada región.

Por otra parte, estas arquitecturas representan un trabajo de varios años para llegar a consensos entre todos los involucrados, sin embargo, se han ido mejorando de manera paulatina, es decir, en los tres casos se comenzó identificando las áreas que debían atenderse primero y se trabajó en ellas, para después ir evolucionando y adaptándolas a las nuevas necesidades que se iban generando, así como actualizarlas según los cambios tecnológicos que se iban presentando.

Es así que las arquitecturas también sirven para la futura expansión de los SIT, es factible su modificación para agregar nuevos servicios a los usuarios o coberturas geográficas sin necesidad de hacer un proceso demasiado complicado (World Road Association, 1999).

También se identifican algunos elementos básicos que las arquitecturas deben tener:

- Los servicios a los usuarios que se tiene planeado que se desarrollen en la zona, es decir, los sistemas inteligentes de transporte que se busca implantar, así como las aplicaciones que se les dará.
- La arquitectura física, que como su nombre lo indica, se refiere a aquellos lugares, elementos o entidades que permitirán que se lleven a cabo las funciones de los sistemas inteligentes de transporte.
- La arquitectura lógica, en donde se incluyen todos los flujos de datos que son necesarios para que se dé una conexión entre los servicios a los usuarios y la arquitectura física o entidades involucradas.

En el aspecto de servicios a los usuarios, las tres arquitecturas antes abordadas, los clasifican con base en la función que cumplen, en algunos casos tienen más grupos que en otros, pero en general, abarcan las mismas áreas, como lo son: Gestión del Tráfico, Gestión del Transporte Público, Medios de Pago Electrónicos, Sistema de Asistencia en la Conducción y Operación de Vehículos Comerciales.

La arquitectura desarrollada en Japón, a diferencia de la europea y la estadounidense, cuenta con un apartado especial para los Peatones y los SIT relacionados a ellos, por ejemplo, aquellos que les ayudan en la elección de sus rutas o los encargados de evitar accidentes en donde se ven involucrados vehículos automotores y peatones.

Por otra parte, también se señala que se pueden generar subsistemas dentro de una arquitectura, para que se adecuen a las características propias de cada proyecto, sin embargo, este aspecto se muestra con mayor importancia en el caso de *FRAME*.

FRAME es una arquitectura que busca ser utilizada en todos los países que conforman la Unión Europea, por lo que su aplicación se hace un poco más complicada, debido sobre todo a la cantidad de actores involucrados y las particularidades de cada una de las zonas dentro de este continente.

Sin embargo, en el caso de Estados Unidos, también se hace énfasis en que la arquitectura debe servir como base, sin embargo, se deben tomar en cuenta las necesidades y características de la región en donde se vaya a implantar el SIT, para tomar de ella aquellos aspectos más relevantes y que sean aplicables.

2.6. SIT EN MÉXICO

A pesar de que actualmente en México se tienen muchos problemas relacionados con el transporte, el uso de los SIT aún no se ha extendido, existen muy pocos ejemplos de implantación de estos sistemas y la mayoría de ellos se encuentran aislados, es decir, en diferentes ciudades del país, lo que no ha permitido que se dé una coordinación entre ellos para lograr aprovechar todos sus beneficios.

En los siguientes párrafos se desarrollan algunos ejemplos de SIT en México.

2.6.1. CITI, Metrobús

CITI (Figura 2.32) controla las cámaras de vigilancia que se tienen instaladas en el sistema Metrobús y ofrece información en tiempo real a los usuarios sobre datos referentes a la línea, hora, destino del siguiente autobús y tiempo de espera aproximados, entre otros.

A través de CITI se puede llevar a cabo una mejor gestión y control de las unidades para aumentar la eficiencia, seguridad y calidad del servicio (Indra, 2016a).

Además, el pago para ingresar al sistema Metrobús, se puede hacer solamente por medio de tarjeta, ya que no se reciben pagos en efectivo. En las terminales se cuenta con torniquetes, se acerca la tarjeta al lector electrónico que permite el ingreso una vez que verifica que se cuenta con saldo (Metrobús, 2016b). La tarjeta se denomina Tarjeta TDF (Figura 2.33), cuenta con una arquitectura abierta Calypso, que es la que permite que se haga una homologación para que la misma tarjeta pueda ser utilizada también en el Metro de la ciudad o la red Ecobici por ejemplo (Díaz, 2014).



Figura 2.32. CITI Metrobús
Fuente: (Propia)



Figura 2.33. Tarjeta TDF
Fuente: (López, 2012)

2.6.2. Autopista Arco Norte

Esta autopista cuenta con un total de 223 kilómetros, 14 entronques, inicia en Atlacomulco, en el Estado de México y concluye en San Martín Texmelucan, Puebla, comunica a las principales autopistas del centro de México [Impulsora del Desarrollo y el Empleo en América Latina (IDEAL), 2016], entre ellas se encuentran:

- México-Guadalajara.
- México-Querétaro.
- México-Pachuca.
- México-Tulancingo-Tuxpan.
- México-Puebla.

El Arco Norte evita que muchos vehículos atraviesen la Ciudad de México o su área metropolitana para llegar a su destino, buscando así, generar una disminución en la contaminación que se presenta en esta región (IDEAL, 2016).

Cuando se entra al Arco Norte, se pueden observar algunos expendedores amarillos, en ellos solamente es necesario apretar un botón para que sea entregada una tarjeta electrónica al conductor, mediante la cual el sistema podrá detectar el lugar de entrada, al momento de salir de la autopista se entrega la tarjeta en la caseta y se cobrará el costo de acuerdo a la distancia del recorrido, es este procedimiento lo que llaman pago de Peaje Cerrado (IDEAL, 2016).

De acuerdo con Hernández (2014), la autopista también cuenta con:

- Monitoreo en tiempo real de las condiciones de flujo de la autopista.
- Sistema central- Centro de Control (Figura 2.34).
- Monitoreo de tráfico.
- Video supervisión.
- Señalización variable.
- Telefonía SOS.
- Información pública a través de su sitio web.
- Pesaje dinámico.
- Monitoreo de condiciones meteorológicas.
- Kioscos inteligentes en paradores.

Es importante destacar que, para transmitir la información del estado de la vía al Centro de Control, la autopista cuenta con una red de fibra óptica en toda su longitud (IDEAL, 2016).

Aunque en dicha página web se asegura que se actualizan los reportes sobre las condiciones de la autopista cada quince minutos, con frecuencia es imposible tener acceso a ellos ya que los enlaces se encuentran rotos.



Figura 2.34. Centro de Control Autopista Arco Norte
Fuente: (IDEAL, 2016)

2.6.3. Centro de Control de Semáforos Inteligentes en la Ciudad de México

La Secretaría de Seguridad Pública de la Ciudad de México está conformada por un conjunto de subsecretarías, entre ellas se encuentra la de Control de Tránsito, que es la encargada, entre otras cosas, de “vigilar la operación y mantenimiento de la red de semáforos” (Secretaría de Seguridad Pública (SSP), 2017).

Entre 1979 y 1983, ellos se encargaron de poner en marcha “el primer Centro de Control de Tránsito de México, que contaba con una red de semáforos centralizada y circuito cerrado de televisión” (SSP, 2016).

Sin embargo, con el avance de la tecnología, resulta necesario que se lleven a cabo actualizaciones, por lo que se está buscando modernizar dicho Centro de Control.

Desde ahí, se debe operar la nueva red de semáforos inteligentes que se instalará en la Ciudad de México, en una primera etapa se planea ponerlos en funcionamiento en “1 350 intersecciones de delegaciones como Benito Juárez, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza” (Martínez, 2016 citado por López, 2016).

De esta manera, se contará con un sistema de sensores que permitirá enviar datos al centro de control, para que, después de realizar los cálculos necesarios, se hagan los cambios en las fases de los semáforos dependiendo de la demanda en cada una de las vialidades.

Se asegura que durante todo el año 2017 se seguirá trabajando en las intersecciones restantes de la ciudad (Martínez, 2016 citado por López, 2016).

Cabe señalar que, se sabe que actualmente al menos una parte de la red semafórica es operada a través del centro de control mediante un sistema de control semafórico, sin embargo, no existe información oficial al respecto.

2.6.4. Centro de Control del Tráfico en Morelia, Michoacán

En la ciudad de Morelia, Michoacán, se tiene un plan para la implantación de un sistema de regulación y control de movilidad vehicular, en marzo de 2016, se lanzó una licitación para conocer cuáles son las empresas interesadas en participar en el proyecto y analizar las condiciones de la zona para identificar las áreas de oportunidad (Morelia.gob.mx, 2016).

Se pretende llevar a cabo un proyecto en donde se cuente con sistemas semafóricos centralizados, señalización para peatones y vehículos, “así como la creación de una interfaz que suministre en tiempo real, datos a las autoridades encargadas de la seguridad y control de tráfico” (Morelia.gob.mx, 2016).

También se espera comenzar a utilizar sistemas con la tecnología necesaria para la aplicación de multas vía electrónica, todo esto con la finalidad de mejorar la seguridad en las vialidades de dicha ciudad, tanto para peatones como para automovilistas, y hacer un uso eficiente del espacio vial (Morelia.gob.mx, 2016).

2.6.5. Centro de Control del Tráfico en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco

En la ciudad de Guadalajara, Jalisco ya se tiene un centro de control de tráfico que, como su nombre lo indica, controla y dirige el tráfico vehicular, buscando reducir el congestionamiento en las calles de la ciudad (Chávez, 2014).

Sin embargo, este centro presenta algunos atrasos tecnológicos, por lo que es necesaria su modernización (Gobierno de Jalisco, 2015).

Para ello, el gobierno de Jalisco firmó un convenio de colaboración con el gobierno de Estados Unidos para financiar un estudio y proporcionar asistencia para la implantación de un sistema inteligente que beneficie a toda la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) (Gobierno de Jalisco, 2015), que está integrada por: Guadalajara, Zapopan, Tlaquepaque, Tonalá, El Salto, Tlajomulco de Zúñiga, Juanacatlán e Ixtlahuacán de los Membrillos (INEGI, 2010b).

Dicho proyecto se realizará en dos fases, la primera inició en 2015 y consiste en la elaboración de un diagnóstico de la zona y la identificación de los elementos con los que se cuenta en el centro de control, para después, en la segunda fase, desarrollar el planteamiento de un “proyecto piloto de mejoras de control de tráfico en la región” (Gobierno de Jalisco, 2015).

2.6.6. Sistema Avanzado de Información al Viajero HIPERPUMA

En el año 2014, se habilitó el sistema Hiperpuma, mediante el cual se informa a los usuarios “sobre las rutas más rápidas desde su origen a su destino, las cuales pueden formarse de combinaciones de los siguientes modos de transporte gratuito: Pumabús, BiciPuma y peatonal” (Instituto de Ingeniería UNAM, 2014).

Este sistema cubre el área de Ciudad Universitaria en la Ciudad de México y su funcionamiento se basa en la aplicación de un “algoritmo para el Problema de hiper rutas viables mínimas multimodales, implementado en *software* libre” (Instituto de Ingeniería UNAM, 2014).

Hiperpuma despliega un mapa y da la posibilidad al usuario de establecer su ubicación origen y su destino, además de los medios de transporte que está dispuesto a utilizar, por ejemplo, caminar y Pumabús, caminar y BiciPuma o los tres modos, así como el día y la hora de su viaje.

Como resultado, arroja las opciones para la ruta más rápida, y en caso de que el usuario deba realizar algún tramo del recorrido caminando o en bicicleta, le aparecerá en pantalla el total de calorías que estaría quemando, tal como se muestra en la Figura 2.35.

Hiperpuma no utiliza información en tiempo real, es decir, para mostrar sus resultados se basa solamente en información histórica.

Sin embargo, es factible que en un trabajo futuro se pudiera agregar este tipo de información para que los tiempos de viaje que se presenten a los usuarios sean mucho más exactos y vayan de acuerdo a la situación vial prevaleciente en el momento de la consulta.

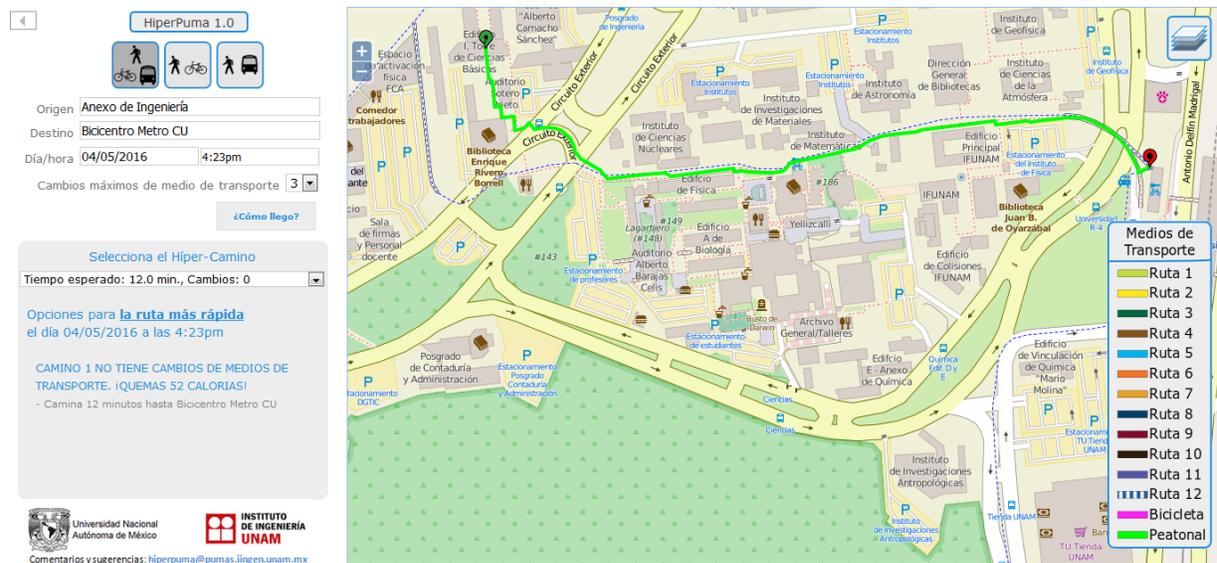


Figura 2.35. Funcionamiento de Sistema Hiperpuma
Fuente: (Hiperpuma, 2016)

2.7. NORMATIVIDAD PARA LOS SIT

La normatividad consiste en un conjunto de reglas o preceptos encaminados a regular situaciones repetitivas (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2003). Es necesaria debido a que ayuda a que los datos y la información que se van produciendo puedan ser compartidos, evitando de esta manera duplicidad en los trabajos, generando ahorros económicos y de tiempo en las organizaciones.

La arquitectura SIT como se explicó en el Apartado 2.5, brinda un marco que muestra cuantos componentes del sistema deben encajar o trabajar en conjunto, sin embargo, la normatividad ofrece especificaciones concretas para asegurar que todos los componentes que se utilicen, tanto *hardware* como *software*, realmente podrán acoplarse (World Road Association, 1999).

2.7.1. Normatividad ISO

Los documentos normativos pueden ser de diferentes tipos ya que existen varios organismos encargados de elaborarlos, uno de ellos es la Organización Internacional de Normalización, ISO por sus siglas en inglés.

ISO fue fundada en el año de 1947, y se encarga de “elaborar normas para casi todos los aspectos de la tecnología y los negocios” (Olvera et al., 2014).

Dentro de ISO, existen diferentes Comités Técnicos (TC), cada uno de los cuales se encarga de ciertas áreas, en este caso, es el TC204 el “encargado fundamentalmente de los sistemas e infraestructuras de información del transporte y sistemas de control, así como de la coordinación de todo el programa de trabajo en este campo” (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2003).

El Comité Técnico 204 se divide en 16 grupos de trabajo (WG) que son: Arquitectura, Control de calidad y fiabilidad, Bases de datos, Identificación automática de vehículos y equipamiento, Cobro de peajes/Gestión y control de accesos, Gestión de flotas, Comercio/Mercancías, Transporte Público/Emergencias, Gestión y control de información integrada del transporte, Sistemas de información al conductor, Guías y sistemas de navegación en ruta, Gestión de aparcamientos, Interacción Hombre-Máquina, Sistemas de control del vehículo/Emergencia en Autopistas, Comunicaciones de corto alcance y Comunicaciones de amplia cobertura/Protocolos e interfaces.

Además, existe otro comité técnico, el TC22 que se encarga de “todas las cuestiones de normalización relativas a la compatibilidad, interoperabilidad y seguridad” (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2003), sin embargo, su papel es menos relevante en cuanto a los SIT.

Es importante señalar que las normas ISO, son consideradas normas de facto, es decir, “no tienen reconocimiento jurídico y, por lo tanto, no son de cumplimiento obligatorio, sin embargo, se adoptan voluntariamente debido a que tienen gran aceptación en las comunidades usuarias” (Olvera et al., 2014).

2.7.2. Normas Oficiales Mexicanas (NOM), Normas Mexicanas (NMX) y Normativa para la Infraestructura del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes

En México los temas relacionados con la normatividad se regulan a través de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), que son elaboradas por dependencias del gobierno federal, y por las Normas Mexicanas (NMX), promovidas por la Secretaría de Economía y el sector privado.

De acuerdo con la Ley Federal sobre Metrología y Normalización [Diario Oficial de la Federación (DOF),1992], una NMX es elaborada por algún organismo de normalización o por la Secretaría de Economía y establece:

“reglas, especificaciones, atributos, métodos de prueba, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado” (DOF, 1992).

Otro aspecto importante en cuanto a las NMX, es que no es obligatorio su cumplimiento, son de aplicación voluntaria.

Por otra parte, las NOM sirven para establecer “la regulación técnica de observancia obligatoria expedidas por las dependencias competentes” (DOF, 1992), son normas de jure, es decir, tienen reconocimiento jurídico y el hecho de no cumplirlas implica sanciones legales.

Una de las dependencias encargada de crear NOM, es la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) que busca “promover sistemas de transporte y comunicaciones seguros, eficientes y competitivos” (SCT, 2014a).

En la Tabla 2.4 se presenta un listado de las Normas Oficiales Mexicanas que de alguna manera están relacionadas con los sistemas inteligentes de transporte, la mayoría de ellas en el aspecto de las telecomunicaciones.

Por otra parte, en cuanto a las NMX, en la Tabla 2.5 se muestran aquellas relacionadas con comunicaciones, tarjetas de identificación y fibra óptica.

Tabla 2.4. Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con los SIT

Clave	Fecha publicación	Descripción
NOM-001-SCT-2-2016	24-06-2016	Placas metálicas, calcomanías de identificación y tarjetas de circulación empleadas en automóviles, tractocamiones, autobuses, camiones, motocicletas, remolques, semirremolques, convertidores y grúas, matriculados en la República Mexicana, licencia federal de conductor, calcomanía de verificación físico-mecánica, listado de series asignadas por tipo de vehículo, servicio y entidad federativa o dependencia de gobierno, especificaciones y método de prueba.
NOM-012-SCT-2-2014	14-11-2014	Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal.
NOM-034-SCT2-2011	16-11-2011	Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas
NOM-060-SCT1-1993	06-12-1994	Terminología y conceptos básicos aplicables a los sistemas de transmisión de datos
NOM-061-SCT1-1993	07-12-1994	Definiciones empleadas en equipos de radiocomunicación para servicios móviles
NOM-062-SCT1-1994	04-01-1995	Terminología y conceptos básicos aplicables a transmisión de telefonía por microondas
NOM-063-SCT1-1993	07-12-1994	Vocabulario electrotécnico parte 5. Perturbaciones radioeléctricas
NOM-065-SCT1-1993	06-12-1994	Vocabulario electrotécnico parte 15. Telecontrol
NOM-084-SCT1-2002	17-04-2003	Telecomunicaciones-radiocomunicación-especificaciones técnicas de los equipos transmisores destinados al servicio móvil de radiocomunicación especializada de flotillas
NOM-088/2-SCT1-2002	21-04-2003	Telecomunicaciones-radiocomunicación-equipos de microondas para sistemas del servicio fijo multicanal punto a punto y punto a mutipunto-parte II: Transporte
NOM-111-SCT1-1999	22-11-1999	Telecomunicaciones-interfaz-parte de transferencia de mensaje del sistema de señalización por canal común
NOM-112-SCT1-1999	22-05-2000	Telecomunicaciones-interfaz-parte de usuario de servicios integrados del sistema de señalización por canal común
NOM-001-SEDE-2012	29-11-2012	Instalaciones Eléctricas (Utilización)

Fuente: (Propia con información de Dirección General de Normas, 2016)

Tabla 2.5. Normas Mexicanas relacionadas con los SIT

Clave	Fecha	Descripción
NMX-I-10373-1-NYCE-2009	28-01-2010	Tecnología de la información-tarjetas de identificación-métodos de prueba-parte 1: Características generales
NMX-I-14443-1-NYCE-2009	28-01-2010	Tecnología de la información-tarjetas de identificación-tarjetas de circuito (s) integrado (s) sin contacto- tarjetas de proximidad-parte 1: características físicas
NMX-I-274-NYCE-2011	21-04-2011	Telecomunicaciones-cables-cables de fibras ópticas para uso exterior-especificaciones y métodos de prueba
NMX-I-60793-1-40-NYCE-2012	22-03-2013	Telecomunicaciones-cables-métodos de prueba ópticos para fibras ópticas-métodos de medición y procedimientos de prueba-atenuación
NMX-I-60793-1-41-NYCE-2015	17-06-2016	Fibras ópticas-parte 1-41: Métodos de medición y procedimientos de prueba-ancho de banda

Fuente: (Propia con información de Dirección General de Normas, 2016)

Además, también se cuenta con la normativa para la Infraestructura del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, que son un “conjunto de criterios, métodos y procedimientos para la correcta ejecución de los trabajos [...] para la infraestructura del transporte” (SCT, 1999).

La Normativa de la SCT se presenta en tres tipos diferentes de publicaciones: Normas, Manuales y Prácticas Recomendables.

Las Normas incluyen:

“valores específicos para diseño; las características y calidad de los materiales y equipos de instalación permanente, [...] así como los métodos generales de ejecución, medición y base de pago de diversos conceptos de obra” (SCT, 1999).

Mientras en los Manuales, se cuenta con un “compendio de los métodos y procedimientos para la realización de todas las actividades relacionadas con la infraestructura del transporte” (SCT, 1999).

Finalmente, las Prácticas Recomendables brindan “elementos para seleccionar los métodos o procedimientos de entre los contenidos en los Manuales” (SCT, 1999).

Cabe señalar que, cuando los encargados de la construcción de alguna obra de infraestructura consideren que lo propuesto por la Normativa SCT no es aplicable a su proyecto, pueden proponer otros criterios, siempre y cuando estén bien sustentados (SCT, 1999).

En la Tabla 2.6 se presentan aquellas normas de la SCT que están relacionadas con los Sistemas Inteligentes de Transporte y enseguida se hace una descripción de ellas.

La N-PRY-CAR-10-01-007/13 brinda una definición de lo que son las señales de mensaje cambiante y sus principales objetivos, mientras la N-CTR-CAR-1-11-001/13 contiene los aspectos que se deben tomar en cuenta para su instalación, es decir, lo relacionado a la excavación, cimentación, relleno, estructura de soporte, sujeción del tablero electrónico y la instalación eléctrica y de comunicaciones.

Por otra parte, la N-CTR-CAR-1-11-003/14 presenta todo lo relacionado a la instalación de cámaras de video, además se hace una clasificación de éstas en tres tipos diferentes: las de vigilancia, las de reconocimiento de placas y las de detección automática de incidentes.

La N-OPR-CAR-3-01/12 “contiene los criterios para la obtención y presentación de los datos geoespaciales de carreteras” (SCT, 2012).

Los datos geoespaciales de carreteras:

“se refiere al registro digital de datos de la infraestructura carretera de interés para incorporarse al Sistema de Información Geográfica de Carreteras de la Secretaría (SCT), obtenidos mediante procesos de captura de datos con Sistemas de Posicionamiento Global o alguna otra geotecnología, organizados en distintas capas” (SCT, 2012).

Por su parte, las normas N-EIP-1-01-001/14, N-EIP-1-01-002/14 y N-EIP-1-01-003/14, proporcionan definiciones de lo que son los tableros de señalamiento variable (VMS), los tableros de señalamiento cambiante (CMS) y los tableros de señalamiento de encendido-apagado, respectivamente. También señalan los principales componentes de estos tipos de tableros, como lo son: la carcasa, pantalla electrónica y la unidad central de procesamiento, para posteriormente establecer los requisitos de calidad con los que deben cumplir. Y abordan el aspecto estructural, es decir, los requisitos de los elementos de sujeción de los tableros y las partes complementarias.

Resulta importante mencionar que una de las diferencias entre los CMS y los VMS, es que los primeros muestran información mediante símbolos o señales verticales, mientras los segundos presentan la información en forma de texto, símbolos, señales verticales o combinaciones de éstos.

Además, los CMS se utilizan principalmente “en plazas de cobro para señalar la apertura o cierre de un carril de tránsito” (SCT, 2014b).

Y los tableros de señalamiento de encendido-apagado solamente presentan un mensaje fijo, “se instalan usualmente en plazas de cobro para señalar la forma de pago” (SCT, 2014c).

La N-EIP-1-01-007/13 trata todo lo relacionado con las antenas de telepeaje, que son dispositivos electrónicos que se encargan de “recibir y transferir datos a través de señales de radiofrecuencia, y de comunicarse con transpondedores de telepeaje” (SCT, 2013a). Sus componentes principales son: la antena electrónica, la unidad central de procesamiento y la fuente de alimentación eléctrica, y en la misma norma se señalan los requisitos de calidad que deben cumplir.

Por su parte, la N-EIP-1-01-008/13 se enfoca en los transpondedores de telepeaje, mejor conocidos como TAG’s, aquellos dispositivos que se instalan directamente en los vehículos y se encargan de “almacenar, recibir y transmitir datos a través de señales de radiofrecuencia, y de comunicarse con antenas de telepeaje” (SCT, 2013b). Están compuestos por un “circuito electrónico, una antena, una cubierta protectora y, en su caso, una batería” (SCT, 2013b).

Y la N-EIP-1-01-009/15 especifica el tipo, forma, dimensiones y funciones que debe cumplir la unidad central de procesamiento (UCP) del sistema de telepeaje, que es un equipo que “recibe, procesa y envía datos para controlar el funcionamiento de los equipos electrónicos que forman el sistema de telepeaje [...], además de recibir y transmitir datos a la plaza de cobro” (SCT, 2015a). Los componentes principales de una UCP son: el gabinete, el *hardware* y el *software*.

En cuanto a las cámaras de video, se cuenta con las normas N-EIP-1-01-010/14, N-EIP-1-01-011/14 y N-EIP-1-01-012/14, en donde se explica la función que cumplen las cámaras de video para vigilancia, las de reconocimiento de placas y las de detección automática de vehículos, respectivamente.

Cabe señalar que las cámaras de vigilancia se instalan en los sitios en los que se requiere especial atención y cuidado “para el reconocimiento, monitorización e identificación de la infraestructura carretera y la seguridad de los usuarios” (SCT, 2014d).

Las de reconocimiento de placas cuentan con la capacidad de procesar “las imágenes por medio de un programa de reconocimiento óptico de caracteres en archivos electrónicos” (SCT, 2014e), mismos que proporcionan los dígitos y letras de las placas de los vehículos.

Y las de detección de incidentes, “registran, detectan y transmiten automáticamente incidentes en carreteras, [...], por medio de un programa de cómputo, generando mensajes de alarma que son transmitidos a otros equipos” (SCT, 2014f).

En las tres normas mencionadas anteriormente, se explican los componentes principales de las cámaras y los requisitos de calidad que deben cumplir, independientemente del tipo del que se trate.

Mientras la N-EIP-1-01-013/15 trata lo relacionado a la unidad central de procesamiento (UPC) del sistema de pesaje dinámico y dimensionamiento vehicular, que está compuesta por un conjunto de equipos que reciben:

“señales y datos, procesándolos y enviándolos para supervisar y controlar el funcionamiento de los equipos que integran los subsistemas de pesaje dinámico, clasificación vehicular, identificación vehicular por reconocimiento de placas, dimensionamiento vehicular y detección automática de incidentes del sistema de pesaje dinámico y dimensionamiento vehicular, además de recibir y transmitir datos al centro de control” (SCT, 2015b).

La misma norma presenta los componentes principales de la UPC (gabinete, unidad de procesamiento de datos, unidad de medición y control, y *software*), así como el tipo, forma, dimensiones y funciones que deberán cumplir.

Por otra parte, para hacer la detección de vehículos, uno de los métodos utilizados es el de inducción electromagnética, por lo que la N-EIP-1-01-015/14 contiene los requisitos de calidad de los lazos inductivos. Sus componentes son el cable de inducción y el cable de conexión, que se utiliza para “enviar la señal del lazo inductivo a una unidad de detección de presencia que normalmente está instalada en una unidad central de procesamiento” (SCT, 2014g).

Finalmente, las últimas normas mostradas en la Tabla 2.6 se refieren a los protocolos de comunicación, tanto para los diferentes tipos de tableros, como para los sistemas de telepeaje, las cámaras de video y el sistema de pesaje dinámico y dimensionamiento vehicular.

Conviene mencionar que los protocolos de comunicación “son un conjunto de reglas estandarizadas usadas [...] para el intercambio de información entre dispositivos electrónicos, a través de un medio físico de comunicación específico” (SCT, 2013c).

Otro aspecto importante es el tema de la normatividad en telecomunicaciones en el país, el 11 de junio de 2013, en el Diario Oficial de la Federación se publicó un Decreto por el que se reformaron y adicionaron algunas disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en esta materia [Instituto Federal de Telecomunicaciones (Ifetel), 2015].

Lo que se buscaba con esta reforma era establecer las condiciones de competencia y libre concurrencia en los servicios de telecomunicaciones y radiodifusión, además de “lograr la reducción de los costos de los servicios de telecomunicaciones para la sociedad mexicana” (Ifetel, 2015).

Tabla 2.6. Normativa para la Infraestructura del Transporte de la SCT

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
N-PRY-CAR-10-01-007/13	Proyecto de Señalamiento. Señales Diversas
N-CTR-CAR-1-11-001/13	Señales Verticales Elevadas de Mensaje Cambiable
N-CTR-CAR-1-11-001/14	Cámaras de Video
N-OPR-CAR-3-01/12	Obtención y Presentación de Datos Geoespaciales
N-EIP-1-01-001/14	Tableros de Señalamiento Variable con LED's
N-EIP-1-01-002/14	Tableros de Señalamiento Cambiable con LED's
N-EIP-1-01-003/14	Tableros de Señalamiento de Encendido-Apagado con LED's
N-EIP-1-01-007/13	Antenas de Telepeaje
N-EIP-1-01-008/13	Transpondedores de Telepeaje
N-EIP-1-01-009/15	Unidad Central de Procesamiento del Sistema de Telepeaje
N-EIP-1-01-010/14	Cámaras de Video para Vigilancia
N-EIP-1-01-011/14	Cámaras de Video para Reconocimiento de Placas
N-EIP-1-01-012/14	Cámaras de Video para Detección Automática de Incidentes
N-EIP-1-01-013/15	Unidad Central de Procesamiento del Sistema de Pesaje Dinámico y Dimensionamiento Vehicular
N-EIP-1-01-015/14	Lazos Inductivos
N-EIP-2-01-001/13	Protocolos de Comunicación para Tableros de Señalamiento Variable con LED's
N-EIP-2-01-002/13	Protocolos de Comunicación para Tableros de Señalamiento Cambiable con LED's
N-EIP-2-01-003/13	Protocolos de Comunicación para Tableros de Señalamiento Encendido-Apagado con LED's
N-EIP-2-01-004/13	Protocolos de Comunicación para Tableros de Señalamiento de Velocidad Variable con LED's
N-EIP-2-01-005/13	Protocolos de Comunicación para Tableros de Señalamiento de Velocidad Real con LED's
N-EIP-2-01-006/13	Protocolos de Comunicación para Tableros de Señalamiento de Tiempo Estimado de Viaje con LED's

Tabla 2.6. Continuación

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
N-EIP-2-01-007/13	Protocolos de Comunicación para Antenas de Telepeaje
N-EIP-2-01-008/13	Protocolos de Comunicación para Transpondedores de Telepeaje
N-EIP-2-01-009/14	Protocolos de Comunicación para la Unidad Central de Procesamiento del Sistema de Telepeaje
N-EIP-2-01-010/14	Protocolos de Comunicación para Cámaras de Video
N-EIP-2-01-012/15	Protocolos de Comunicación para la Unidad Central de Procesamiento del Sistema de Pesaje Dinámico y Dimensionamiento Vehicular.

Fuente: (Instituto Mexicano del Transporte, 2017)

Otro de los resultados de esta reforma, fue la creación del Instituto Federal de Telecomunicaciones, órgano que se encarga de:

“regular, promover y supervisar el uso, aprovechamiento y explotación del espectro radioeléctrico, las redes y la prestación de los servicios de telecomunicaciones y la radiodifusión en México, así como el acceso a infraestructura y otros insumos esenciales” (Ifotel, 2015).

Es así que Ifotel tiene la capacidad de otorgar y revocar las concesiones en lo referente a las telecomunicaciones, mismas que pueden ser otorgadas a través de una licitación pública (Ifotel, 2015).

Existe otro órgano que también se debe tomar en cuenta, es la Comisión Federal de Competencia Económica (Cofece) que se encarga de: “vigilar, promover y garantizar la competencia y libre concurrencia en los mercados” (Cofece, 2016). Específicamente en materia de telecomunicaciones, lo que busca es evitar que se presenten prácticas monopólicas.

Finalmente, en enero de 2016 se lanzaron las bases de un concurso para construir, operar y actualizar una Red Compartida durante 20 años, el proyecto está coordinado por la Secretaria de Comunicaciones y Transporte y el Ifotel (SCT, 2016).

La Red Compartida consiste en:

“la instalación de infraestructura común que servirá para ofrecer servicios mayoristas de voz y datos que podrá ser usada por operadores de redes móviles, operadores de redes fijas u operadores móviles virtuales” (Morales, 2016).

En forma sencilla, lo que se va a crear es un “nuevo actor de telecomunicaciones para que venda servicios a minoristas [...], un operador de operadores que tendrá como mercado objetivo a los operadores finales” (Morales, 2016).

El resultado de dicho concurso dio el triunfo a Altán, “un consorcio multinacional que cuenta entre sus inversionistas a algunos de los fondos de inversión en infraestructura más importantes del mundo y socios mexicanos privados, institucionales e industriales” (Altán, 2016).

Entre las principales características de su propuesta se encuentra (Altán, 2016):

- Cobertura de alrededor del 92.2% del territorio mexicano
- Infraestructura en la banda de 700 MHz en tecnología 4G-LTE y preparada para 5G (Ver subtema 3.6)
- Inversión de 7 mil millones de dólares a lo largo de todo el proyecto

Hasta ahora, Altán ha prometido “una cobertura del 30% del territorio para el 31 de marzo de 2018; [...], 50% para el tercer aniversario de la firma del contrato [...], y el 92.2% al séptimo aniversario” (Altán, 2016).

CAPÍTULO 3

SISTEMAS AVANZADOS PARA EL TRANSPORTE PÚBLICO

En el este capítulo se describen las principales características de los Sistemas Avanzados para el Transporte Público, se comenzará explicando brevemente su funcionamiento, después se analiza el estado del arte y se estudia el *hardware* y *software* que se requiere para el adecuado funcionamiento de estos sistemas. Finalmente se examinan las diferentes tecnologías para los componentes del SATP con las que se cuenta en el mercado actualmente.

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Como se señaló anteriormente, los Sistemas Avanzados para el Transporte Público (SATP) son Sistemas Inteligentes de Transporte que se enfocan en el desarrollo de soluciones innovadoras para problemas relacionados con los sistemas de transporte público de pasajeros, buscando lograr una mayor eficiencia en la operación de los mismos, una mejora en la calidad de los servicios ofrecidos, seguridad y disminución de tiempos de recorrido y espera para los pasajeros, entre otros (Yang y Zhou, 2003).

De acuerdo con Casey et al., (2000), entre las tecnologías necesarias para la implantación de un SATP se encuentran las siguientes:

- Los sistemas de pago electrónico, que se instalan con el objetivo de hacer más cómoda y rápida la entrada a los sistemas de transporte para los usuarios, generalmente se utilizan tarjetas con bandas magnéticas o tarjetas inteligentes.
- Los sistemas de conteo de pasajeros, los cuales sirven, entre otras cosas, para conocer la demanda en el sistema de transporte público.
- Los sistemas de gestión de flotas, que buscan hacer más eficiente la operación de los sistemas de transporte, reducir costos de operación y mejorar la calidad del servicio que se brindan.
- Los sistemas de información al viajero, los cuales se encargan de proporcionar datos a los usuarios acerca de la situación de los sistemas de transporte público de pasajeros, lo hacen mediante la combinación de tecnologías de comunicación y computación.
- *Software* para la gestión de la demanda del transporte, que hace referencia a aquellos programas que emplean los encargados de la operación de los sistemas de transporte público para lograr la máxima utilización de la infraestructura y equipos con los que cuentan.

Entre los principales objetivos que se cumplen con la implantación de un SATP, de acuerdo con Racca (2004), se encuentran: la posibilidad de mantener comunicación con los operadores de los vehículos de transporte y conocer en tiempo real su ubicación, mejorar la eficiencia del sistema de transporte en general, generando a la vez un aumento en la demanda de los usuarios gracias a la calidad en el servicio, y mejoras en los aspectos de seguridad y respuesta ante accidentes.

Como se puede apreciar, un SATP implica el uso de diferentes tipos de tecnología, resulta conveniente seleccionar la más adecuada a implantar y tener en cuenta la conexión que se debe dar entre los diferentes sistemas involucrados para lograr que se cumplan los objetivos planteados (Racca, 2004).

3.2. ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS AVANZADOS PARA EL TRANSPORTE PÚBLICO

Enseguida se presentan algunos de los trabajos sobre Sistemas Avanzados para el Transporte Público que se han desarrollado en los últimos años, principalmente en ciudades europeas, chinas y estadounidenses, algunos de ellos abordan solamente algunos aspectos del SATP, mientras otros tratan el tema en su totalidad.

Pelletier et al. (2010), brindan una explicación detallada del *hardware* necesario para la implantación de un sistema de cobro electrónico mediante tarjetas inteligentes en un sistema de transporte público. Muestran esquemas del funcionamiento general de un sistema de este tipo, algunas normas y los flujos de información que se deben dar para su correcto funcionamiento, además de las principales ventajas y desventajas que traen consigo, y algunas otras aplicaciones que se pueden dar a la información que se recolecta al hacer el cobro por este método.

Yang (2003) también trata el tema del cobro electrónico, comienza explicando las principales características de la región de estudio y del sistema de transporte público que utilizó para realizar su trabajo. No menciona el tipo de *hardware*, *software* o en general, la tecnología utilizada para la implantación del sistema, únicamente se enfoca en describir las principales ventajas y desventajas de su utilización y posibles mejoras a futuro.

Referente a la localización de las unidades del transporte público, Bullock et al. (2002), presentan los principales componentes de un sistema de detección de vehículos mediante bucles de inducción para el manejo de los controladores de tránsito.

No obstante, Bullock et al. (2002) tratan el tema someramente, es decir, el trabajo se enfoca más bien en el procedimiento para la simulación de estos sistemas de detección y no en una explicación detallada de los componentes y su tecnología, solamente los abordan para lograr una mejor comprensión de su funcionamiento.

Hounsell y Wall (2002) explican las diferentes tecnologías utilizadas en los autobuses de los sistemas de transporte público en Europa, con la finalidad de mejorar su eficiencia y desempeño en las calles de las ciudades. Los autores describen aspectos tecnológicos relacionados a la aplicación de sistemas de prioridad semafórica, sistemas de cobro mediante tarjetas inteligentes, paneles de leyenda variable y localización automática de los vehículos. En especial, se centran en la descripción de ocho diferentes arquitecturas para lograr la integración de los sistemas de prioridad semafórica, los sistemas de localización de vehículos y los centros de control.

El tema de las comunicaciones es tratado por Liu et al. (2005), ellos explican ampliamente todo lo relacionado a los sistemas de comunicación para las diferentes aplicaciones de los sistemas inteligentes de transporte.

Liu et al. (2005), ofrecen una descripción de diferentes tipos de sistemas de comunicaciones requeridos para la implantación de diferentes proyectos relacionados con los SIT, además tratan aspectos de normatividad o estándares a seguir en Estados Unidos, sin dejar de lado los trabajos hechos en Europa y Japón. Si bien es cierto que los autores no se enfocan específicamente en los Sistemas Avanzados para el Transporte Público, su documento representa una valiosa aportación para lograr una mejor comprensión de la importancia que tienen los sistemas de comunicación en la implantación de cualquier tipo de sistema inteligente de transporte.

Hasta ahora, se han mencionado trabajos en los que solamente se trata alguno de los componentes de un SATP, sin embargo, enseguida se presentan aquellos que examinan estos sistemas en conjunto.

Elkosantini y Darmoul (2013) brindan una explicación sobre las tecnologías disponibles para la captura de la información necesaria para que un Sistema Avanzado para el Transporte Público funcione adecuadamente. Comienzan dividiendo los componentes del sistema en cinco grandes grupos: localización automática de vehículos, sistemas de información al viajero, contadores automáticos de pasajeros, sistemas de información geográfica y sistemas para la toma de decisiones. Para cada uno de estos grupos dan una definición y explicación de las principales funciones que cumplen dentro del sistema y las tecnologías más utilizadas en cada caso.

Finalmente, los autores explican los datos que se deben intercambiar entre los diferentes subsistemas para lograr cumplir los objetivos de un SATP, sin embargo, no tratan el aspecto de los sistemas de comunicación que se pueden utilizar para ello.

Elkosantini y Darmoul (2013) mencionan que, aunque no tratan a fondo todos los aspectos técnicos y sistemas de comunicación, sí presentan una introducción sobre las diferentes tecnologías que pueden ser utilizadas para implantar un SATP.

Por su parte, Feng et al. (2008) explican la necesidad de implantar un Sistema Avanzado para el Transporte Público en Xi'an, China que presenta problemas en su sistema de transporte público. Inician detallando las principales características de Xi'an y el crecimiento en la demanda de transporte público, para después mencionar todos los componentes que era necesario implantar para la puesta en marcha del SATP.

A pesar de que Feng et al. (2008) tratan los diferentes componentes que se requieren para el SATP en dicha ciudad, no explican ningún aspecto técnico a detalle y no especifican las características tecnológicas del *hardware* y *software* que se utilizó en ese caso de estudio.

Finalmente, Ohene y Kaseko (1998) presentan un procedimiento para la selección de un sistema de radio comunicaciones para la implantación de un Sistema Avanzado para el Transporte Público.

Ohene y Kaseko (1998) ofrecen una descripción de las principales alternativas en cuanto a tecnologías de radio comunicaciones, establecen sus características básicas, así como ventajas y desventajas. Posteriormente, para hacer la selección del sistema más adecuado, explican que basarse solamente en el costo de implantación no es la mejor opción, por lo que plantean una serie de criterios que deben ser tomados en cuenta como: simplicidad tecnológica, capacidad de expansión, nivel de control que se puede obtener, entre otros. A cada uno de los factores considerados les asigna un peso, que servirá para hacer una ponderación, finalmente, la suma de cada uno de estos valores dará un resultado, el más alto representará la mejor opción a implantar. También recomiendan hacer una evaluación post-implantación del sistema para demostrar sus beneficios, mencionan que además serviría para justificar posibles expansiones o nuevas inversiones en este tipo de tecnologías, y mencionan que el sistema puede generar ahorros significativos en la operación de los sistemas de transporte público.

3.3. HARDWARE PARA UN SISTEMA AVANZADO PARA EL TRANSPORTE PÚBLICO

Para implantar un Sistema Avanzado para el Transporte Público, el *hardware* requerido debe contar con ciertas características que le permitan cumplir sus funciones.

De manera general, los elementos que se necesitan se dividen en diferentes categorías, se encuentran los relacionados al pago electrónico, los contadores de pasajeros, los dispositivos de localización de vehículos y los encargados de la distribución de la información en tiempo real.

Enseguida se explican las diferentes tecnologías utilizadas actualmente por los dispositivos en cada una de dichas categorías.

3.3.1. Pago electrónico

Para llevar a cabo el pago electrónico se requieren dos componentes principales: tarjetas y lectores, gracias a ellos los usuarios pueden tener un ingreso rápido y eficiente a los sistemas de transporte público que se tienen a su disposición.

Las primeras tarjetas que se utilizaron eran de bandas magnéticas (frangas de color oscuro que por lo general se encuentra en la parte trasera de la tarjeta), una de las primeras empresas en desarrollarlas fue International Business Machines (IBM) y en Londres se utilizó este tipo de tarjetas para el ingreso a su sistema de trenes (Tarrío, 2014).

La banda magnética está compuesta por una serie de partículas magnéticas que se comportan como si fueran imanes puestos en línea, al acercarse la tarjeta a un lector, se crea una inducción magnética, generando así un voltaje que será traducido a un código binario y después a datos (González, 2013).

Sin embargo, una de las principales desventajas en este tipo de tarjetas, es que la información no está encriptada, lo cual las hace inseguras, por ello se comenzaron a buscar otras opciones.

Fue así como se crearon las tarjetas inteligentes, existen dos tipos: las tarjetas con memoria y las tarjetas con microprocesadores, las primeras contienen “componentes integrados que poseen una memoria similar a una banda magnética” (*Smart Card Alliance*, 2015), mientras las segundas cuentan con un chip que es capaz de realizar varias funciones.

Además, existen dos tipos de interfaz: de contacto y sin contacto, las primeras requieren “de un puerto donde la información pueda ser leída para que se realice la conexión” (*Smart Card Alliance*, 2015).

Por su parte, las tarjetas sin contacto son capaces de establecer comunicación mediante otro tipo de tecnologías, como la RFID (Radio Frequency Identification o Identificación por radiofrecuencia), que permite identificar de forma automática a los usuarios y así poder aplicar el cargo correspondiente (NR Tec Desarrollos Tecnológicos, 2016).

La RFID funciona mediante un dispositivo lector que está vinculado a un equipo de cómputo, y se comunica mediante ondas de radio con la tarjeta a través de una antena, localizada en lo que recibe el nombre de tag o etiqueta (Egomexico, 2016).

En la tarjeta, la etiqueta consta de un chip conectado a una antena (Figura 3.1) que recibe las señales de radiofrecuencia que emite el lector (Intermec, 2007).

Por lo tanto, para que se dé la comunicación, se lleva a cabo el siguiente proceso: el lector envía una señal de radio, misma que es captada por la etiqueta que se encuentra en la tarjeta, ésta recibe la señal gracias a sus antenas y así transmite los datos que tiene almacenados. El lector al recibir de vuelta “la señal del tag, la decodifica y transfiere los datos al sistema informático a través de una conexión de cable o inalámbrica” (Intermec, 2007).

Cabe señalar que la distancia de recepción y la velocidad de transmisión de datos, entre otras características, depende del tipo de antena o chip que se instale en la tarjeta e incluso de la frecuencia de emisión [Instituto Nacional de Tecnologías de la Comunicación (INTECO), 2010].

En la Figura 3.2 se muestran algunos proyectos de pago electrónico en sistemas de transporte público de pasajeros en diferentes ciudades de México.

Sin embargo, se espera que en los siguientes años se comiencen a utilizar los *tickets* móviles, que son básicamente boletos virtuales que pueden guardarse en teléfonos celulares, tabletas o dispositivos digitales y cuentan con la ventaja de que pueden ser adquiridos desde cualquier lugar donde se encuentre el usuario.

Para obtener un *ticket* móvil se pueden seguir diferentes procedimientos, uno de ellos es que el usuario solicite su boleto vía mensaje de texto, haga el pago y se le envíe nuevamente un mensaje que le sirva para acreditar que ya puede hacer uso del servicio.

También se le puede enviar al pasajero una imagen que funcione como un código que le permita entrar a las unidades del sistema de transporte que vaya a utilizar, este método es conocido como Reconocimiento Óptico de Caracteres (OCR), que consiste en la conversión electrónica de imágenes, por ejemplo, códigos de barras o códigos QR (Figura 3.3), en caracteres que una máquina puede leer (Science and Technology Options Assessment (STOA), 2014).

Finalmente existe otro método parecido al OCR, pero la información se almacena en la memoria NFC del teléfono o dispositivo que se esté utilizando, NFC significa *Near Field Communication*, ofrece un tipo de tecnología inalámbrica “pensada para la comunicación instantánea entre dispositivos y la transmisión de datos entre ellos” (Samsung, 2013). Se considera que es una forma avanzada de la tecnología RFID.

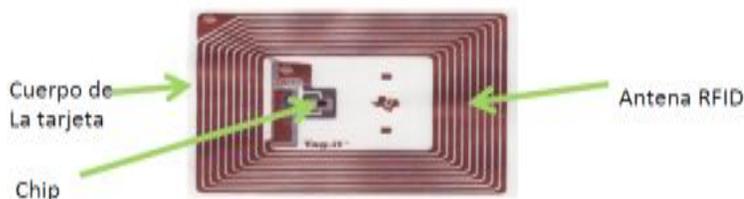


Figura 3.1. Componentes del tag o etiqueta
Fuente: (Intermec, 2007)



Figura 3.2. Proyectos de pago electrónico en el transporte público en México
Fuente: (FIMPE, 2013)

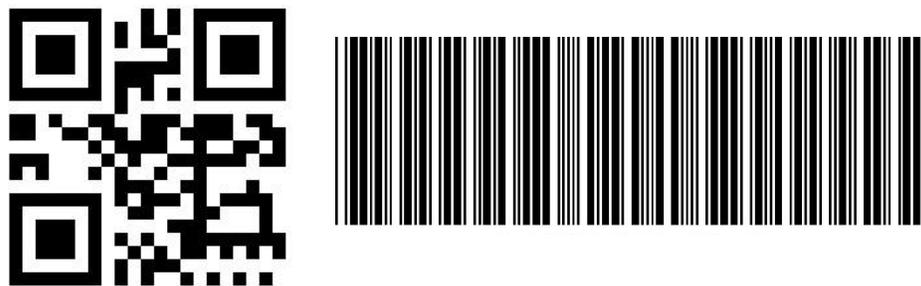


Figura 3.3. Ejemplos de código QR y código de barras
Fuente: (STOA, 2014)

Por otra parte, además de las tarjetas que ya se mencionaron, son necesarios los lectores, mismos que se deben instalar en los accesos a los sistemas de transporte público para que los usuarios ingresen utilizando sus tarjetas, en algunos casos, será necesaria la utilización de torniquetes, pero lo recomendable es que trabajen con el mismo tipo de tecnología para ser capaces de recibir la información de las mismas tarjetas (Figura 3.4).

Otro equipo necesario para el sistema de cobro electrónico es la terminal de compra y recarga de tarjetas (Figura 3.5), generalmente son instaladas en todas o la mayoría de las estaciones de los sistemas de transporte público de pasajeros o en puntos estratégicos, entre sus características se puede mencionar el uso de tecnología RFID y la capacidad de lectura y escritura de las tarjetas, entre otras (NR Tec Desarrollos Tecnológicos, 2016).

El objetivo de estos dispositivos es que los usuarios puedan adquirir fácilmente una tarjeta para hacer sus viajes en el sistema de transporte público de su preferencia, y así agilizar el proceso de ingreso y pago de la tarifa, o en su caso, hacer simplemente una recarga en la misma tarjeta que ya han adquirido anteriormente.



Figura 3.4. Lectores y torniquetes
Fuente: (NR Tec Desarrollos Tecnológicos, 2016)



Figura 3.5. Terminales de recarga de tarjetas
Fuente: (NR Tec Desarrollos Tecnológicos, 2016)

3.3.2. Contadores de pasajeros

Los vehículos de los sistemas de transporte público también cuentan con contadores de pasajeros, que sirven para “contabilizar en forma precisa, subidas y bajadas en cada puerta de la unidad” (NR Tec Desarrollos Tecnológicos, 2016).

Estos equipos deben reconocer y contar solamente a las personas, discriminando animales u otros objetos, determinar el sentido de paso (entrada o salida), así como tener la capacidad de contar a varios pasajeros entrando y saliendo al mismo tiempo con un alto porcentaje de precisión [Sistemas de Conteo de Personas (Sisconper), 2015a).

Existen diferentes tecnologías que se utilizan en los contadores de pasajeros, cada una ofrece ciertas ventajas y desventajas, entre ellas se encuentran: sensores basados en tecnología térmica, infrarrojos, fotoeléctricos, tecnología dual, cámaras (CCTV o Closed Circuit Television) y sensores instalados en los escalones.

Los sensores basados en tecnología térmica utilizan la temperatura del cuerpo humano y la radiación infrarroja para hacer el conteo, por lo que son muy sensibles a los cambios de luz o temperatura en el ambiente.

Su funcionamiento consiste en detectar la radiación infrarroja que emite el cuerpo humano, ya que “cualquier objeto que tenga una temperatura mayor al cero absoluto (-273.15 °Celsius o 0°Kelvin) irradia ondas de la banda infrarroja [...] mientras más caliente se encuentre un objeto, tanta más radiación infrarroja emitirá” (Spitzer, 2000).

Uno de sus componentes principales es el sensor piroeléctrico, que le permite identificar cambios en la radiación infrarroja, es por eso que una persona puede ser detectada por el sensor gracias a que usualmente la temperatura del cuerpo humano es mayor que la de su entorno, por lo que emite una radiación más fuerte (Villegas, 2012).

Sin embargo, existe un problema que representa una de sus principales desventajas, cuando la temperatura corporal de una persona es similar a la temperatura de su entorno, el sensor no puede detectarla, se vuelve “ciego”, además, si un pasajero dura mucho tiempo parado bajo el sensor, éste se vuelve incapaz de seguir contando a las personas que continúan ingresando (Infodev, 2014).

En los últimos años, con la finalidad de mejorar la precisión de estos sistemas, se hizo uso de la tecnología dual, es decir, se incorporó otro sensor dentro del mismo dispositivo, un sensor microondas, que consta de un diodo emisor y una antena, “emite una onda, la cual choca contra diferentes superficies y se refleja de regreso hacia la antena” (Mejía, 2016), si el sensor percibe alguna inestabilidad en la microonda, quiere decir que existe desplazamiento de una masa, en este caso, un pasajero.

Estos dos tipos de sensores juntos en un mismo dispositivo se ayudan entre sí para ofrecer mayor certeza, por ejemplo, el calor emitido por algún objeto puede ser detectado por el sensor piroeléctrico, pero si la microonda no lo hace, evita que se haga el conteo, es decir, se necesita la confirmación de ambos (Mejía, 2016).

En la Figura 3.6 se aprecia cómo se lleva a cabo la instalación de los sensores en las unidades de transporte público, cada uno de los números hace referencia a un dispositivo en particular:

- 1: Dispositivo GPS
- 2: Sensores requeridos para la apertura y cierre automático de puertas
- 3: Sensor encargado del conteo de pasajeros
- 4: Antena
- 5: Procesador del contador de personas

Los contadores de pasajeros que utilizan infrarrojos consisten en dispositivos instalados en cada una de las puertas de las unidades, mismos que emiten haces de luz infrarroja, los pasajeros rompen los rayos infrarrojos y el orden en que lo hacen es lo que permite determinar si la persona entró o salió de la unidad (MacKechnie, 2016).

La información sobre las entradas y salidas se va almacenando en la memoria de los dispositivos, en la Figura 3.7 se puede apreciar un ejemplo de este tipo de contador de pasajeros, generalmente se encuentran en forma de barra.

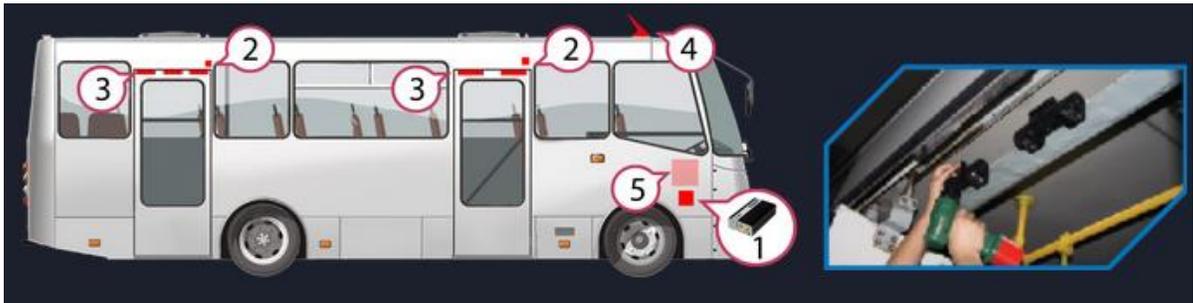


Figura 3.6. Sensores para conteo de pasajeros
Fuente: (Starfinder Bus, 2013)



Figura 3.7. Contadores de pasajeros, infrarrojos
Fuente: (Temsas, 2012)

En algunos casos, también se han instalado sensores en los escalones de entrada y salida de los autobuses, éstos hacen el conteo basándose en la presión que ejercen los pasajeros al pisar sobre ellos, su uso está más enfocado para prevenir el cierre de puertas cuando aún existen personas entrando o saliendo y abrir las puertas automáticamente, ya que para hacer conteos su uso no logró extenderse (Infodev, 2014). Entre sus desventajas se encuentra que fácilmente pueden dañarse al estar expuestos continuamente al paso de las personas, y su instalación resulta más elevada económicamente que la de otro tipo de sensores.

Cuando se opta por la utilización de cámaras o CCTV, un aspecto de gran importancia es la elección del *software* que se va a utilizar para analizar el video y así poder identificar a las personas y dar seguimiento de sus movimientos, de hecho, la precisión de estos sistemas depende en gran medida del *software* que se utilice para el procesamiento (Infodev, 2014).

Este tipo de tecnología suele ser costosa, debido a la importancia de la calidad de los componentes ópticos, el *software* para el análisis y la potencia de procesamiento necesaria para analizar las imágenes. Las cámaras ya se han utilizado en diferentes ámbitos, sobre todo para fines de vigilancia, sin embargo, una de las principales desventajas para su uso en los autobuses, es que cuando existe mucha luz, las cámaras no son capaces de grabar las imágenes con la precisión que se requiere, lo que hace más difícil hacer el conteo (Infodev, 2014).

De manera general, en la Figura 3.8 se muestran los elementos típicos con los que debe contar un autobús de un sistema de transporte público de pasajeros, se aprecian los contadores a la entrada y salida de la unidad, cámaras de video cuyo uso se ha extendido ampliamente en los últimos años, monederos que permiten el pago en efectivo a los usuarios que no cuentan con tarjeta, y dispositivos GPS que se explicarán en el Apartado 3.3.3, entre otros.

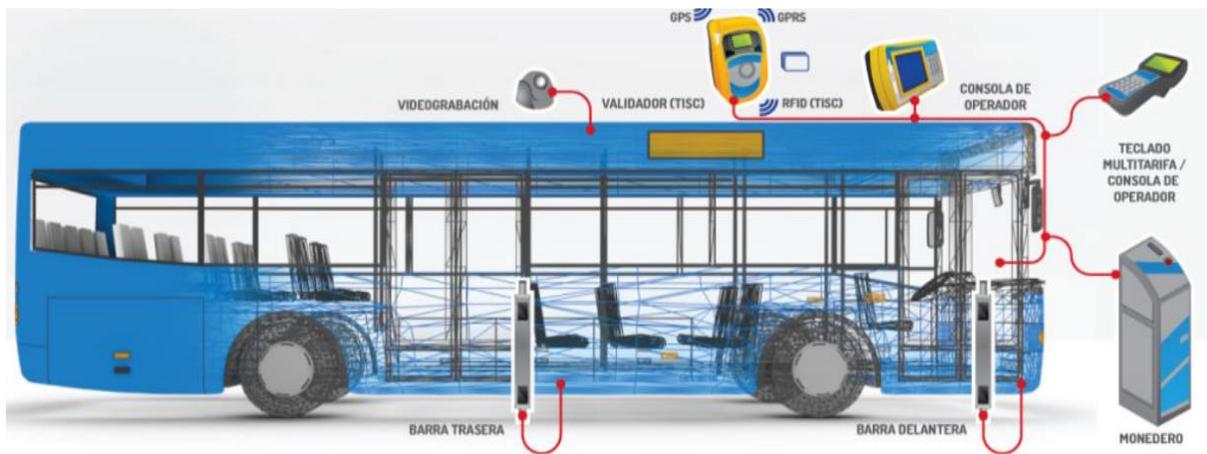


Figura 3.8. Autobús de un sistema de transporte público de pasajeros
Fuente: (NR Tec Desarrollos Tecnológicos, 2016)

3.3.3. Localización de vehículos

Para lograr el rastreo de las unidades de los sistemas de transporte público se utilizan diferentes métodos, entre los que se encuentran: “signpost”, GPS, radio basada en tierra (Loran-C) y “dead reckoning”. Enseguida se presentan más detalles de cada uno de estos métodos.

Para llevar a cabo la localización por medio de “signpost”, se debe contar con postes en las vialidades equipados con sensores de proximidad, cada uno de los cuales emite una señal, cuando un vehículo pasa por donde se encuentra uno de ellos, gracias al receptor que tendrá instalado a bordo, puede obtener un identificador del sensor, conocido como ID, además también se registra la lectura del odómetro en ese momento (Wisconsin Department of Transportation, 1998).

Por lo tanto, cuando una estación de control requiere conocer la posición del vehículo, éste tiene que proporcionar el ID del poste, la lectura del odómetro en el momento en que captó el ID y la lectura del odómetro al enviar su posición (Figura 3.9).

El ID ayuda a que se obtenga la última ubicación del vehículo, ya que se considera que la localización del poste debe coincidir con la posición de la unidad de transporte en ese momento. Las diferencias en las lecturas del odómetro indican la distancia que ha recorrido la unidad desde entonces.

Pero existe otra forma de llevar a cabo la localización por “signpost”, se da cuando se cuenta con sensores de proximidad pasivos, en este caso, es el mismo sensor el que recibe las transmisiones de los vehículos, y así es capaz de enviar la información directamente al centro o estación de control (Biondi, 2012).

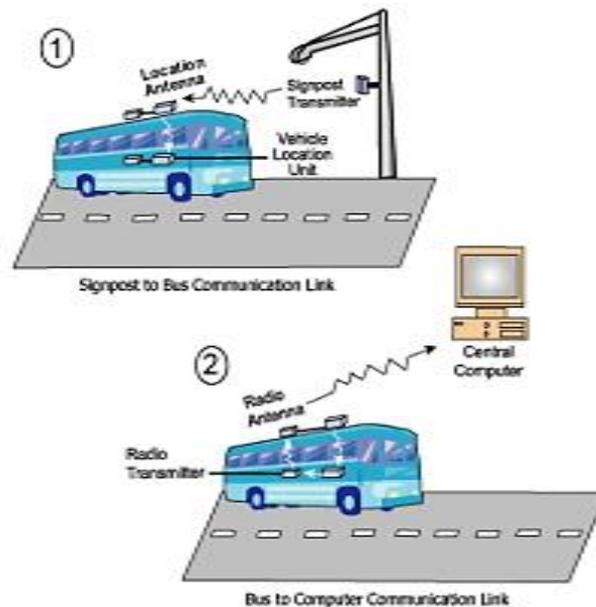


Figura 3.9. Localización de vehículos por signpost
Fuente: (ITS Decision, s.f.)

Los sistemas de navegación global por satélite (GNSS por sus siglas en inglés) representan uno de los métodos de localización más utilizados actualmente, de hecho, hoy en día al hablar de GNSS se piensa inmediatamente en el sistema de posicionamiento global o GPS, sin embargo, existen algunos otros sistemas como Galileo (Europa), Beidou (China) y Glonass (Rusia) que se explicarán más adelante.

El GPS fue desarrollado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos, al inicio era únicamente con fines militares, pero actualmente se ha convertido en una importante herramienta para la ubicación en tierra, mar y aire de cualquier objeto (INEGI, 2016b).

Para llevar a cabo la localización, se requieren tres componentes principalmente:

- Segmento espacial
- Segmento de control
- Segmento de usuarios

El segmento espacial está compuesto por una constelación de satélites que orbitan alrededor de la Tierra, a una altura de aproximadamente 20 000 kilómetros, Estados Unidos está comprometido a tener por lo menos 24 satélites disponibles el 95% del tiempo, pero actualmente se cuenta con 31 unidades, pertenecientes a diferentes generaciones (U.S. Department of Homeland Security, 2017).

Los satélites de la primera generación denominada Block I, que surgió en 1978, ya no se encuentran en servicio, sin embargo, se tienen satélites de la generación IIR (Replenishment), IIR-M (Modernized) y IIF (Follow-on), se espera que en los próximos años se cuente con una nueva generación, que será denominada GPS III (U.S. Department of Homeland Security, 2017).

Por su parte, el segmento de control consiste en una red de estaciones, instaladas en diferentes puntos alrededor del mundo, con la finalidad de estar rastreando los satélites, analizar su desempeño y transmisiones, etc. (El-Rabbany, 2002).

Tal como se muestra en la Figura 3.10, se cuenta con una estación de control maestra localizada en Colorado Springs, Colorado, Estados Unidos, una estación de control maestra alternativa ubicada en Vandenberg, California, Estados Unidos, 11 antenas de control (representadas con triángulos) y 15 estaciones de seguimiento (círculos).

Finalmente, el segmento de los usuarios incluye todos los usos que se le dan desde cuestiones militares hasta civiles, basta con contar con un receptor GPS conectado a una antena GPS para que cualquier usuario pueda recibir las señales GPS que le permitirán determinar su posición en la Tierra (El-Rabbany, 2002).

Para entender mejor el funcionamiento de este método, enseguida se explican los componentes de las señales que emiten los satélites.

Cada satélite transmite “dos señales de radio portadoras en la banda L moduladas con la técnica del espectro ensanchado” (Olmedillas, 2012), es por eso que son llamadas L1 y L2.

La banda de frecuencias utilizada por los satélites es sumamente importante, debido a que determina “la capacidad del sistema y la potencia” (Ledezma, 2012).

De manera general, las longitudes de onda largas están asociadas a frecuencias bajas, ya que mientras la frecuencia indica la cantidad de oscilaciones que se producen por unidad de tiempo, la longitud de onda representa la distancia que separa el inicio y el final de una oscilación de onda (Amaro, 2006). Estos términos se pueden comprender mejor analizando la imagen 3.11.

Así, las longitudes de onda largas pueden recorrer mayores distancias, además de atravesar obstáculos, mientras las longitudes de onda cortas pueden detenerse ante la presencia de cualquier obstáculo, por pequeño que éste sea.

Sin embargo, una de las ventajas de contar con una longitud de onda corta y frecuencias altas es que “pueden transportar más información, pero necesitan más potencia para evitar bloqueos, [...] y equipos más caros” (Ledezma, 2012).

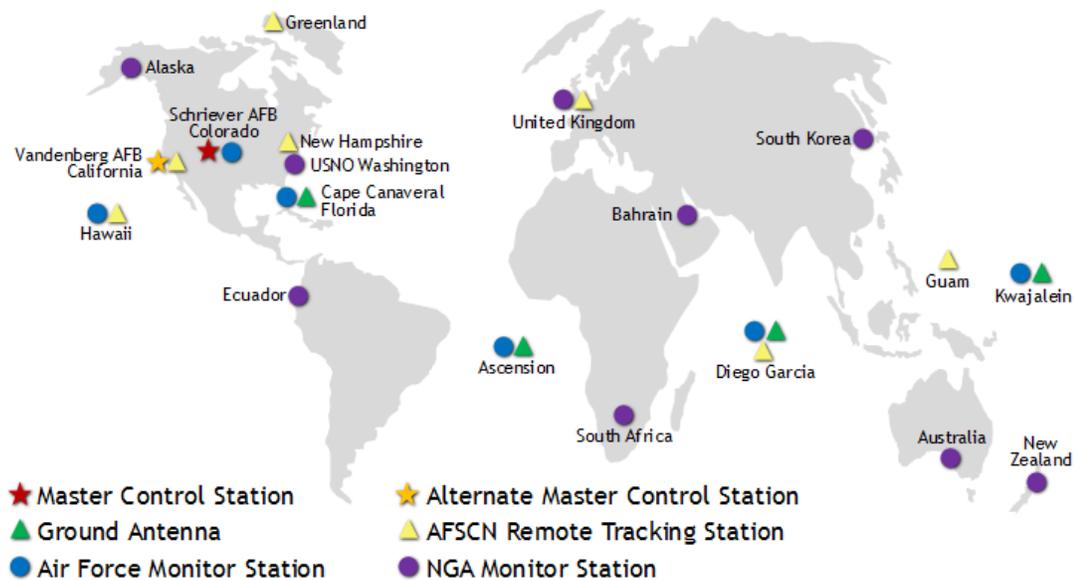


Figura 3.10. Segmento de control GPS
Fuente: (GPS.gov, 2016)



Figura 3.11. Longitud de onda y frecuencia
Fuente: (Varinia.es, 2009)

Concretamente la banda L tiene un rango de frecuencias de 1.53 a 2.7 GHz, es decir, presenta grandes longitudes de onda, pueden penetrar a través de estructuras terrestres, requieren transmisores de menor potencia, pero cuentan con poca capacidad de transmisión de datos (Ledezma, 2012).

Es por eso que se utilizan dos señales para “compensar los retrasos de propagación causados, entre otras cosas, por el paso de las señales por la ionosfera” (Olmedillas, 2012), una de las capas de la atmósfera.

La señal L1 tiene una frecuencia de 1 575.42 megahertz (MHz) y una longitud de onda de 19 centímetros (cm), además está codificada con el código o clave C/A (coarse acquisition o adquisición aproximativa) y P(Y) (precision code) (Olmedillas, 2012 y Farjas, 2004).

Mientras la señal L2 tiene una frecuencia de 1 227.6 MHz, longitud de onda de 24.4 cm y se encuentra codificada únicamente con el código P(Y) (Olmedillas, 2012 y Farjas, 2004).

Los satélites también envían un mensaje de navegación, que es un flujo de datos que se agrega a L1 y L2, y contiene las coordenadas del satélite en función del tiempo, el estado del satélite, datos atmosféricos, entre otros (INEGI, 2016b).

Pero cabe señalar que, en los receptores de uso civil solamente se puede utilizar la señal L1 C/A, ya que L1 P(Y) y L2 P(Y) son de uso militar y se encuentran encriptadas. Sin embargo, desde los años 90, “los diseñadores de receptores de grado geodésico han conseguido acceder a la señal encriptada L2 P(Y) a través de una técnica denominada rastreo parcial sin código (Valadez, 2015).

Así, el procedimiento para conocer la ubicación de cualquier objeto mediante GPS funciona de la siguiente manera: si se conocen las distancias desde un punto sobre la superficie terrestre hasta por lo menos tres satélites, además de la localización de éstos, la posición del objeto se puede determinar mediante resección (El-Rabbany, 2002).

La resección es un término muy utilizado en geodesia, representa un procedimiento en el cual, “conocidas las distancias a tres puntos y sus coordenadas, mediante trigonometría, se pueden determinar las coordenadas del punto del observador” (Fuentes, 2013).

Para obtener las distancias de los satélites al receptor GPS en tierra, una vez encendido el receptor puede detectar las señales de los satélites GPS gracias a la antena con la que cuenta y procesarlas mediante el *software* que tiene incluido, genera una copia interna de la señal recibida y finalmente el desfase de tiempo entre la emisión y recepción de ésta permite al receptor calcular la distancia a cada satélite (Reséndiz, 2004).

Es así como la distancia se obtiene multiplicando la diferencia entre estos dos tiempos, por la velocidad de la luz, es por esta razón que los relojes atómicos con los que cuenta el satélite y los de los receptores, son muy importantes.

Este método es conocido como pseudodistancias, ya que para que ofreciera resultados exactos, el reloj del satélite y el del receptor deberían estar sincronizados, como esto en la práctica no sucede, se dice que la distancia que arrojan está contaminada (El-Rabbany, 2002).

De manera general, en la Figura 3.12, se aprecia el procedimiento llevado a cabo para proporcionar la ubicación del vehículo mediante los satélites GPS y los dispositivos que se tienen instalados en las unidades de transporte. Una vez que se obtiene la información requerida, ésta es enviada a un centro de control, desde donde se realiza todo el análisis para después ser capaces de enviar información a los usuarios, ya sea mediante las pantallas que se instalan en las paradas o por algún otro método que se haya elegido.

Es importante señalar que estos sistemas dan una ubicación con un margen de error que hace que la información en ocasiones no sea muy precisa, para eliminar este problema es posible utilizar el DGPS o GPS Diferencial, que proporciona las correcciones de los datos con el fin de mejorar la precisión en la posición que se calculó.

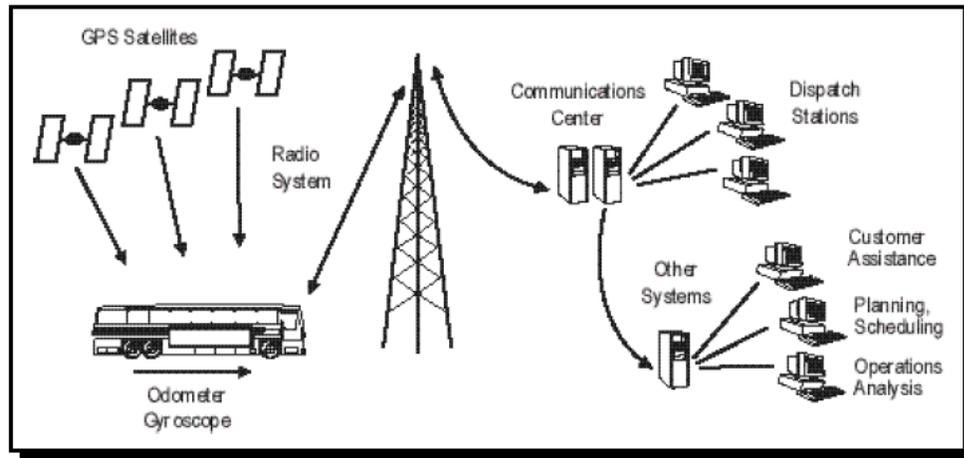


Figura 3.12. Funcionamiento GPS
Fuente: (Transit Cooperative Research Program, 2008)

EL DGPS es un tipo de receptor que, de igual manera recibe y procesa la información que envían los satélites, pero también cuenta con información adicional “procedente de una estación terrestre situada en un lugar cercano [...]. Esta información complementaria permite corregir las inexactitudes que se puedan introducir en las señales que el receptor recibe de los satélites” (García-Álvarez, 2015).

De esta manera, la estación terrestre “transmite al receptor GPS los ajustes que son necesarios realizar en todo momento, éste los contrasta con su propia información y realiza las correcciones mostrando en su pantalla los datos correctos” (García-Álvarez, 2015).

Según lo expuesto por García-Álvarez (2015), el error que maneja un receptor GPS normal se encuentra entre los 60 y los 100 metros, pero el DGPS reduce ese error a alrededor de un metro.

En la Figura 3.13 se explica el funcionamiento del DGPS, suponiendo que un receptor, cuya posición se conoce con exactitud, recibe la posición dada por el GPS, dicho receptor será capaz de estimar los errores producidos por comparación de distancias. Si después transmite la corrección de los errores a los receptores próximos, éstos también serán capaces de hacer las correcciones pertinentes.

El tema de la exactitud es importante debido a que con base en la información que se va recibiendo, se hacen las predicciones del tiempo de llegada del autobús a la parada siguiente, y estos datos son los que después se le presentan al usuario.

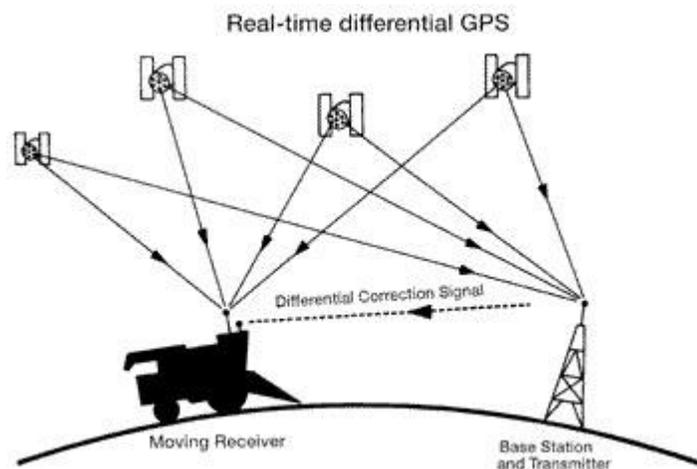


Figura 3.13. El DGPS o GPS Diferencial
Fuente: (University of Missouri, 1998)

Con respecto a esto, cuando se hace la localización por GPS también es necesario contar con un Validador de Datos GPS y un Servidor GPS en el Centro de Control, el primero será el encargado de verificar los datos enviados por los dispositivos GPS instalados en las unidades de transporte, filtrarlos y guardar aquellos que estén completos y sean correctos (Borole et. al., 2013).

Una vez hecho esto, se puede visualizar de manera gráfica mediante mapas, la ubicación de las unidades en tiempo real, y también es posible obtener su velocidad, entre otros aspectos. Es así que el Servidor GPS puede hacer una predicción del tiempo de llegada del vehículo a su siguiente parada (Borole et. al., 2013).

Y como se mencionó anteriormente, el GPS no es el único GNSS, también está el sistema europeo Galileo, aunque se espera que esté completamente listo hasta el año 2020, ya están disponibles algunos servicios (Tec Review, 2016). Contará con treinta satélites en órbita y será compatible con el sistema estadounidense GPS, el sistema Glonass puesto en marcha en Rusia y algunos otros desarrollados en China (Comisión Europea, 2008).

Se asegura que las señales del sistema Galileo “serán más resistentes a las interferencias y a los errores causados por la reflexión de señales provocada por superficies como las de los edificios” (Comisión Europea, 2008).

En China se tiene el sistema Beidou, solamente funciona en este país y en sus países vecinos, por lo que no necesita de una gran constelación de satélites para operar, además calcula la ubicación únicamente con dos satélites y una estación en tierra, se espera una segunda generación de satélites de este sistema en los próximos años (Zamora, 2016).

Otro de los sistemas más conocidos es GLONASS, fue creado en Rusia, cuenta con 31 satélites, aunque no todos se encuentran en funcionamiento y están a 19 100 km de la Tierra (Mateos, 2016).

GLONASS y GPS, son hoy en día los sistemas de navegación global por satélites más importantes, ya que tanto Galileo como Beidou, aún se encuentran en construcción, sin embargo, en un futuro próximo pueden ofrecer nuevas y mejores opciones para los usuarios.

Sin embargo, aún con sistemas de navegación global por satélite se pueden presentar algunos problemas para la localización de un vehículo, por lo que la opción ha sido utilizar un sistema complementario al GPS, ya que, por ejemplo, cuando la unidad pasa por debajo de un puente o túnel, una zona arbolada o un espacio lleno de edificios altos, la recepción del GPS es mínima, por lo que para estos casos se ha optado por usar el “dead reckoning” (World Road Association, 1999).

“*Dead reckoning*” o navegación por estima, se basa en el empleo de principios matemáticos para hacer la localización, es decir, conociendo el punto de partida del vehículo, la velocidad a la que circula y su dirección, se calcula su ubicación (Wisconsin Department of Transportation, 1998).

Básicamente para poder utilizar el “dead reckoning”, se requiere dirección y distancia, para obtener la longitud que va recorriendo un vehículo se pueden contar las rotaciones de las ruedas de la unidad, esto puede hacerse de varias maneras, una de las más utilizadas consiste en instalar un dispositivo en la rueda y un lector que vaya recabando la información referente al número de vueltas que se van dando, y así se puede calcular la velocidad y distancia de viaje (Wisconsin Department of Transportation, 1998).

Por su parte, el rumbo o dirección “es determinado utilizando una brújula, o bien conociendo una ruta predeterminada (Biondi, 2012).

Finalmente se cuenta con el método de radio basada en tierra Loran-C (Long Range Navigation) que es un sistema de radionavegación hiperbólica, existen dos versiones anteriores denominadas Loran-A y Loran-B que ya están en desuso (Casado et al., 2008).

Conviene comenzar explicando que existen dos métodos para obtener la posición de un vehículo utilizando señales de radio, uno de ellos consiste en medir el tiempo que tarda una señal en llegar al vehículo y volver hasta la estación fija desde donde se emitió, los tiempos “determinados por un mínimo de tres estaciones se envían a una estación de control, en donde se determinan las distancias entre el vehículo y cada parada” (Biondi, 2012).

Una vez que se tienen las distancias, éstas son utilizadas como radios para el trazado de círculos cuyos centros serán las diferentes estaciones fijas que participaron en el proceso, la intersección de estos círculos arroja la posición del vehículo (Biondi, 2012).

Pero el otro método consiste en que, desde el mismo vehículo, se midan los tiempos que tardan en llegar las señales que envían las estaciones fijas, de esas diferencias se obtienen hipérbolas cuyos puntos de foco se encuentran en cada una de las estaciones, en este caso, es la intersección de estas hipérbolas lo que define la ubicación del vehículo, y es así como funciona Loran-C (Casado et al., 2008).

Se tienen en operación alrededor de 70 estaciones fijas, con un alcance de aproximadamente 2 000 km cada una de ellas (Olmedillas, 2012). Sin embargo, el sistema Loran-C ya no es tan utilizado, ya que ha sido sustituido progresivamente por el Sistema de Posicionamiento Global, su uso se ha limitado a cuestiones marítimas y como sistema de reserva.

Pero se están evaluando algunas opciones para “realizar mejoras en la señal transmitida y en los receptores” (Olmedillas, 2012), esto llevaría a implantar el sistema Loran-mejorado (E-Loran). E-Loran incluiría “emisiones de señal adicionales que podrán transmitir datos que contengan correcciones diferenciales de señales GPS y así funcionarán como un sistema de mejora de la posición” (Olmedillas, 2012).

3.3.4. Distribución de información en tiempo real

Para poder publicar la información en tiempo real a los usuarios del sistema de transporte se requiere que toda la información que se va recolectando sea analizada y procesada, lo cual se hace en un centro de control, desde ahí los encargados pueden visualizar el lugar en el que se encuentran las unidades, conocer la velocidad a la que se desplazan o reorganizar las rutas cuando así se requiera (ActSoft, 2016).

La información comúnmente se hace llegar a los usuarios por medio de mensajes de texto, páginas web de los organismos encargados, quioscos equipados para que las personas consulten los datos o por medio de pantallas instaladas en las paradas de llegada y salida de las unidades (Adeleke et al., 2013).

En la Figura 3.14 se pueden apreciar algunas pantallas en las paradas de los autobuses, con información para los usuarios que esperan, generalmente estas pantallas son LCD o LED. En el Apartado 3.9.4 se explican las características de cada una de ellas.

Existen otros tipos de pantallas, sin embargo, LCD y LED han sido los de mayor uso alrededor del mundo, por ejemplo, se utilizan en: Londres, Estados Unidos, Grecia, Milán, Francia, Bruselas, Nueva York, entre otras (Transit Cooperative Research Program, 2008).



Figura 3.14. Pantallas con información en tiempo real
Fuente: (Chow, 2014)

Pero además de pantallas, se pueden instalar quioscos interactivos para brindar información, mismos que también sirven para que los usuarios adquieran sus boletos para utilizar el sistema de transporte o para brindarles algún otro servicio.

Generalmente los quioscos se ubican en lugares estratégicos para que las personas tengan fácil acceso a ellos, además cuentan con pantallas táctiles para que el usuario despliegue la información de su interés, por lo general son sistemas sencillos que se utilizan de forma intuitiva.

Algunos de los elementos con los que cuentan son: impresoras, altavoces, equipo de telecomunicaciones y una red digital de servicios integrados (ISDN por sus siglas en inglés), entre otros.

Una red digital de servicios integrados es aquella que “utiliza la misma infraestructura para muchos servicios integrados que tradicionalmente requerían interfaces distintas” (UTN, s.f.). Precisamente, las razones de que se utilicen en estos quioscos son: su alta velocidad y los múltiples servicios que puede ofrecer.

Entre las principales funciones que se les han dado a los quioscos en los lugares donde ya se tienen instalados están: ofrecer información sobre tiempos de llegada y salida de las unidades de los sistemas de transporte público, las rutas establecidas, los costos, solicitar servicios de transporte privado, brindar las condiciones del tráfico, atracciones turísticas y condiciones climáticas. En la Figura 3.15 se presentan algunos ejemplos de quioscos interactivos.



Figura 3.15. Quioscos interactivos
Fuente: (Internet Kioskos, 2017)

Por otra parte, la distribución de información mediante dispositivos móviles ha tomado gran relevancia sobre todo gracias a los avances en la tecnología, con el término dispositivo móvil, se hace referencia a “una variedad de dispositivos que permiten a la gente acceder a datos e información desde cualquier lugar donde se encuentren” (Morales, 2007).

Además, algunas otras de sus características, cómo su tamaño reducido, comodidad y diseño portátil, han hecho que las personas los lleven consigo a cualquier lugar y les den una gran variedad de aplicaciones, entre ellas acceder a información relacionada con los sistemas de transporte.

Sin embargo, el principal problema que se suele presentar en estos casos, son las conexiones lentas o inseguras en algunas zonas, lo que impide a las personas obtener la información que requieren en el momento en que lo solicitan.

Además, “el acceso a los contenidos desde los dispositivos móviles difiere mucho de como se hace en computadoras de escritorio” (Granados y González, 2010), los usuarios móviles tienen diferentes necesidades, por lo que tanto diseñadores como desarrolladores tienen grandes desafíos.

Deben conocerse las características de los usuarios para “diseñar contenidos que sean usables y así mejorar su experiencia” (Granados y González, 2010).

Actualmente, ya se cuenta con varias aplicaciones que permiten conocer la situación de los sistemas de transporte público en el momento en que se requiere realizar un viaje, prácticamente cada ciudad puede contar con sus aplicaciones.

3.3.5. Prioridad semafórica

La prioridad de paso para los autobuses de los sistemas de transporte público consiste en otorgarles ciertas facilidades de movimiento, es decir, al llegar a una intersección semaforizada, se busca permitirles el paso de manera que no tengan que esperar tanto tiempo para poder continuar su recorrido y así lleguen a tiempo a las paradas.

En la Figura 3.16 se presentan los principales subsistemas con los que debe de contar un sistema de prioridad de paso, éstos son: detección de vehículos a los cuales se les dará el servicio, sistema de control del semáforo y centro de control, además del aspecto de las comunicaciones para que se lleve a cabo el intercambio de información entre ellos.

El sistema de detección es el encargado de dar el aviso de que el autobús se está acercando a la intersección y requiere la prioridad de paso, esta solicitud puede ir directo al controlador del semáforo para que extienda el tiempo de luz verde o cambie de roja a verde en el menor tiempo posible, pero también en muchos casos, la información se va a un centro de control, para su aprobación y posterior procesamiento (ITS America, 2002).

Existen diferentes técnicas para llevar a cabo esta detección, entre ellas se encuentran: GPS, bucles de inducción, infrarrojos, entre otros. Los dos primeros son los más utilizados, pero en general cada una de las diferentes técnicas presenta ciertas ventajas y desventajas y su uso dependerá de la zona donde se implantarán y los principales objetivos que se busca cumplir.

El método de bucles de inducción, como se muestra en la Figura 3.17, se da de la siguiente manera: el detector enciende el bucle, creando un campo magnético en el área, cuando una masa metálica, en este caso el autobús, se acerca a la zona, es reconocido y se envía una señal que es captada por el detector, los cables requeridos por este método se encuentran instalados en la superficie de rodamiento (Figura 3.18), por lo que se realizan ranuras en las cuales se instalan los cables, generalmente en forma cuadrada o rectangular.

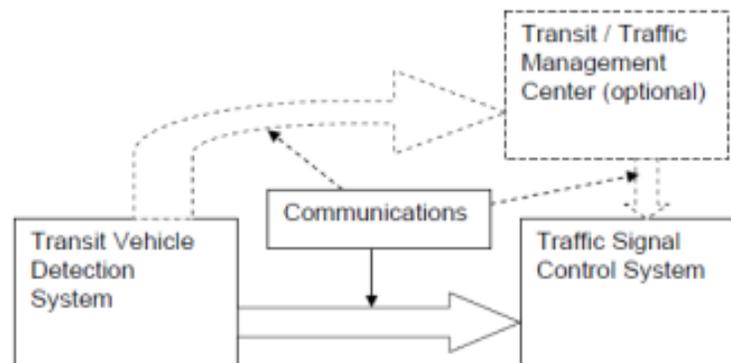


Figura 3.16. Subsistemas requeridos para brindar prioridad de paso

Fuente: (ITS America, 2002)

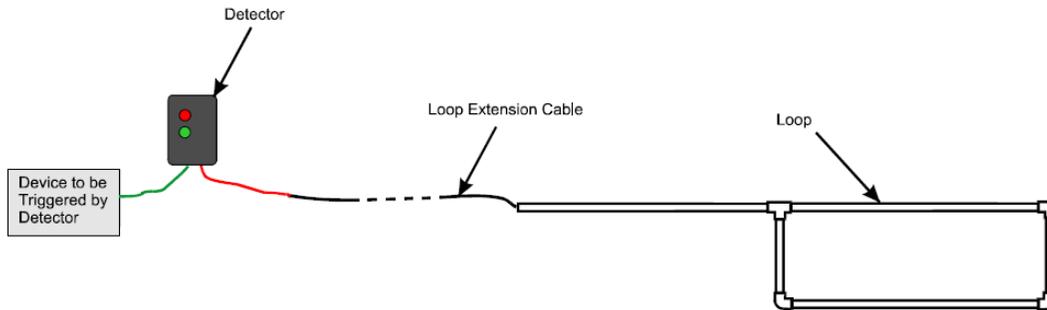


Figura 3.17. Bucles de inducción
Fuente: (Marsh Products, 2000)

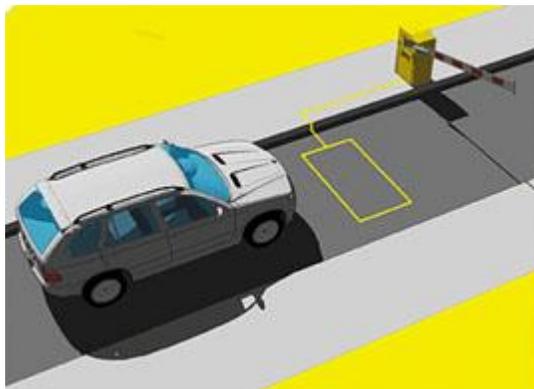


Figura 3.18. Cables instalados sobre la superficie de rodamiento
Fuente: (Empretel, 2016)

Debido a que este tipo de mecanismos se instalan directamente en el pavimento, con los trenes no se puede seguir el mismo procedimiento.

En esos casos, se cuenta con sensores en las vías, de hecho, actualmente en algunos países se está trabajando en una red de sensores denominados *Smart Railway*, mediante la incorporación de redes de sensores ópticos en diferentes partes de la red del sistema de transporte (Alava Ingenieros, s.f.).

Estos sensores no solamente ayudan a los encargados del sistema a mantener el control de las unidades y conocer el estado en el que se encuentran, también les permiten analizar las cuestiones referentes al mantenimiento de la infraestructura en general (Piacente, 2011).

De acuerdo con Alava Ingenieros (s.f.), la información que pueden proporcionar estos sensores incluye:

- Estado de carga y de tráfico de los vagones de pasajeros
- La temperatura y deformación generadas por los esfuerzos en los rieles
- Temperatura alrededor y en los ejes y frenos de las ruedas
- Vibración dinámica del eje provocada por la corrosión y desgaste

Además, al recibir la información en tiempo real, los encargados hacen los análisis que les permiten realizar el seguimiento de la velocidad del tren, el equilibrio de los ejes y datos de vibración, entre otros, toda esta información se va registrando, formando parte de la base de datos históricos.

Hasta hace algunos años, se utilizaban sensores electrónicos tradicionales pero requerían “un gran espacio para su instrumentación, protección y cableado, con el objetivo de soportar interferencias electromagnéticas” (Piacente, 2011), problema que no se presenta con los sensores ópticos.

Es por eso que, gracias a la implantación de los nuevos tipos de sensores, se pueden monitorear zonas que anteriormente eran inaccesibles, además garantizan que los sistemas de seguridad sean más fiables, y en general se ha demostrado cierto ahorro económico en su implantación (Piacente, 2011).

Otro método muy utilizado, es el de detección por GPS, se utiliza en el sistema de autobuses de transporte público de Londres, como se puede apreciar en la Figura 3.19. Se requiere también una serie de dispositivos que permitan que se dé la comunicación, la letra J representa al receptor GPS del autobús y M los satélites GPS, mientras las partes marcadas con las letras C y H son los medios de enlace entre el autobús y el semáforo, D es un procesador de información del autobús que se encuentra alojado dentro de E, que es el controlador de señales del semáforo (*Transport for London*, 2016).

Por su parte, cuando la prioridad de paso se da mediante infrarrojos, el vehículo debe contar con un dispositivo emisor y en las vialidades se tendrán detectores para que se dé una comunicación entre ellos.

El emisor generalmente se encuentra en la parte delantera del autobús (Figura 3.20), puede ser activado por el conductor del vehículo o por algún otro método automático, una vez activado es capaz de enviar señales infrarrojas al detector que se debe encontrar cerca de la intersección (California Department of Transportation, 2008).

La señal infrarroja que se envía contiene un código de identificación del autobús, el detector se encarga de transmitirla hasta la parte del semáforo encargada del cambio de fases, en donde se corrobora la prioridad de paso solicitada y se le otorga al autobús en cuestión.

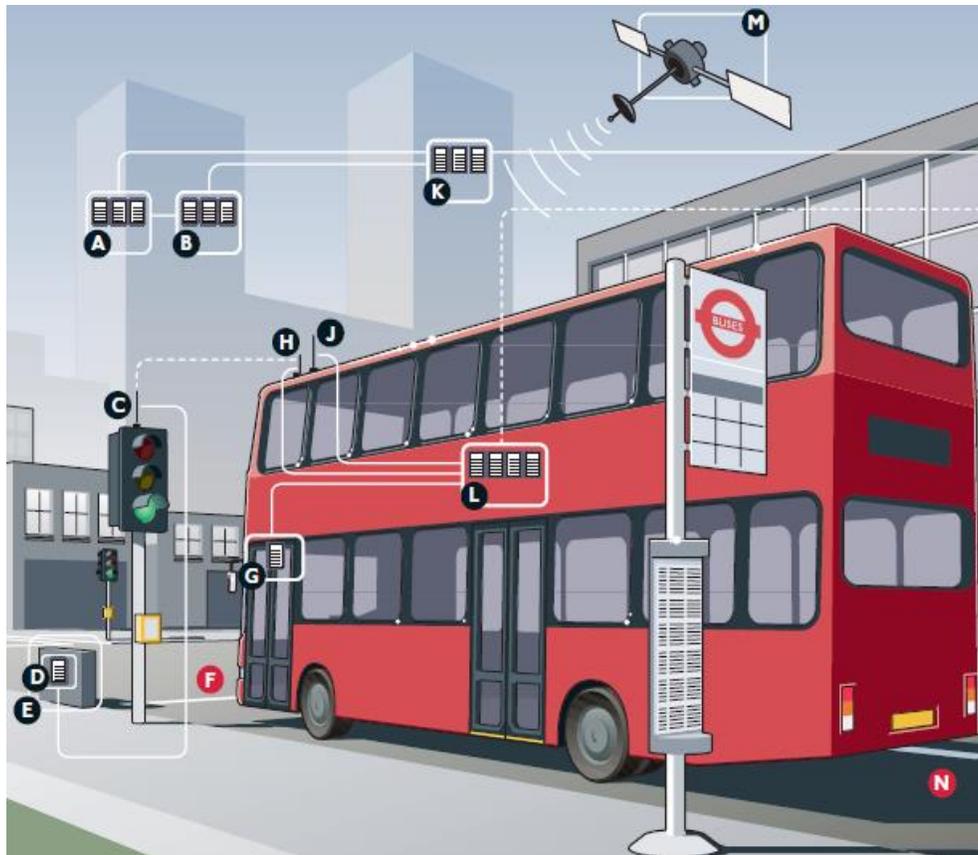


Figura 3.19. Detección de vehículos mediante GPS
Fuente: (Transport for London, 2016)



Figura 3.20. Dispositivos emisores de rayos infrarrojos
Fuente: (California Department of Transportation, 2008)

3.4. SOFTWARE PARA UN SISTEMA AVANZADO PARA EL TRANSPORTE PÚBLICO

Para el caso de los sistemas avanzados para el transporte público, el *software* que se utiliza se puede dividir en dos grandes grupos, el que sirve para hacer la predicción de los tiempos de llegada de las unidades del transporte público a las paradas y el que se requiere para la operación del sistema.

También existe el *software* encargado de brindar la prioridad semafórica, sin embargo, no se le considera parte primordial del SATP.

3.4.1. Predicción de tiempos de llegada de los autobuses a las paradas

Un Sistema Avanzado para el Transporte Público exitoso debe ser capaz de presentar información exacta a los usuarios acerca de los tiempos de llegada de los autobuses a cada una de las paradas de sus rutas.

Sin embargo, este parámetro es difícil de calcular de manera correcta, pero es importante hacerlo ya que permite llevar a cabo una mejor planeación, coordinación de las señales de tránsito y mostrar información correcta a los usuarios (Padmanaban et al., 2009).

Actualmente existen varios modelos que ayudan a realizar esta labor, usualmente se dividen en cuatro grandes categorías: modelos basados en información histórica, modelos de regresión, modelos que utilizan el filtro de Kalman y modelos de aprendizaje (Gurmu y Fan, 2014).

Los modelos que utilizan información histórica, como su nombre lo indica, hacen uso de la información que ha sido recolectada anteriormente para hacer la predicción, de hecho, la condición del tránsito al momento de hacer el análisis no se actualiza, por lo que se toma como estacionaria (Wall y Dailey, 1999).

Por su parte, los modelos de regresión predicen una variable dependiente con una función lineal compuesta por una serie de variables independientes, es decir, se encargan de medir los efectos que tienen varios factores (independientes unos de otros) sobre la variable dependiente.

Patnaik et al. (2004), propusieron un conjunto de modelos de regresión lineal para estimar estos tiempos de llegada usando la información que se obtiene de los contadores automáticos de pasajeros.

Además de estos datos, los autores también utilizan información sobre distancias, número de paradas, tiempos de espera y clima, los cuales se introducen como variables independientes.

También Jeong y Rilett (2004) así como Ramakrishna et al. (2006) desarrollaron modelos de regresión lineal múltiple usando diferentes conjuntos de datos como insumos.

De manera general, los modelos de regresión no funcionan tan eficientemente como otros tipos de modelos que se verán enseguida, sin embargo, una de sus principales ventajas es que pueden demostrar cuáles son las variables que influyen en mayor o menor medida en la predicción de los tiempos (Gurmu y Fan, 2014).

De acuerdo con Chien et al. (2002), los modelos de regresión están muy limitados y su desempeño no es el más satisfactorio, ya que pueden generar errores en la predicción.

Por otra parte, para entender los modelos que utilizan filtros de Kalman, conviene comenzar brindando una explicación de los conceptos básicos, el filtro de Kalman:

“es un conjunto de ecuaciones matemáticas que proveen una solución recursiva eficiente del método de mínimos cuadrados. Esta solución permite calcular un estimador lineal, insesgado y óptimo del estado de un proceso en cada momento $t-1$, y actualizar, con la información adicional disponible en el momento t , dichas estimaciones” (Solera, 2003).

Este algoritmo es uno de los más utilizados para hacer estimaciones en sistemas dinámicos, por lo que en los casos de predicciones de tiempos de llegada de vehículos ha sido muy aprovechado.

Finalmente, los modelos de aprendizaje más utilizados son las redes neuronales (Ver Anexo A), de hecho, diferentes modelos han sido propuestos en las últimas décadas ya que, aunque el procedimiento que siguen las redes neuronales es el mismo, los resultados dependen del tipo de insumos y sus combinaciones.

De acuerdo con Gurmu y Fan (2014), las variables que servirán de insumo se introducen en una función donde la salida de la neurona j se puede expresar como se presenta en la Ecuación (1):

$$Y_j = \Psi(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (1)$$

Que puede ser formalmente expresado como se muestra en la Ecuación (2):

$$Y_j = \Psi_j\left(\sum_{i=1}^m w_{ji} X_i + b_j\right) \quad (2)$$

Donde:

Y_j = salida de la j^{th} neurona

Ψ_j = función de activación

m = número de insumos aplicados a la neurona j

w_{ji} = peso sináptico que conecta la i^{th} entrada con la j^{th} neurona

$\{X_i\}$ = conjunto de variables de entrada de la neurona j

b_j = término de error

La función de activación se requiere para introducir la no linealidad entre las entradas y salidas de los nodos de la red, las funciones sigmoides como logit o tangente hiperbólica son de las más utilizadas.

Un ejemplo de función de activación tangente se presenta en la Ecuación (3):

$$\Psi(X) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (3)$$

El error promedio en la salida ε_{avg} de la neurona j en la iteración n para un número N de ejemplos, está definido por la Ecuación (4):

$$\varepsilon_{avg} = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \sum_j \left(d_j(n) - y_j(n) \right)^2 \quad (4)$$

Donde $d_j(n)$ es la salida deseada. Además, se aplica una corrección al peso sináptico, que se puede expresar como se muestra en la Ecuación (5).

$$\Delta w_{ji} = -\eta \frac{\partial \varepsilon_{avg}}{\partial w_{ji}} \quad (5)$$

Donde η es un parámetro de aprendizaje del algoritmo, su valor típico varía entre 0.001 y 1.0. Mientras menor sea la tasa de aprendizaje, menores cambios en el peso sináptico se presentarán y viceversa.

Enseguida se muestra un resumen del trabajo desarrollado por Chien et al. (2002), sobre el uso de redes neuronales para la predicción de tiempos de llegada de los autobuses a las paradas (Ejemplo completo en Anexo B). Para su trabajo, los autores utilizaron una ruta de un sistema de transporte público en Nueva Jersey, Estados Unidos (Figura 3.21). La ruta de estudio atraviesa 30 intersecciones, 26 de las cuales se encuentran semaforizadas. Además, cuenta con 14 paradas en cada dirección.

Proponen dos modelos de redes neuronales, en el primero de ellos predicen el tiempo de llegada de los autobuses a las paradas utilizando la acumulación de los tiempos de viaje en todos los arcos entre paradas anteriores. El segundo modelo lo desarrollan mediante la formación de datos agregados, como las medias y desviaciones estándar de los volúmenes, velocidades y retrasos en los arcos entre cada par de paradas.

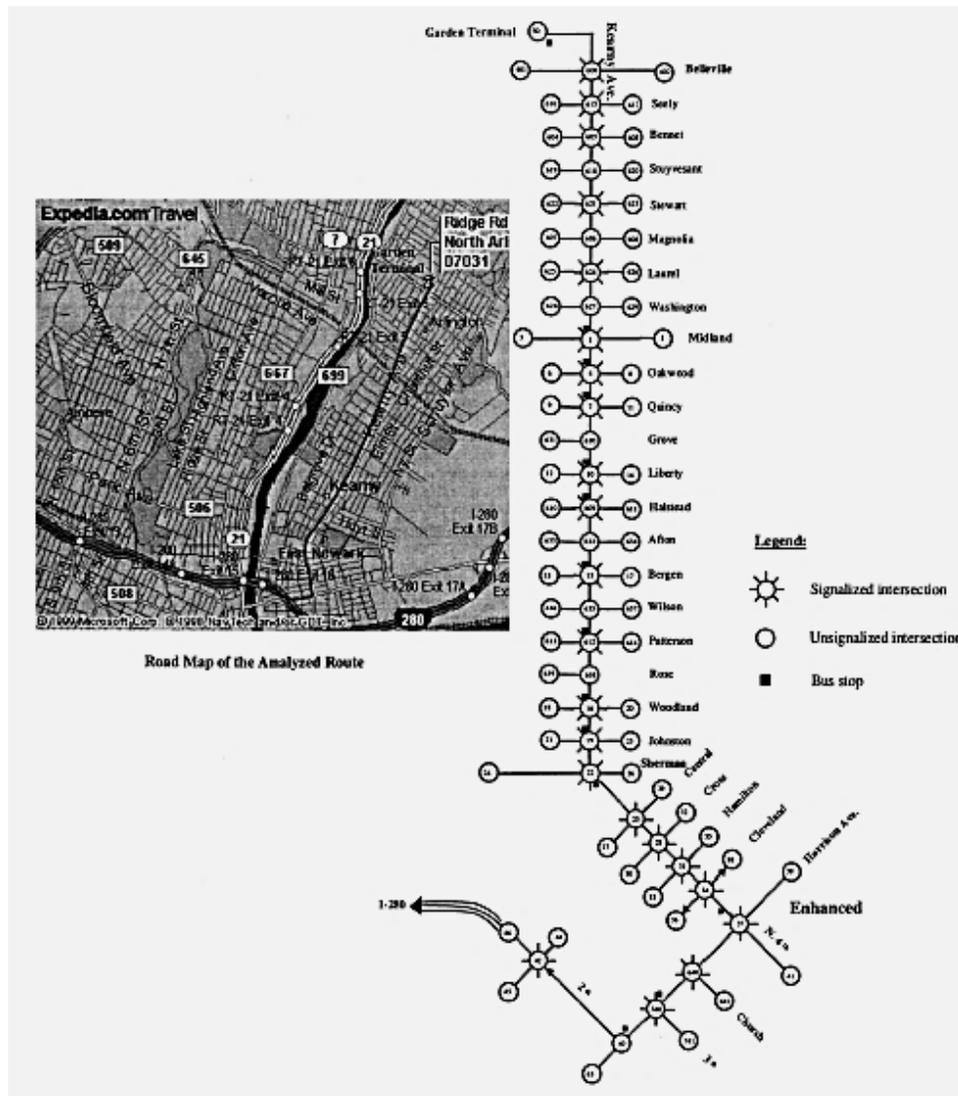


Figura 3.21. Ruta analizada en Nueva Jersey, Estados Unidos
Fuente: (Chien et al., 2002)

Mencionan que para el entrenamiento de ambos modelos se requiere de mucha de información, por ejemplo, volúmenes de tránsito, velocidades de circulación de los autobuses, tiempos de llegada y salida de las unidades, recolectada bajo diferentes condiciones de tránsito y de demanda de pasajeros, entre otros.

Ellos utilizaron información de la hora pico de la mañana, de las 7:30 a las 9:30 horas, tomada de 24 autobuses, obtuvieron: los volúmenes de tránsito, tiempos de cola, velocidades, tiempos de llegada y salida de los autobuses, tiempos de recorrido y demanda de pasajeros subiendo y bajando de las unidades.

Además de lo anterior, tomaron en cuenta algunos factores que afectan las llegadas de los autobuses a las paradas como: dispositivos de control (semáforos), espaciamiento entre paradas, velocidades permitidas, entre otras.

También utilizaron diferentes valores para algunos parámetros en sus modelos como: el número de neuronas y η que indica la tasa de aprendizaje.

De manera general, después de probar con varias combinaciones, determinaron que los insumos necesarios para su primer modelo eran: la distancia de viaje del autobús en un arco, el volumen de tránsito en dicho arco, así como la velocidad y retraso promedio, además de la demanda de pasajeros.

Mientras para el segundo modelo utilizaron: la distancia entre paradas, la media de los volúmenes de tránsito promedio en los arcos, la media de las velocidades promedio, la media del retraso promedio en los arcos, el número de intersecciones y la demanda de pasajeros.

Finalmente, Chien et al. (2002) determinaron que el segundo modelo de redes neuronales propuesto proporciona mejores resultados, es decir, predice los tiempos de llegada de los autobuses a las estaciones de una manera más exacta, especialmente en el caso de las predicciones de tiempos de viaje entre pares de paradas con múltiples intersecciones.

3.4.2. Optimización de la operación

Otro tipo de *software* básico para el funcionamiento de un Sistema Avanzado para el Transporte Público es el encargado de mejorar la operación de los autobuses.

Este *software* hace optimizaciones del número de líneas del sistema de transporte y sus rutas asociadas, así como la flota destinada a cada una de ellas y su frecuencia óptima para cubrir la demanda de pasajeros en los periodos pico (Cortés et al., 2010).

Aunque las variables relacionadas con la operación son optimizadas para diferentes periodos y líneas, existen algunos problemas, ya que el movimiento de los autobuses se ve afectado por diferentes sucesos durante el día (Cortés et al., 2010).

Entre estos contratiempos se encuentran: congestión, retrasos inesperados, aleatoriedad en la demanda, tiempos de salida de terminal indeterminados de las unidades, accidentes, etc.

La mayoría de los modelos utilizados para este aspecto están basados en heurísticas, ya que el problema de diseño y optimización de rutas, así como frecuencias, es considerado NP-Hard.

Cabe señalar que la complejidad se divide principalmente en dos clases, la P y la NP. La clase P corresponde a aquellos problemas de decisión que se pueden resolver en un tiempo polinomial. Mientras la clase NP representa a los problemas que no han podido ser resueltos de manera exacta por medio de algoritmos deterministas eficientes, pero pueden ser resueltos por algoritmos no deterministas (Sanchis et al., 2006).

Según Baaj y Mahmassani (1991) las principales dificultades para la formulación del problema de diseño y optimización de rutas son las siguientes:

- Definir las variables de decisión y la función objetivo.
- La no linealidad y no convexidad del problema.
- Naturaleza combinatoria del problema con variables discretas.
- Múltiples objetivos, no existe una solución óptima debido a que los objetivos de los usuarios generalmente no son los mismos que los de los operadores del sistema. Por lo tanto, existen varias soluciones no dominadas. Una solución es no dominada cuando existe otra que mejora la función en algún objetivo sin empeorar el resto.
- Disposición espacial de las rutas.

Enseguida se presentan modelos que se han utilizado para estos casos, en general, buscan maximizar el nivel de servicio y minimizar el uso de los recursos, en la Tabla 3.1 se muestra la comparación de algunos de estos modelos y sus principales características.

Tabla 3.1. Comparación modelos de diseño y optimización de rutas

Autor(es)	Función objetivo	Restricciones	Aportes	Limitaciones
Baaj y Mahmassani (1991)	Minimizar tiempos de transferencia y tamaño de la flota	Frecuencia factible, factor de carga y tamaño de la flota	Varios parámetros configurables	Coefficientes de conversión en la función objetivo
Israeli y Ceder (1993)	Minimizar tiempos de transferencia y tamaño de la flota	No especificadas	Formulación multiobjetivo	
Ngamchai y Lovell (2000)	Minimizar tiempos de transferencia y tamaño de la flota	Factor de carga	Modelo detallado, frecuencias óptimas	Coefficientes de conversión en la función objetivo
Gruttner, Pinninghoff, Tudela y Díaz (2002)	Maximizar beneficios al operador y minimizar costos de usuario	Distancia de acceso y salida (origen y destino)	Modelo alternativo de asignación (logit)	Falta tratamiento de frecuencias y flota. Coefficientes de conversión en la función objetivo

Fuente: (Mauttone et al., 2002)

La formulación de los modelos mencionados en la Tabla 3.1 se muestra enseguida.

La formulación del modelo de Baaj y Mahmassani (1991) se presenta en la Ecuación (6):

$$\min\{c_1 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} t_{ij} + c_2 \sum_{k \in R} f_k t_k\} \quad (6)$$

Sujeto a (Ecuaciones (7) a (9)):

$$f_k \geq f_{min} \quad \forall k \in R \quad (\text{frecuencia factible}) \quad (7)$$

$$LF_k = \frac{(Q_k)_{max}}{f_k CAP} \leq LF_{max} \quad \forall k \in R \quad (\text{factor de carga}) \quad (8)$$

$$\sum_{k \in R} N_k = \sum_{k \in R} f_k t_k \leq W \quad (\text{tamaño de la flota}) \quad (9)$$

Donde:

n = cantidad de nodos de la red

d_{ij} =demanda (cantidad de viajes por unidad de tiempo) entre los nodos i y j

t_{ij} =tiempo total de viaje entre i y j (en vehículo, espera y transferencia, si existe)

N_k =cantidad de autobuses operando en la ruta k , $N_k=f_k T_k$

f_k =frecuencia de autobuses operando en la ruta k

f_{min} =mínima frecuencia de autobuses permitida para toda la ruta

T_k =tiempo total de viaje de la ruta k

W =tamaño de la flota disponible (cantidad de autobuses por hora)

LF =factor de carga en la ruta k

$(Q_k)_{max}$ =máximo flujo por arco en la ruta k

CAP =capacidad de pasajeros sentados en los autobuses

LF_{max} =máximo factor de carga permitido

R =conjunto de rutas para una solución dada

c_1 y c_2 =factores de conversión y pesos relativos de los términos de la función objetivo

Por otra parte, el modelo de Israeli y Ceder (1993), es similar al que propusieron Baaj y Mahmassani (1991), pero se formula como un problema de optimización multiobjetivo, se muestra en las Ecuaciones (10) y (11), cabe señalar que las restricciones son las mismas que en el modelo de Baaj y Mahmassani (1991) (Ecuaciones (7), (8) y (9)).

$$\min Z_1 = a_1 \sum_{i,j \in N} PH_{ij} + a_2 \sum_{i,j \in N} WH_{ij} + a_3 \sum_{r \in R} EH_r \quad (10)$$

$$\min Z_2 = FS \quad (11)$$

Donde:

N = Nodos de la red

PH_{ij} = cantidad de pasajeros/hora, entre los nodos i y j

WH_{ij} = tiempo de espera de pasajeros entre los nodos i y j

EH_r = tiempo de viaje vacío, que refleja la utilización de los autobuses

FS = tamaño de la flota

R = conjunto de rutas para una solución dada

a_1, a_2 y a_3 = pesos que reflejan la importancia relativa de los términos de la función Z_1

El modelo de Ngamchay y Lovell (2000), también cuenta con una formulación similar a la de Baaj y Mahmassani (1991), permite calcular frecuencias de rutas; aunque requiere del uso de coeficientes de conversión a la misma unidad (\$/hora) de todos los componentes de la función objetivo, los cuales se muestra en las Ecuaciones (12) a (15).

$$\min\{FC + UVC + UWC\} \quad (12)$$

Donde:

$$FC = \frac{2C_V}{V} \sum_{k=1}^R \frac{d_k}{h_k} \quad (\text{costo de la flota}) \quad (13)$$

$$UVC = \frac{\gamma V}{V} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij} D_{ij} \quad (\text{costo de viaje en vehículo de los usuarios}) \quad (14)$$

$$UWC = \frac{\gamma W}{2} \sum_{k=1}^R \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij} \alpha_{ij} h_k \quad (\text{costo de espera de los usuarios}) \quad (15)$$

M = cantidad de nodos de la red

R = cantidad de rutas de una solución determinada

C_V = costo por hora de operación de los autobuses

V =velocidad de los autobuses en la red

d_k =largo de la ruta k

q_{ij} =demanda entre los nodos i y j (cantidad de viajes por hora)

D_{ij} =largo de la ruta más corta seleccionada por los pasajeros viajando de i a j

$\alpha_{ijk}=1$ si la ruta k utiliza el arco (i, j), $\alpha_{ijk}=0$ en caso contrario

γ_v y γ_w =coeficientes que reflejan el valor subjetivo de los tiempos de viaje y espera

h_k =espaciamiento temporal del servicio operante en la ruta k (inverso de la frecuencia)

Finalmente, el modelo de Gruttner et al. (2002), difiere de los anteriores, ya que es un modelo de asignación alternativo, usa el método logit mediante el cálculo de utilidades de cada línea para cada par origen-destino (i, j).

No se contemplan aspectos como las frecuencias y dimensiones de la flota, la función objetivo del modelo se muestra en la Ecuación (16) y se presentan otras ecuaciones de ayuda (Ecuaciones (17) a (20)).

$$\max \{ \alpha FO(R_i) - \beta FU(R_i) \} \quad (16)$$

Donde:

R_i =i-ésima ruta válida ($R_i \in R$, conjunto de rutas válidas)

α y β =coeficientes que representan la importancia relativa de cada objetivo

$$FO = IO_L - CO_L \quad (\text{función de beneficio del operador}) \quad (17)$$

$$IO_L = AF_L T_L \quad (\text{ingreso operador}) \quad (18)$$

$$CO_L = Distancia_L K_L \quad (\text{costo operador}) \quad (19)$$

AF_L =afluencia total de viajes que atrae la ruta L

T_L =tarifa cobrada por la línea L

K_L =costo unitario de operación por kilómetro

$$FU = CU_L = \sum_i \sum_j (\delta t_{ijL}^a + t_{ijL}^v + \eta t_{ijL}^e) * VST * V_{ijL} \quad (20)$$

$t_{ijL}^a, t_{ijL}^v, t_{ijL}^e$ = los tiempos de acceso a la línea, de viaje y de espera respectivamente

VST =valor subjetivo del tiempo

V_{ijL} =número de viajes entre cada par origen-destino (i, j) que utilizan la línea L

δ y η =pesos relativos de los tiempos de acceso y espera con respecto al tiempo de viaje

Como se puede apreciar, hasta ahora se han tratado diferentes modelos, pero ninguno de ellos integra información en tiempo real.

Con los avances tecnológicos que se tienen hoy en día, además de los diferentes dispositivos con los que están equipadas las unidades, como contadores de pasajeros o GPS, la información se recolecta en cada momento, por lo que fue necesario generar nuevos modelos que sean capaces de usar esta información.

Enseguida se presenta un modelo desarrollado por Sáez et al. (2012), en donde optimizan el desempeño del sistema de transporte público en tiempo real, toman en cuenta la variabilidad de la demanda en las diferentes paradas y utilizan una función objetivo orientada a minimizar el tiempo total de viaje de los usuarios (el tiempo de viaje incluye el tiempo de espera en la parada y el tiempo a bordo de la unidad).

Sáez et al. (2012) utilizan un modelo de control predictivo híbrido (HPC) que incluye una función objetivo dinámica y un modelo predictivo del sistema de autobuses, el sistema es presentado en la Figura 3.22, en donde la red tiene un solo sentido, P paradas y b autobuses.

A cada pasajero le asigna una parada origen y una parada destino, así como un tiempo que indica su llegada a la parada origen. A partir de datos históricos, estiman una matriz de demanda de parada a parada, sin embargo, la información de la demanda en tiempo real puede usarse como complemento para esta matriz.

En el modelo cuentan con variables discretas (número de pasajeros en los autobuses) y continuas (posición del autobús y velocidades), razón por la cual usan un HPC que considere los dos tipos de variables.

Los autores formulan el sistema híbrido para cuando los eventos son desencadenados por acciones específicas, para este caso, cada evento se desencadena cuando un autobús llega a una parada, entonces t_k representa el tiempo en el que el evento k ocurre, el evento k estará asociado a un autobús i en una parada p .

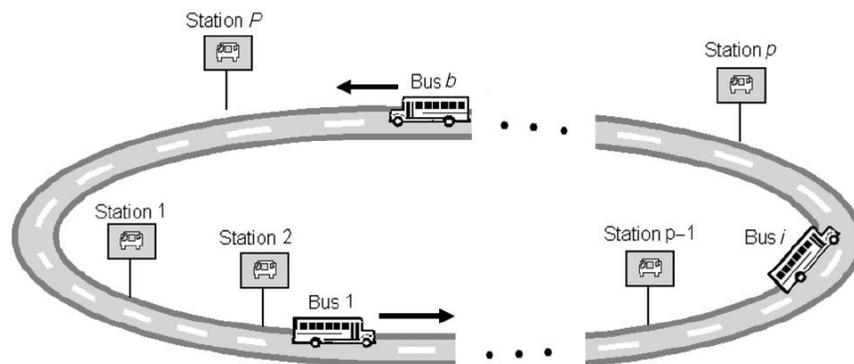


Figura 3.22. Sistema de autobuses
Fuente: (Sáez et al., 2012)

En la Figura 3.23 se muestra un esquema general del sistema de autobuses y las principales variables involucradas. Cuando un evento k ocurre, el controlador predictivo híbrido genera ciertas acciones de control y se obtienen algunas salidas.

Para cada autobús i , conocen $x_i(t)$ que es su posición en el instante t , $T_i(t)$ que representa el tiempo que le falta para llegar a la siguiente parada, sabiendo esto, un evento k será desencadenado por el autobús i en cualquier parada p , cuando $x_i(t)$ concuerde con la posición de una parada, en ese momento $t=t_k$ y $T_i(t_k)=0$.

Las variables susceptibles de cambios serán $h_i(k)$ que representa el lapso durante el cual el autobús i se detendrá en la parada asociada al evento k , y $Su_i(k)$ que es una variable binaria que será igual a uno si a los pasajeros se les permite subir al autobús i en la parada asociada al evento k , cero en otro caso.

Por otra parte, $L_i(k+1)$ representa la carga de pasajeros y $Td_i(k+1)$ es el tiempo de salida del autobús de la parada.

En la misma Figura 3.23, la variable $\Gamma_p(k)$ es el número de pasajeros esperando en la parada p , mientras $\hat{A}_i(k)$, $\hat{B}_i(k)$ y $\hat{\Gamma}_p(k+1)$ son estimados e incorporados al modelo. $\hat{\Gamma}_p(k+1)$ es la predicción del número de pasajeros que estarán en el autobús i cuando salga de la parada p , $\hat{B}_i(k)$ es el número esperado de pasajeros que subirán al autobús i en el evento k y $\hat{A}_i(k)$ representa el número estimado de pasajeros que bajarán del autobús i en el evento k .

Una vez que tienen todas las entradas del modelo, obtuvieron $h_i(k)$ y $Su_i(k)$, que son las posibles acciones de control que se pueden llevar a cabo, la primera representa un tiempo de detención de la unidad en una determinada parada, la segunda, es un método que implica que las unidades no paren en todas las paradas de la ruta, se puede representar como sigue:

$$Su_i(k) = \begin{cases} 1 & \text{si } \Theta(i, k) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

En donde $\Theta(i, k)$ se cumple si los pasajeros pueden subir al autobús i o si algún pasajero a bordo del autobús i alcanza su destino en el evento k , ya que esto implica que la parada no se puede saltar.

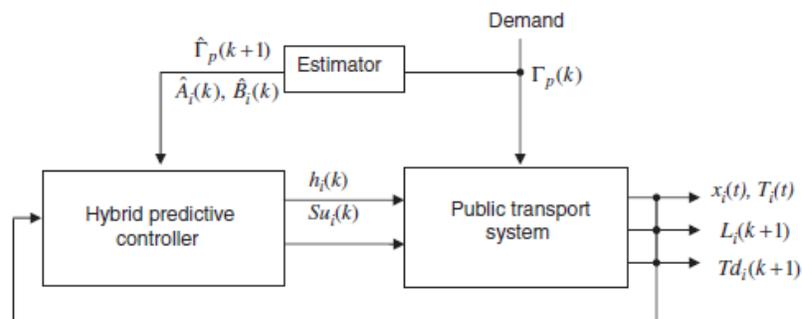


Figura 3.23. Esquema de las principales variables involucradas en el modelo
Fuente: (Sáez et al., 2012)

El modelo predictivo describe el comportamiento dinámico de las variables en función de las acciones de control llevadas a cabo.

Primero, describen la posición del autobús en el instante t , $\hat{x}_i(t)$ en función de la velocidad instantánea del autobús $v_i(t)$, calculan así la posición del autobús i en el tiempo t con base en la Ecuación (21):

$$\widehat{x}_i(t) = x_i(t_k) + \int_{t_k}^t \widehat{v}_i(v) dv \quad (21)$$

Donde t_k es el instante cuando el evento k es desencadenado y $x_i(t_k)$ la posición del autobús i en el instante t_k . Modelan la velocidad instantánea $\widehat{v}_i(t)$ como una velocidad constante v_o cuando el vehículo está en movimiento y cero en otro caso.

En la Figura 3.24 se muestra la función de la velocidad del autobús i mientras viaja de la parada a la que llegó en el instante k hasta que llega a la siguiente parada de su ruta, la cual se asocia con el instante $k+d$.

En la misma Figura 3.24, $\widehat{T}_{r_i}(k)$ es el tiempo estimado asociado a la transferencia de pasajeros (tiempo de entrada y salida de pasajeros del autobús) y $\widehat{T}_{v_i}(k)$ es el tiempo estimado de viaje entre dos estaciones consecutivas, $h_i(k)$ es una de las acciones de control susceptibles de modificar.

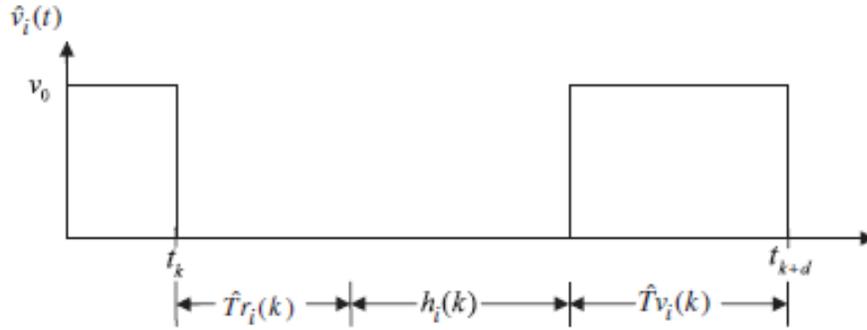


Figura 3.24. Función de velocidad del autobús i
Fuente: (Sáez et al., 2012)

Cuando un autobús está en una parada, la velocidad es igual a cero, mientras se está haciendo la transferencia de pasajeros y durante el periodo de espera, lo cual indica que la velocidad instantánea depende de esas variables (Ecuación (22)).

$$\widehat{v}_i(t) = \begin{cases} 0 & t_k \leq t \leq t_k + \widehat{T}_{r_i}(k) + h_i(k) \\ v_o & t_k + \widehat{T}_{r_i}(k) + h_i(k) \leq t \leq t_{k+d} \end{cases} \quad (22)$$

Mientras el tiempo que le falta al autobús i (medido del instante t) para llegar a la siguiente parada, lo obtuvieron como se muestra en la Ecuación (23).

$$\widehat{T}_i(t) = t_k + S u_i(k) * (h_i(k) + \widehat{T}_{r_i}(k)) + \widehat{T}_{v_i}(k) - t, \quad t_k \leq t \leq t_{k+d} \quad (23)$$

Por otra parte, analíticamente la carga de pasajeros $\widehat{L}_i(k+1)$, es decir, el número estimado de pasajeros en el autobús i al partir de la parada lo obtuvieron usando la Ecuación (24).

$$\widehat{L}_i(k+1) = \begin{cases} \min\{\bar{L}, L_i(k) + Su_i(k)(\widehat{B}_i(k) - \widehat{A}_i(k))\} & \text{si el autobús desencadena el evento } k \\ L_i(k) & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (24)$$

Donde \bar{L} es la capacidad del autobús, $L_i(k)$ es la carga de pasajeros del autobús i en el instante k , $\widehat{B}_i(k)$ corresponde al número esperado de pasajeros que subirán al autobús i , mientras $\widehat{A}_i(k)$ representa el número estimado de pasajeros bajando del autobús i en el evento k .

Estas dos últimas variables las obtuvieron mediante análisis estadísticos de los datos recolectados por sensores localizados en las paradas de autobuses.

Sáez et al. (2012), utilizaron los datos obtenidos de días anteriores al estudio y también información del mismo día del análisis.

Adicionalmente, calcularon el tiempo de partida estimado $\widehat{T}d_i(k+1)$ del autobús i como sigue (Ecuación (25)):

$$\widehat{T}d_i(k+1) = \begin{cases} t_k + Su_i(k) * (h_i(k) + \widehat{T}r_i(k)) & \text{si el autobús desencadena el evento } k \\ Td_i(k) & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (25)$$

La predicción de la carga de pasajeros en la parada $\widehat{\Gamma}_p(k+1)$, es decir, el número de pasajeros esperando en la parada p , lo calcularon como se presenta en la Ecuación (26):

$$\widehat{\Gamma}_p(k+1) = \begin{cases} \Gamma_p(k) + \widehat{\delta}_p(k) - \widehat{B}_i(k) & \text{si el autobús desencadena el evento } k \\ \Gamma_p(k) + \widehat{\delta}_p(k) & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (26)$$

Donde $\Gamma_p(k)$ es la carga de pasajeros en la parada p en el instante k , $\widehat{\delta}_p(k)$ es el número de pasajeros que llega a la parada entre el instante k y el instante en el que el autobús sale de la parada.

Usando el tiempo de partida estimado, predicen el intervalo $\widehat{H}_i(k+1)$ del autobús i que desencadenó el evento k , con respecto al autobús precedente $i-1$ que pasó por la misma parada (Ecuación (27)).

$$\widehat{H}_i(k+1) = \widehat{T}d_i(k+1) - \widehat{T}d_{i-1}(k+1 - z_{i-1}) \quad (27)$$

Donde $\widehat{T}d_i(k+1)$ es el tiempo de partida estimado del autobús i y $\widehat{T}d_{i-1}(k+1 - z_{i-1})$ representa el tiempo de partida estimado del autobús precedente $i-1$ que desencadena el evento $k - z_{i-1}$ en la misma parada. La variable z_{i-1} representa el número de eventos entre la llegada del autobús $i-1$ y el autobús i , a la misma parada.

Sin embargo, también existen algunas restricciones físicas y operacionales que consideraron, la primera de ellas es la restricción de capacidad, que indica que el autobús no puede transportar más pasajeros que los que marca su máxima capacidad, que ya se vio en la Ecuación (24). También se puede introducir una política de servicio para asegurar que no se tendrá sobrecarga en las unidades.

Otra restricción que consideraron fue que no existen nodos de transferencia, es decir, cuando un pasajero sube a un autobús, bajará de la misma unidad en su parada de destino, y así, una vez que el pasajero llegué a dicha parada, descenderá, pero no se quedará esperando otra unidad en la parada, consideraron que la persona busca minimizar su tiempo de viaje, por lo que asumen que baja en la parada más cercana a su destino y no tiene que usar de nuevo el servicio.

Después definieron la función objetivo (Ecuación (28)) con la finalidad de llevar a cabo las decisiones en tiempo real y optimizar el sistema, en este caso buscaban minimizar los tiempos de los usuarios, tanto el tiempo total en la unidad, como los tiempos de espera en las estaciones.

$$\min_{\{u(k), u(k+1), \dots, u(k+Np-1)\}} \sum_{\ell=1}^{Np} \left[\theta_1 * \widehat{H}_i(k+\ell) \widehat{\Gamma}_p(k+\ell) + \theta_2 * (\widehat{H}_i(k+\ell) - \bar{H})^2 + \theta_3 * \widehat{L}_i(k+\ell) h_i(k+\ell-1) + \theta_4 * \widehat{L}_i(k+\ell) \widehat{T} r_i \widehat{L}_i(k+\ell-1) + \theta_5 * \widehat{\Gamma}_p(k+\ell) \widehat{H}_{i+1}(k+\ell+z_{i+1}) (1 - S u_i(k+\ell-1)) \right]_{i=i(k+\ell-1) \quad p=p(k+\ell-1)} \quad (28)$$

Donde $\{u(k), \dots, u(k+Np-1)\}$ representan la secuencia de acciones de control con $u(k+\ell-1) = \begin{bmatrix} h_i(k+\ell-1) \\ S u_i(k+\ell-1) \end{bmatrix}$ cuando el autobús i desencadena el evento $k+\ell-1$; Np es horizonte de predicción y b es el número de autobuses en la flota.

Por otra parte, $i=i(k+\ell-1) \in \{1, \dots, b\}$, $p=p(k+\ell-1) \in \{1, \dots, P\}$, si se considera que un evento futuro $k+\ell-1$ es desencadenado por un autobús $i(k+\ell-1)$ llegando a una parada específica $p(k+\ell-1)$.

En la Ecuación (28), $\theta_j, j=1, \dots, 5$, son parámetros que cambian dependiendo el problema específico que se esté tratando.

H es el intervalo designado para dar servicio a la demanda durante cierto periodo de tiempo.

El primer término de la Ecuación (28), cuantifica el total del tiempo de espera de los pasajeros en las estaciones, el segundo término representa la regularización de los intervalos entre autobuses, para mantener dicho intervalo lo más cerca posible del de diseño, el tercer componente mide el retraso ocasionado para los pasajeros por el tiempo que espera el autobús en una determinada parada a causa del uso de una de las estrategias de control antes mencionadas.

El cuarto término indica el tiempo extra que permanecen los pasajeros en la unidad debido a los tiempos de transferencia de pasajeros (subidas y bajadas en las paradas).

Finalmente, el quinto componente representa el tiempo extra que debe esperar un pasajero en una parada si ésta es “saltada” como parte de una de las acciones de control implantadas.

Es importante mencionar que la función objetivo en este caso, está orientada a la satisfacción de los usuarios y el nivel de servicio de la línea. Debido a esto, como se puede apreciar los costos de operación no fueron considerados.

3.4.3. Prioridad semafórica

Este tipo de *software* se utiliza para controlar las señales del tráfico en general, es decir, no solamente sirve para brindar prioridad semafórica a ciertas unidades, también se usa para adaptar las fases de los semáforos dependiendo de la cantidad de vehículos en las intersecciones.

Es importante mencionar que el *software* destinado a la prioridad semafórica no se incluye como tal dentro de un Sistema Avanzado para el Transporte Público, ya que, si bien es una aplicación que sirve para que estas unidades continúen su camino con la menor cantidad de interrupciones, se clasifica como un sistema adaptativo de control del tráfico.

SCATS y SCOOT forman parte del *software* más utilizado en este aspecto, ambos cuentan con la posibilidad de brindar prioridad semafórica, no solamente a unidades del transporte público, también a vehículos de emergencias, como ambulancias o camiones de bomberos.

SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System), se encarga de adaptar las fases semafóricas para optimizar el flujo en las redes. Opera en tiempo real y calcula automáticamente los tiempos apropiados para cada una de las fases dependiendo de la demanda. Fue desarrollado en Australia, pero actualmente se utiliza en más de 250 ciudades en alrededor de 27 países (SCATS, 2016).

Dentro de los principales componentes de SCATS, se encuentra SCATS Access, que es la parte principal, es decir, la interfaz gráfica, SCATS Picture que permite crear gráficas de cada una de las intersecciones, subsistemas o regiones, y SCATS Log que se encarga de brindar acceso directo a los datos de la intersección (McCann, 2014). Pero también se cuenta con Traffic Reporter, que proporciona reportes de manera gráfica o tabular de los volúmenes detectados en las intersecciones, tal como se muestra en la Figura 3.25.

Y finalmente, SCATS History Reader muestra la información histórica recolectada y guardada por SCATS, a través de ella se puede verificar la secuencia y los tiempos de fases en cualquiera de las intersecciones controladas por el sistema en un momento determinado (McCann, 2014).

De manera general, SCATS lo que arroja es un conjunto de parámetros para los diferentes subsistemas que tiene controlados, y cada subsistema puede estar compuesto por una o varias intersecciones.

Entre estos parámetros se encuentran el tiempo de ciclo y el plan de cambio de fases, entre algunos otros.

En la Figura 3.26 se aprecia la interfaz del usuario en SCATS, en donde se muestra la intersección, el plan que se tiene activo al momento de hacer la consulta y algunos otros valores.



Figura 3.25. SCATS Traffic Reporter
Fuente: (McCann, 2014)

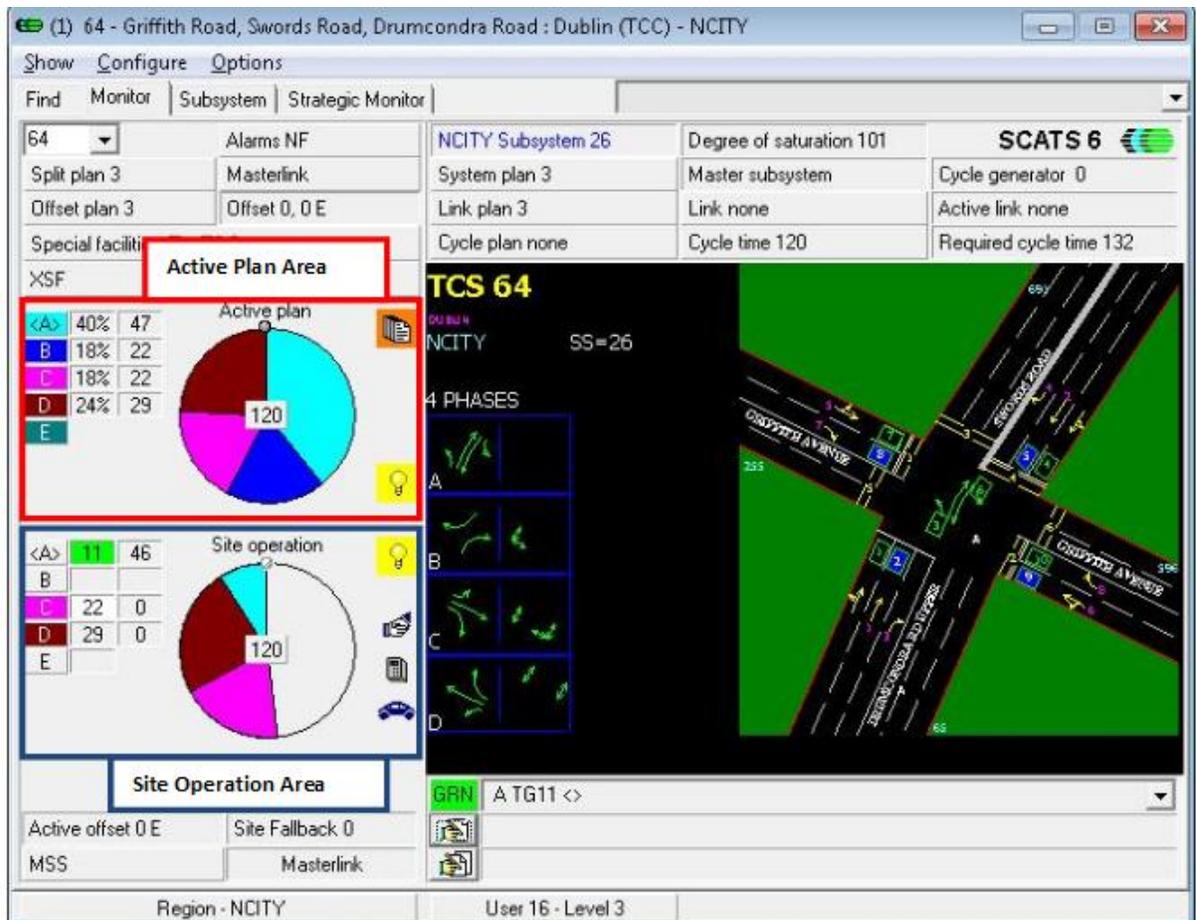


Figura 3.26. Interfaz del usuario en SCATS

Fuente: (McCann, 2014)

Pero SCATS también cuenta con un módulo SIT, mismo que puede adquirirse por separado, pero no es una aplicación independiente, es decir, se requiere que el *software* SCATS funcione para poder utilizarlo [Aldridge Traffic Controllers (ATC), 2008].

Este módulo permite el intercambio de datos entre SCATS y una aplicación SIT externa, de esta manera, un usuario puede acceder a la información almacenada en la base de datos de SCATS, pero también SCATS puede recibir datos, analizarlos y proporcionar la prioridad semafórica si un autobús cumple con los criterios establecidos (ATC, 2008).

Por su parte, SCOOT (Split, Cycle and Offset Optimization Technique) de igual manera busca hacer una optimización de la red haciendo cambios en las fases semafóricas y sus ciclos (Siemens, 2016a).

Este *software* fue creado en 1973 por el Laboratorio de Investigaciones del Transporte en el Reino Unido, pero fue puesto en funcionamiento por primera vez en 1979 (Imtech Traffic et al., 2012).

El componente básico de SCOOT es su modelo para la predicción de la demanda a corto plazo, lo utiliza para predecir los efectos que ocasionan pequeños cambios en los tiempos de las fases semafóricas. SCOOT también utiliza los datos recolectados por detectores instalados en las vialidades (Siemens, 2016a).

Esta información es procesada y se actualizan los ciclos semafóricos, con la finalidad de reducir tiempos de viaje, mejorar la calidad del aire, disminuir el consumo de energía, etc. (*Microsharp Software Technologies*, 2016).

De manera general, SCOOT incrementa o disminuye el ciclo semafórico buscando asegurar que la intersección más crítica opere a su máximo grado de saturación, que en este *software* se considera del 90% (Imtech Traffic et al., 2012).

Los ciclos pueden ser re-optimizados en intervalos de tiempo de mínimo 2.5 minutos, pero siempre se debe respetar un límite inferior y un límite superior en los tiempos de las fases, esto obedece a ciertas restricciones de seguridad en el cruce de peatones o no dejar en fase roja una entrada a la intersección por periodos excesivos (Imtech Traffic et al., 2012).

SCOOT cuenta con prioridad semafórica diferenciada, además de detección de incidentes y acceso a bases de datos con la información recopilada (Imtech Traffic et al., 2012).

Cabe señalar que la prioridad semafórica diferenciada permite que se le dé preferencia a aquellos autobuses o vehículos que van considerablemente retrasados con respecto a su itinerario, es decir, si un autobús va rezagado se le brinda luz verde para que continúe su camino sin interrupciones y pueda llegar a la siguiente estación en el tiempo señalado. Mientras tanto a las unidades que se encuentran dentro de sus horarios programados, se les otorga una prioridad media o baja.

3.5. CENTRO DE CONTROL

Como ya se ha mencionado anteriormente, toda la información que se recolecta en las vialidades debe ser enviada a un centro de control, donde después de ser analizada, servirá para llevar a cabo diferentes procesos (IBM, 2016).

Se puede afirmar que el centro de control es el lugar donde son tomadas las decisiones y en donde se hace la gestión del transporte (Perallos et al., 2016).

También es donde se almacenan todos los datos que día con día se reciben, formando así las bases de datos que sirven como información histórica para posteriores análisis.

Los centros de control pueden ser de diferentes tamaños, todo dependerá de los objetivos que se pretenden cumplir, de la cantidad de información que será centralizada, el personal que ahí laborará, la región que deberán atender y los diferentes sistemas de transporte que se deban coordinar.

Después de determinar los objetivos que deberá cumplir el centro de control, se establecen las actividades que ahí se llevarán a cabo y los datos que se requieren para ello.

Pero es importante señalar, que los centros de control no son exclusivos de los Sistemas Avanzados para el Transporte Público, es decir, pueden brindar muchos más servicios, de hecho, eso es lo ideal. En la Figura 3.27 se muestra un ejemplo de un centro de control.



Figura 3.27. Centro de Control
Fuente: (Goicoechea, 2016)

En la ciudad de México se cuenta con el CITI de Metrobús (Figura 3.28), desde donde se monitorea en tiempo real la ubicación de las unidades de dicho sistema de transporte.

Generalmente dentro de un centro de control se cuenta con diferentes subsistemas y equipos para que cumplan todas sus funciones, en la Figura 3.29 se presenta una arquitectura básica.

El sistema de gestión de video es el encargado de mostrar “las imágenes de las diferentes cámaras de supervisión del sistema de transporte” (Roldán y Rodríguez, 2010).

Para ello es que se cuenta con los *videowalls* o pantallas mural, mediante las que es posible visualizar en tiempo real lo que está sucediendo en las paradas o incluso dentro de las unidades de los sistemas de transporte público si los autobuses tienen cámaras instaladas.

Un *videowall* consiste en una matriz de monitores, en cada uno de los cuales se puede desplegar una imagen diferente, o lograr que todos juntos formen una sola pantalla.

Además, los sistemas de información a los usuarios son los destinados a la publicación de mensajes para la población, tanto de información referente a incidencias y/o restricciones que afecten la circulación, como lo relacionado con el transporte público (Roldán y Rodríguez, 2010).

Por otra parte, dentro de los subsistemas que se pueden encontrar también está el de gestión centralizada del transporte, que “consta de un *software* específico, para la gestión centralizada de los diferentes equipamientos de regulación del transporte” (Roldán y Rodríguez, 2010).

Y en cuanto a los sistemas de comunicación, primero es necesario establecer el tipo de sistema que enlace los dispositivos que se encuentran instalados en las vialidades con el centro de control, y después permita que, una vez hechos los procedimientos necesarios, desde ahí se envíe información a los usuarios del sistema para la realización de sus viajes.



Figura 3.28. CITI Metrobús
Fuente: Propia

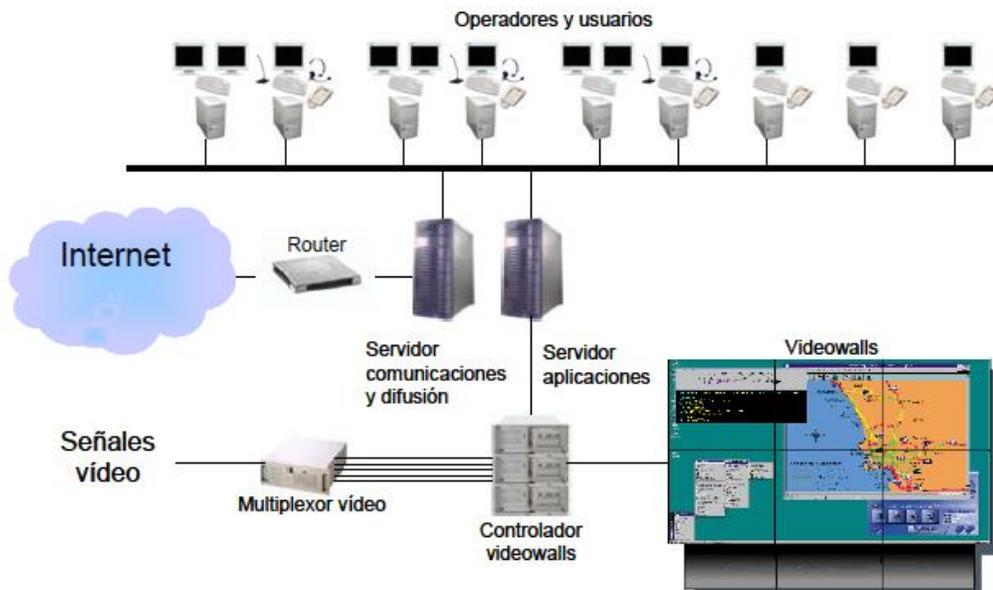


Figura 3.29. Arquitectura de un centro de control
Fuente: (Ponsa y Granollers, s.f.)

Pero también se requiere que dentro del mismo centro se utilice un sistema de comunicación que permita que se den los flujos de información entre los distintos operadores, para lo cual generalmente se utilizan redes de área local (LANs).

Una red de área local consiste en un “grupo de equipos de cómputo y dispositivos asociados que comparten una línea de comunicación común con un servidor” (Rouse, 2016).

Este tipo de redes incluyen “cables, conmutadores, enrutadores y otros componentes que permiten a los usuarios conectarse a servidores internos, sitios web y otras redes LAN a través de redes de área extensa” (Rouse, 2016).

Referente a los operadores, cada uno de ellos debe contar con una consola de control, generalmente cuentan con uno, dos o hasta tres monitores, dependiendo de las necesidades, desde donde el personal se encargará de monitorear la situación del transporte y llevar a cabo las acciones pertinentes.

No existe un número mínimo ni máximo de operadores, todo dependerá de los objetivos del centro, así como del tamaño del sistema que deberá controlar.

3.6. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN

Para lograr el buen funcionamiento de un Sistema Avanzado para el Transporte Público, es necesario que se cuente con un sistema de comunicación adecuado, ya que es el responsable de que la información se pueda transferir para que se lleve a cabo su procesamiento.

3.6.1. Conceptos básicos

Los sistemas de comunicación constan de tres partes principales que son: transmisor, canal de comunicación y receptor.

El transmisor es el encargado de convertir el mensaje que se desea enviar a una señal adecuada para transmitirse por el canal de comunicación, mismo que sirve de enlace entre el transmisor y el receptor, la fibra óptica o cable coaxial son ejemplos de canales de comunicación, finalmente al receptor le llega la señal directamente del canal y con ella reconstruye el mensaje original (Cableducación.org.mx, s.f.).

Los sistemas de comunicación suelen catalogarse de diferentes maneras, por ejemplo, se pueden “clasificar por la forma en que se envía el mensaje, ya sea digital o analógico, y puede ser en banda base, o en una portadora” (Jardón y Linares, 1995).

Se conoce como banda base “al conjunto de señales que no sufren ningún proceso de modulación a la salida de la fuente que las origina, [...] son transmitidas en su frecuencia original” (Requiz, 2009).

Mientras en las portadoras sí se lleva a cabo un proceso de modulación de la señal que se quiere transmitir, así es “posible aprovechar el canal comunicativo [...] para transmitir un mayor caudal de datos de manera simultánea” (Pérez y Gardey, 2012c).

Por otra parte, una fuente de información análoga es aquella que presenta una variación continua en el tiempo, y “a una variación significativa del tiempo le corresponderá una variación igualmente significativa del valor de la señal” (EcuRed, 2016).

Las señales de este tipo se pueden percibir en la naturaleza, como el sonido, la luz, etc., ya que varían constantemente, formando así una onda senoidal como se muestra en la Figura 3.30.

Por otra parte, una señal digital solo puede tener ciertos valores discretos, ya que no puede tomar toda la gama de valores como lo hace una señal análoga. La forma que toman las señales digitales se puede apreciar en la Figura 3.30, una onda cuadrada.

A diferencia de las señales análogas, las digitales no se pueden encontrar en la naturaleza tan fácilmente, más bien son producidas por el hombre, las computadoras trabajan de manera digital, “por ende el inicio y el final de cualquier comunicación entre computadoras se efectuará en forma digital” (Gutiérrez, 2012).

Pero existen procesos para transformar señales análogas a digitales y que puedan así ser utilizadas, a esto se le llama digitalización.

Una forma simple de hacerlo es mediante un procedimiento denominado muestreado, donde cada cierto intervalo se lee el valor de la señal analógica, y si éste se encuentra debajo de cierto umbral que se haya establecido, la señal digital tomará el valor más bajo, que generalmente es 0, para el caso contrario se le asigna el valor más alto, usualmente 1 (EcuRed, 2016).

Sin embargo, es importante mencionar que el procedimiento requerido para hacer la digitalización depende en gran medida del tipo de datos que se tengan de entrada.

Sin embargo, uno de los principales problemas de las señales digitales es la distorsión, misma que se da cuando pasa por el medio o canal de transmisión, “para solucionar este inconveniente, se colocan dispositivos denominados repetidores regenerativos, que intentan reconstruir la señal tal como ha sido enviada” (Gutiérrez, 2012).

De acuerdo con Jardón y Linares (1995), los sistemas de comunicación también se pueden dividir dependiendo del medio o canal de transmisión que emplean, ya que cada uno de ellos cuenta con características propias, así como ventajas y desventajas. A grandes rasgos, se tienen sistemas alámbricos e inalámbricos, enseguida se explican sus características principales.

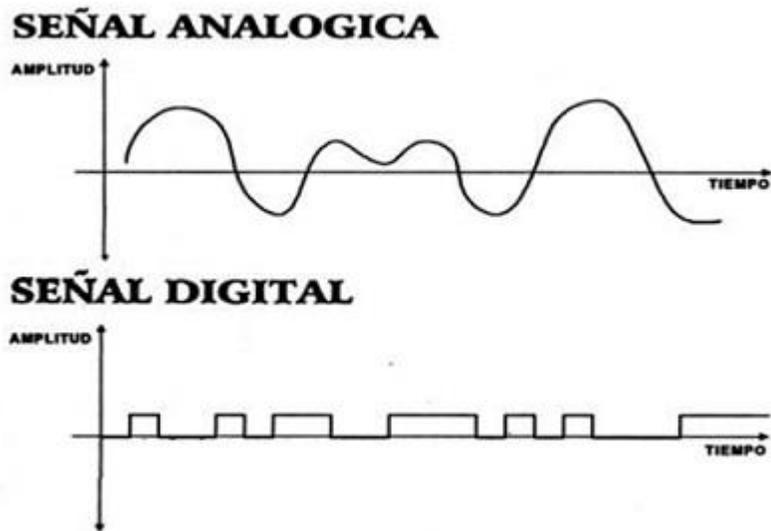


Figura 3.30. Representación señal análoga y digital
Fuente : (Gutiérrez, 2012)

3.6.2. Sistemas de comunicación alámbricos

La principal característica de los sistemas de comunicación alámbricos es que se requiere un medio físico para la transmisión de datos.

Un ejemplo de ello son los sistemas de comunicaciones por cable metálico, en los cuales el medio de transmisión debe ser conductor de electricidad. Entre sus principales características se encuentra que proporcionan mayor privacidad que los sistemas de radiocomunicación, es decir, es más difícil que se intercepten los datos que se envían (Jardón y Linares, 1995).

Para implantar un sistema de comunicación de este tipo, se cuenta con cable de pares y cable coaxial, entre otros.

El cable de pares está compuesto por hilos de cobre dispuestos en varios grupos de dos elementos que están enrollados, éstos se encuentran aislados entre sí y cuentan con una cubierta externa, como se muestra en la Figura 3.31 (Galván, 2012).

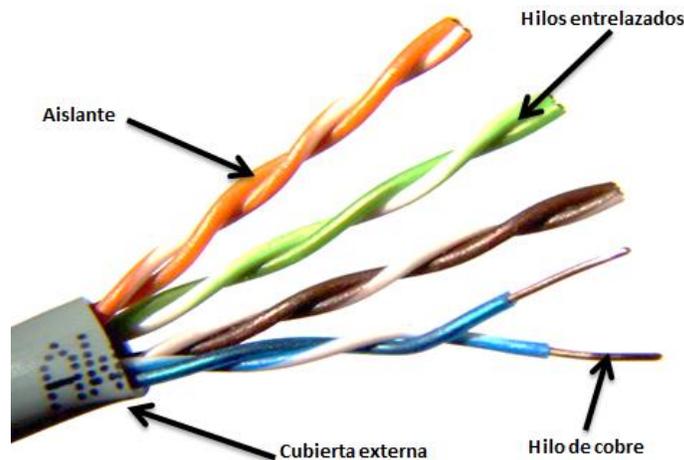


Figura 3.31. Cable de pares
Fuente: (Blog Tecnología, 2015)

Es importante mencionar que entre menor sea la longitud de trenzado más alta será la calidad del cable, y existen diferentes tipos de cables de pares, se cuenta con:

- UTP: Par trenzado no blindado. Cuenta con 4 pares de hilos, cada hilo de cobre está recubierto de cierto material aislante, es poco efectivo para comunicaciones a larga distancia, además su ancho de banda de transmisión y la velocidad no son los mejores, sin embargo, suele ser el cable más económico y su implantación no requiere un procedimiento complicado (Pérez y Gardey, 2012a).
- STP: Par trenzado blindado. Su nombre se debe a que cada par de hilos está envuelto en un papel metálico, con la finalidad de minimizar las interferencias, pero su precio es más elevado que el del cable UTP (Galván, 2012).
- ScTP: Par trenzado apantallado. También se le conoce como FTP, es un híbrido entre los dos anteriores, por lo que “consiste, básicamente, en un cable UTP envuelto en un blindaje de papel metálico” (Galván, 2012).

En la Figura 3.32 se muestra la principal diferencia entre un cable STP y un ScTP, es necesario recordar que todo este uso de aislamiento o blindajes hace que se eleve el tamaño, el peso y el costo del cable, es por eso que el cable UTP es el más sencillo y económico.



Figura 3.32. Cable STP y ScTP
Fuente: (Galván, 2012)

Además, “los materiales de blindaje hacen que las terminaciones sean más difíciles y aumentan la probabilidad de que se produzcan defectos de mano de obra” (Galván, 2012).

También existen diferentes categorías de cable trenzado, cada categoría cuenta con características determinadas de ancho de banda, velocidad de transmisión, etc. (Galván, 2012).

Mientras el cable coaxial (Figura, 3.33), está compuesto por 2 conductores, uno de ellos va en el centro (conductor vivo o central), cuya principal función es transportar los datos, el otro es una malla de cobre o aluminio, y entre ellos existe un material aislante (Pérez y Gardey, 2012a).

El cable coaxial permite comunicaciones en banda base y en banda ancha, en la banda base los datos transmitidos se dividen en paquetes, es decir, se genera una sucesión de paquetes que viajan hasta alcanzar su destino (Hormazabal, 2005).

Mientras la banda ancha, puede llevar “múltiples señales simultáneamente en un solo cable” (Hormazabal, 2005). Son más utilizadas en redes de área amplia que en redes de área local.

Para la transmisión en banda base se pueden distinguir dos tipos de cable coaxial, el grueso y el fino, el primero fue el más utilizado durante mucho tiempo, soporta grandes distancias, pero su precio es más elevado que el coaxial fino (Vargas, 2016).

Fue por eso que el cable coaxial fino surgió como una nueva alternativa más barata, flexible y fácil de instalar, pero “sus propiedades de transmisión son sensiblemente peores que las del coaxial grueso” (Vargas, 2016).

De manera general, las principales ventajas del cable coaxial son que permite la transmisión de voz, video y datos a distancias mayores que con otros tipos de cableado más económicos, en su momento fue una tecnología novedosa gracias a su resistencia a la interferencia, sin embargo, su uso ya está a la baja (Vargas, 2016).

Otra de sus principales desventajas es su grosor, que “limita su utilización en pequeños conductos eléctricos y en ángulos muy agudos” (Vargas, 2016).



Figura 3.33. Cable coaxial
Fuente: (Vargas, 2013)

Otro de los sistemas alámbricos más conocido y utilizado actualmente es la fibra óptica, en este caso también se emplea “un medio físico dieléctrico como canal de transmisión. [...] y la información viaja en forma de rayos de luz, o sea en ondas electromagnéticas guiadas” (Jardón y Linares, 1995).

Su funcionamiento de manera general se puede describir como sigue:

“para que se dé una transmisión usando este medio se necesita que a los extremos de ésta existan dispositivos electrónicos que de un lado envíen la información en forma de rayos de luz, y del otro lado haya un interpretador de esta información que reciba y decodifique la señal” (Hinojosa, 2007).

La fibra óptica se compone principalmente de tres partes (Fig. 3.34), según Santa Cruz (s.f.) son:

- Núcleo: es básicamente un cilindro de vidrio, a través de cual viaja la señal luminosa.
- Recubrimiento: tubo formado por un material de vidrio que se coloca alrededor del núcleo, su función es precisamente asegurar la conducción de la luz en el interior del núcleo.
- Revestimiento: es una capa de material plástico que reviste a la fibra óptica.

Cabe señalar que, aunque el núcleo y el recubrimiento son de vidrio, sus índices de refracción son diferentes, ya que cuando “un haz de luz que se propaga por un medio, ingresa a otro distinto, una parte del haz se refleja mientras que la otra sufre una refracción, que consiste en el cambio de dirección del haz” (Schnitzler, s.f.).

De manera general, el índice de refracción se define como “la velocidad de la luz en el vacío, dividido por la velocidad de la luz en el medio” (HyperPhysics, 2012). Es por eso que es necesario conocer el índice de refracción de los materiales, “para calcular la diferencia entre el ángulo de incidencia y el de refracción del haz” (Schnitzler, s.f.), es decir, hacer una comparación de las condiciones antes y después de ingresar al nuevo material.

Es así como el índice de refracción del núcleo es mayor que el de recubrimiento, gracias a lo cual la luz introducida se mantiene y se propaga en el núcleo, debido a un efecto llamado Reflexión Interna Total (Hinojosa, 2007).

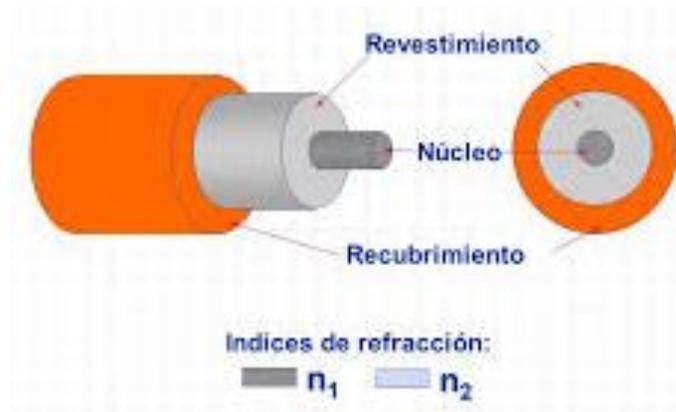


Figura 3.34. Estructura de la fibra óptica
Fuente: (Blandón, 2014)

De acuerdo con Santa Cruz (s.f.), algunas de las principales ventajas de la fibra óptica son las siguientes:

- Tiene un diámetro pequeño, lo que la hace flexible y liviana.
- La interferencia electromagnética no tiene efecto, a diferencia de los cables de cobre.
- En cuanto a la seguridad de la información transmitida, el cable de fibra óptica es mejor que el cable de cobre, ya que los datos no se pueden robar.
- Es capaz de transmitir datos a una velocidad más alta.

3.6.3. Sistemas de comunicación inalámbricos

Los sistemas de comunicación inalámbricos son aquellos que utilizan el espacio como medio de transmisión. Entre ellos se encuentran los sistemas de radiocomunicación, en los cuales “la información viaja en forma de ondas electromagnéticas no guiadas desde el transmisor hasta el receptor” (Jardón y Linares, 1995).

Como se puede apreciar en la Figura 3.35, el procedimiento que se sigue consiste en transformar ondas de voltaje y corriente u ondas electromagnéticas guiadas, en ondas electromagnéticas no guiadas, así una antena que se denomina transmisora será la encargada de radiar energía electromagnética, pero también se debe contar con otra antena, que será la receptora, y se encargará de detectar esta energía y después realizar el procedimiento inverso para ahora convertir las señales electromagnéticas no guiadas en ondas de voltaje y corriente u ondas electromagnéticas guiadas (Jardón y Linares, 1995).

Actualmente, estos principios tienen numerosas aplicaciones, el problema es que se “necesita homogeneizar las emisiones para que los equipos de distintos fabricantes puedan comunicarse entre sí sin provocar interferencias” (García, 2013).

Fue por esta razón que surgió Tetra (Terrestrial Trunked Radio) como un estándar de comunicaciones digitales que “permite la transmisión de voz y datos en las distintas modalidades previstas por dicho estándar” (Muñoz, 2004).

Tetra fue creado por ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), “un instituto que produce y mantiene protocolos de comunicación que se usan todos los días” (Mundo TETRA, 2014).

En un sistema convencional cada grupo de usuarios tiene un canal determinado y si un usuario quisiera comunicarse con otro de un grupo distinto, se vería obligado a cambiar su radio al canal respectivo, pero en caso de que el canal se encuentre ocupado, no podría transmitir su mensaje (Tomasi, 2003).

Sin embargo, como se muestra en la Figura 3.36, en un sistema Tetra, se crean grupos de usuarios independientes de los canales que se tengan, de esta manera cuando un usuario desea transmitir un mensaje, el sistema automáticamente le asigna un canal libre, en caso de que no se encuentre ninguno disponible, queda en una fila de espera durante cierto tiempo (Tomasi, 2003).

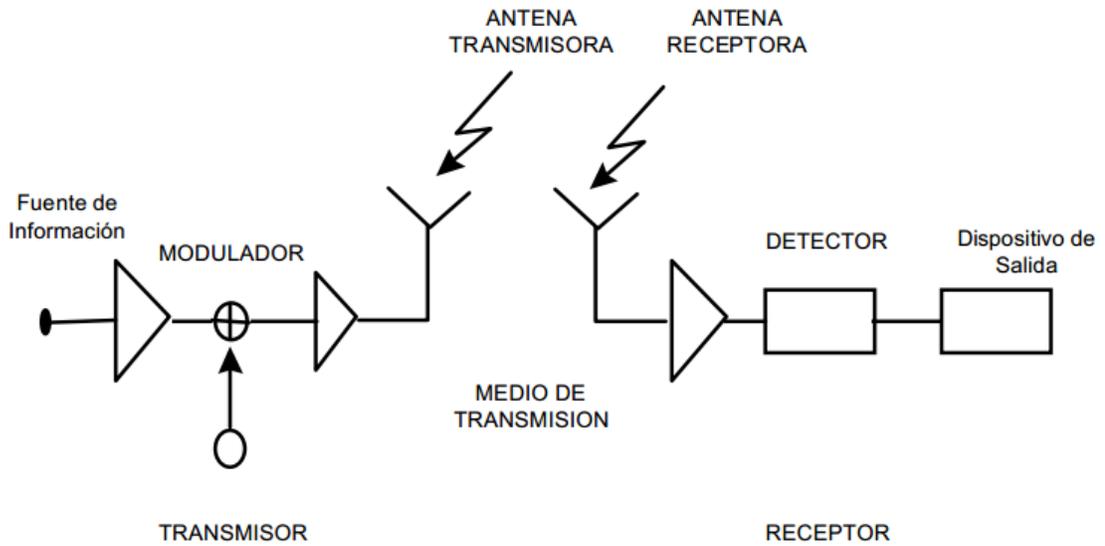


Figura 3.35. Funcionamiento de un sistema de radiocomunicación
Fuente : (Jardón y Linares, 1995)

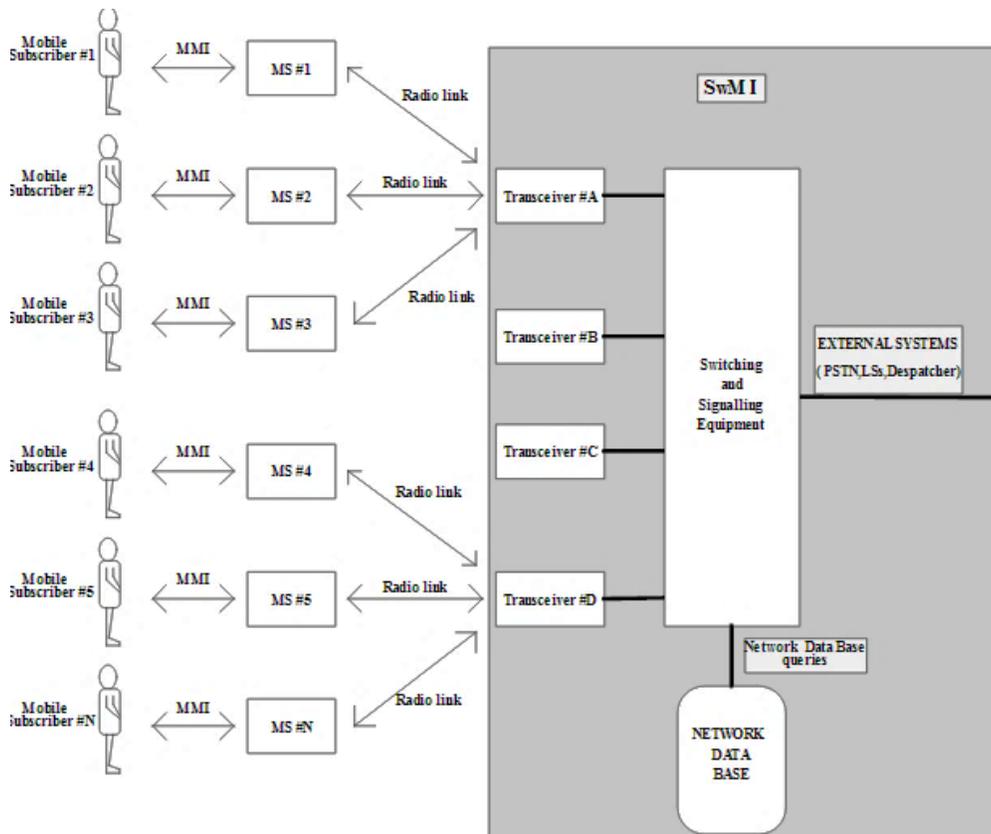


Figura 3.36. Estructura de la red Tetra
Fuente : (European Telecommunications Standards Institute, 1997)

Como se puede apreciar, se usa “una infraestructura para conectar a varios puntos y bases de radios, formando así redes más grandes, que en algunos casos cubren países enteros” (AR Comunicación Integral, 2017).

Tetra es usado por agencias gubernamentales, seguridad pública, servicios de emergencia, entre otros (AR Comunicación Integral, 2017).

Algunos de los requisitos que este tipo de usuarios necesitan y que representan algunas de las características de Tetra son las siguientes (Mundo TETRA, 2014):

- Comunicaciones seguras, es decir, que solo se reciban los datos por los usuarios autorizados.
- No puede haber interrupción en la comunicación, por ejemplo, en situaciones de emergencia o eventos especiales.
- El protocolo debe ser abierto, es decir, capaz de incorporar nuevas aplicaciones y maneras de uso.

Por último, es importante señalar que existe una organización denominada TETRA Association (Asociación TETRA) que se encarga de controlar este protocolo Tetra, además también lo publica con la finalidad de que los fabricantes cumplan con las especificaciones requeridas (Mundo TETRA, 2014).

Por otra parte, un tipo de sistema de comunicación que está principalmente enfocado al transporte es el denominado, DSRC o Dedicated Short-Range Communication.

Un sistema DSRC se compone de dos partes principalmente: dispositivos a bordo de los vehículos (OBU-On Board Unit) y los dispositivos viales (RSU-Road Side Unit) (Wang et al., 2002).

Los OBU se colocan generalmente cerca del parabrisas o la salpicadera del vehículo, mientras el RSU debe estar instalado a lo largo de las vialidades y se comunica con el OBU por medio de señales radioeléctricas [Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), 2000].

En la Figura 3.37 se muestra de manera general el funcionamiento de un sistema DSRC, donde se puede apreciar cómo se da la comunicación entre el OBU y RSU, pero después utilizando otras redes de comunicación de larga distancia también se puede hacer la transmisión de datos hasta el centro de control del transporte (Wang et al., 2002).

Este tipo de comunicaciones se utilizan, por ejemplo, para el envío de información de localización de los vehículos, cuando un OBU de una unidad del transporte público se comunica con un RSU, este último puede reportar al centro de control que ha detectado al vehículo, y una vez hecho esto, se puede hacer la predicción del tiempo de llegada de la unidad a la siguiente parada.

Tal procedimiento se muestra en la Figura 3.38, como se puede apreciar los RSU se localizan en un punto intermedio entre las dos estaciones del transporte público, no precisamente en la parada, esto debido a que en caso de que dos o más autobuses lleguen al mismo tiempo, el dispositivo sería incapaz de detectar todas las unidades. Se debe recordar que el sistema DSRC es de corto alcance y algún vehículo pudiera quedar fuera del rango, lo que generaría errores en las estimaciones.

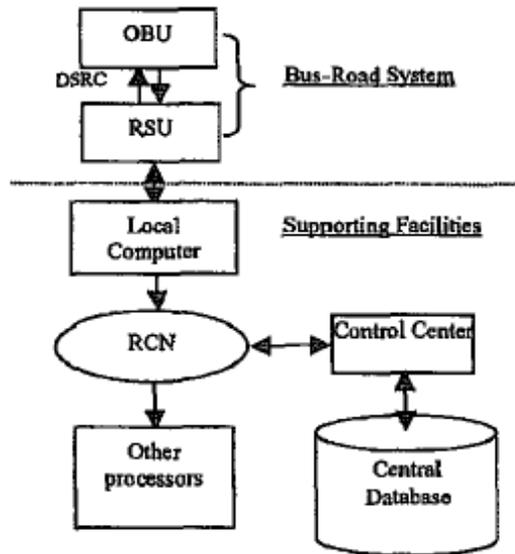


Figura 3.37. Esquema general del funcionamiento del sistema DSRC
Fuente: (Wang et al., 2002)

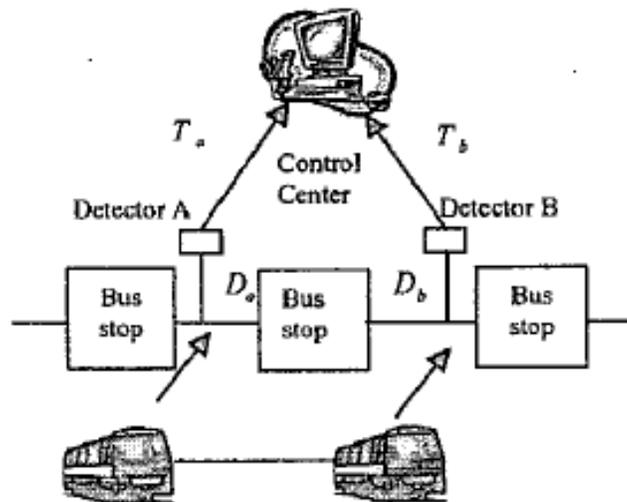


Figura 3.38. Dispositivos RSU para localización de vehículos
Fuente: (Wang et al., 2002)

Además, también se cuenta con sistemas de comunicación móvil y de telefonía, que hacen referencia a “cualquier enlace de radiocomunicación entre dos terminales, de los cuales al menos uno está en movimiento, o parado, pero en localizaciones indeterminadas, pudiendo el otro ser un terminal fijo” (Huidobro, 2011).

Dentro de las estaciones fijas, se pueden encontrar estaciones base, estaciones de control y estaciones repetidoras (Moreira,2014).

Las estaciones de control se encargan de gestionar tanto a las estaciones base como a las repetidoras, estas últimas retransmiten las señales recibidas, obteniendo así una mayor cobertura (Moreira,2014).

Por su parte, una estación móvil es una “estación radioeléctrica prevista para su utilización en un vehículo en marcha o que efectúa parada en puntos indeterminados. El término incluye equipos móviles y equipos transportables” (Moreira,2014).

Además, “la telefonía es el servicio más utilizado de los que ofrecen los sistemas de comunicaciones móviles, [...] la telefonía móvil empezó siendo analógica, en la actualidad todo el servicio es digital” (Moreira,2014).

Los sistemas de comunicación móviles suelen dividirse como sigue (Moreira,2014):

- Primera generación 1G
- Segunda generación 2G (GSM)
- Segunda generación avanzada 2.5G (GPRS) y 2.75G (EGPRS)
- Tercera generación 3G (UTMS)
- Tercera generación avanzada 3.5G (HSDPA), 3.75G (HSUPA) y 3.8G-3.85G (HSPA+)
- Cuarta generación 4G (LTE) y 4G+ (LTE Advanced)
- Quinta generación 5G

La primera generación de redes móviles está basada en sistemas de transmisión análogos, en este caso, las áreas geográficas eran subdivididas en pequeños sectores a los cuales se les llamaba células, es por eso que también se les conoce como redes celulares (Mishra, 2007).

En esta generación surgieron algunos estándares como el Sistema telefónico móvil avanzado (AMPS), Sistema de comunicación de acceso total (TACS) y Telefonía Móvil Nórdica (NMT) (Valverde, 2011).

La segunda generación se caracteriza por la implantación de las transmisiones digitales y el uso la tecnología móvil GSM (Global System for Mobile Communications) que “utiliza una variación de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), esto quiere decir que a cada usuario se le asigna un intervalo temporal denominado *slot*” (Albarracín, 2015).

En la Figura 3.39 se puede ver que se cuenta con cuatro usuarios, a los que se les va asignando un *slot* de manera ordenada para hacer la transmisión de sus datos.

Sin embargo, una de sus desventajas es el costo de transmisión, que es como “realizar una llamada por un teléfono móvil, pero tiene la gran ventaja de que en zonas urbanas no necesita mayor infraestructura que la dispuesta por el operador de telefonía” (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2003).

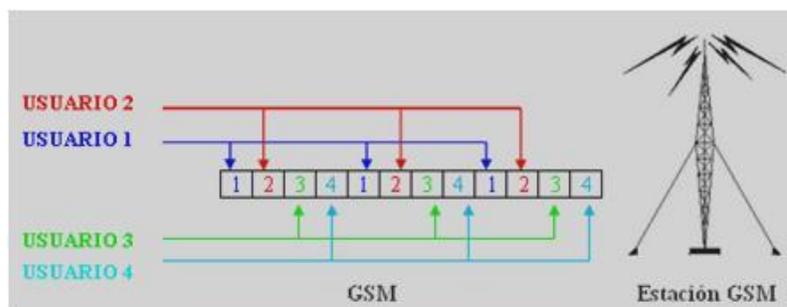


Figura 3.39. Tecnología GSM
Fuente: (Albarracín, 2015)

Por otra parte, también se creó el sistema GPRS (*General Packet Radio Services* o Servicio General de Paquetes por Radio), que dio lugar a la generación 2.5G, en donde “los datos se empaquetan digitalmente y se envían posteriormente sobre la misma red GSM de la telefonía móvil” (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2003).

El GPRS brinda mayor velocidad y ancho de banda que el GSM, además “no requiere un canal dedicado para cada usuario, sino que la conexión se realiza en el momento de utilización del canal. Por lo tanto, se pierde el concepto de facturación por tiempo, pasando a ser por utilización del canal” (Albarracín, 2015).

Por su parte, la tercera generación surgió con el principal objetivo de ofrecer mayores velocidades de transmisión de datos y permitir a los usuarios hacer uso de aplicaciones de audio, imágenes y video. “A través del 3G es posible ver video en *streaming* (en tiempo real sin que el video se detenga) y hacer uso de las videollamadas” (Valverde, 2011).

También se buscaba “estandarizar las redes en un único protocolo de red global, en vez de utilizar diferentes estándares” (Valverde, 2011).

Así surgió la tecnología UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) cuya principal ventaja es que permite velocidades muy elevadas en comparación con otros sistemas (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2003).

UMTS “tiene suficiente flexibilidad para poder adaptarse a transmisiones de datos de diferentes velocidades y requisitos distintos” (Albarracín, 2015).

También esta generación siguió evolucionando y sufrió algunas modificaciones, “una de las más importantes fue la actualización de la tecnología UMTS” (Valverde, 2011), lo que dio lugar a la generación 3.5G, 3.75G, 3.8G y 3.85G.

Enseguida llega la 4G, que debe cubrir una velocidad en movimiento para la transmisión de datos de 100 Mbit/s y la velocidad en un punto fijo será de 1Gbit/s (Moreira, 2014).

Es decir, la 4G lo que busca es seguir permitiendo a los usuarios realizar las mismas actividades que la 3G, pero con una mayor velocidad.

La tecnología LTE (Long Term Evolution o evolución a largo plazo) se encuentra dentro de esta generación y, de hecho, “se convirtió en la modalidad 4G más consistente y más rápida” (Núñez, 2016).

Cabe señalar que LTE es la “evolución de los estándares GSM/UMTS, [...], su finalidad es aumentar la capacidad y velocidad de las redes de datos inalámbricas haciendo uso de un nuevo procesado de señal digital” (Xataka México, 2014).

Finalmente, la generación 5G se está aún desarrollando, lo que busca es permitir a los usuarios velocidades de transferencia mucho más altas. Sin embargo, por ahora se encuentra en periodo de pruebas y algunos expertos aseguran que no estará disponible hasta el año 2020 (Núñez, 2016).

Como se puede apreciar, existen diferentes opciones en cuanto a sistemas de comunicación que pueden utilizarse para implantar un SATP, sin embargo, se deben tomar en cuenta diferentes factores para determinar cuál es la mejor alternativa, pero depende principalmente de las características de la zona en donde se vaya a desarrollar el proyecto, la elección de uno u otro.

3.7. FLUJOS DE INFORMACIÓN

Como se ha mencionado a lo largo de este capítulo, un Sistema Avanzado para el Transporte Público está compuesto por un conjunto de elementos que interactúan entre sí, esta interacción implica que se generen ciertos flujos de información.

En la Figura 3.40 se presenta un esquema que ejemplifica la manera en la que se lleva a cabo la obtención de la ubicación de las diferentes unidades del transporte público. Aquí se muestra el caso con la utilización de GPS, uno de los métodos más usados actualmente, en donde gracias a los satélites y los dispositivos a bordo del vehículo se obtienen datos que son enviados mediante el sistema de comunicación que se haya implantado.

Como se explicó en el Apartado 3.6, existen diferentes tecnologías que permiten esta transferencia de datos, en la Figura 3.40 se hace uso de las radiocomunicaciones, para hacer llegar todo este flujo hasta un centro de control, en donde se hace el procesamiento de los datos para los diferentes fines que se le vaya a dar.

Por ejemplo, en un centro de control además de hacer la predicción de los tiempos de llegada de las unidades a las diferentes paradas, se puede elaborar un análisis de la operación del servicio de transporte público y verificar la programación de las unidades, etc.

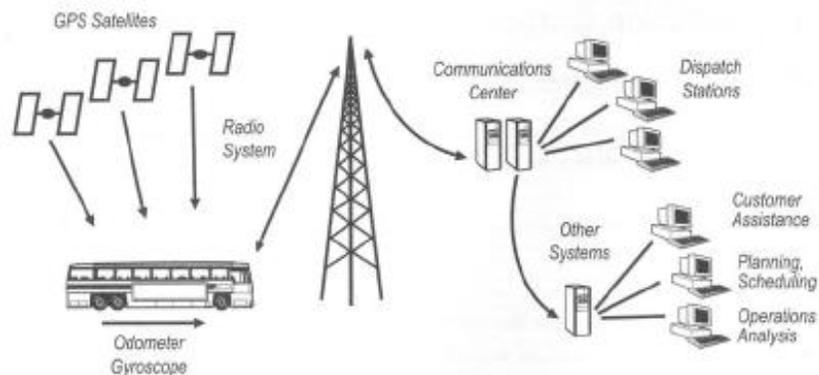


Figura 3.40. Localización automática de vehículos utilizando GPS

Fuente: (Casey et al., 2000)

En la Figura 3.41 se presenta otro esquema en el que también se explica todo este flujo de información, sin embargo, muestra una imagen mucho más amplia, ya que un SATP, además de la localización de vehículos también incluye sistemas de información al viajero y en ocasiones, sistemas de prioridad semafórica. En dicha figura las flechas indican la dirección en la que se mueve la información, puede ser en un solo sentido o en ambos.

También se hace uso de un sistema de radiocomunicaciones, gracias al cual, este flujo se recibe en una estación de radiocomunicación para después enviar todo al centro de control. Desde ahí, la información de la ubicación de los autobuses del transporte público es analizada para hacer las estimaciones del tiempo de llegada de las unidades a las diferentes paradas que se tienen a lo largo de la ruta, para presentarlas a los usuarios mediante pantallas o algunos otros dispositivos destinados para ello.

Además, en la misma Figura 3.41 se aprecia que para que se brinde prioridad semafórica a los vehículos es necesario que se establezca cierta comunicación con los controladores de tránsito y que éstos puedan hacer los cambios necesarios para permitirle al autobús seguir su recorrido sin necesidad de detenerse en las intersecciones, esto gracias a que pueden otórgales mayor tiempo de luz verde o pasar de fase roja a verde cuando reciben el aviso de la unidad acercándose.

Por último, en la Figura 3.42, se muestra un esquema con mayor detalle sobre lo que sucede con los flujos de información en un centro de control, ya que en las figuras anteriores no se alcanza a apreciar todo el procesamiento que se da para que los datos lleguen en la forma que se requiere a los usuarios.

Es necesario que se utilice algún *software* para hacer los cálculos correspondientes que permitan obtener los mensajes que serán transmitidos a los usuarios.

Además, con esta información también las empresas operadoras pueden tener un mejor panorama del lugar en donde se encuentra cada una de sus unidades o accidentes y contratiempos que se presentan, con la finalidad de hacer una mejor operación de su sistema y adaptarse en tiempo real a la situación del tránsito en las vialidades.

Cabe señalar que, en estos centros de control se va guardando una base de datos con información histórica, es decir, el flujo de información que se recibe día a día se almacena y posteriormente puede ser utilizada para hacer análisis de patrones de comportamiento.

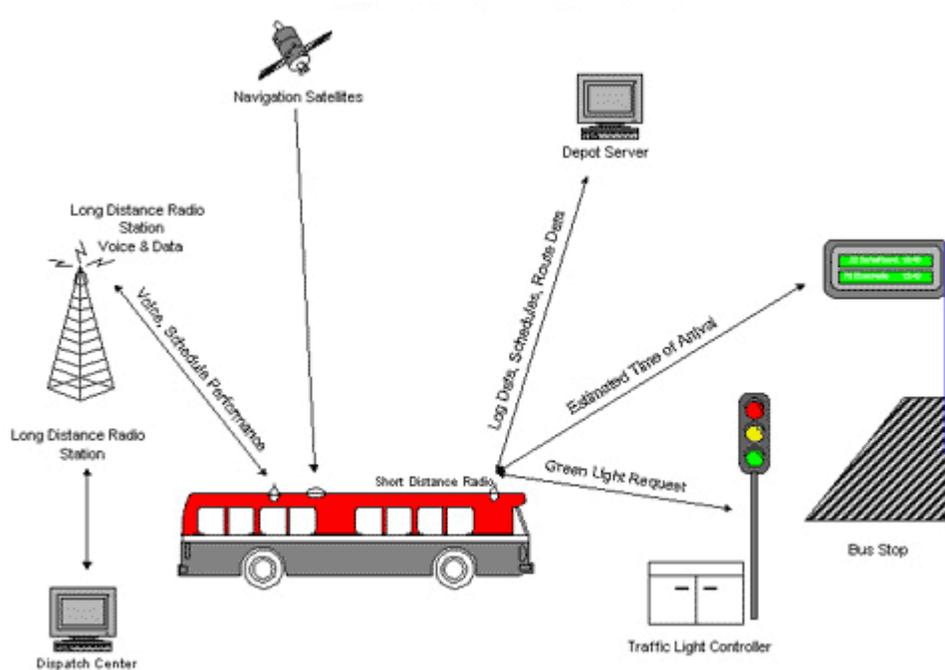


Figura 3.41. Sistema de prioridad semafórica y localización de vehículos
Fuente: (ADLink, 2015)

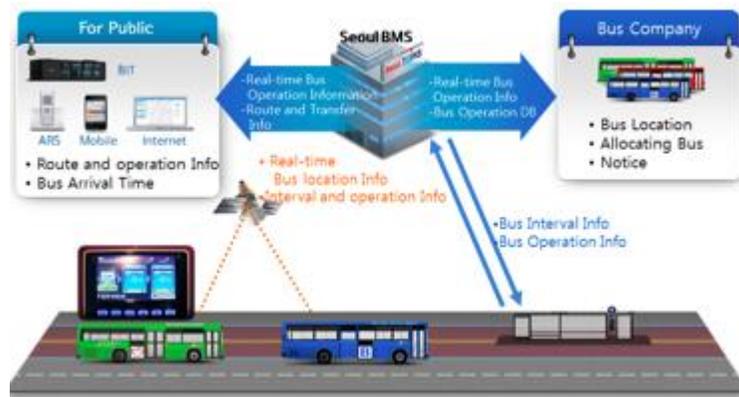


Figura 3.42. Flujos de información en un sistema avanzado para el transporte público
Fuente: (Seoul Solution, 2016)

3.8. FACTOR HUMANO

El factor humano juega un papel sumamente importante en la implantación exitosa de un Sistema Avanzado para el Transporte Público, sin embargo, en muchas ocasiones es el aspecto que menos se toma en cuenta.

Para comenzar, una pieza clave en cualquier Sistema Inteligente de Transporte, es la aceptación por parte de los usuarios.

Cuando los SIT comenzaron a utilizarse, muchas personas no tenían acceso a tantos dispositivos electrónicos como hoy en día, por ejemplo, los Sistemas Avanzados de Información al Viajero no podían llevar la información sobre los sistemas de transporte público a tal cantidad de población como lo hacen actualmente.

Es así que, en este momento, gracias a los avances tecnológicos y al hecho de que gran parte de la población mundial cuenta con al menos un dispositivo electrónico, los SIT tienen mayor aceptación y alcance.

En la actualidad, de acuerdo con Ericsson (2015), los teléfonos móviles cuya línea está suscrita a un operador alcanzaron los 7 300 millones en 2015, cifra que casi iguala al conteo de población mundial de ese mismo año, que de acuerdo con el Banco Mundial (2015), fue de 7 347 millones de personas. Además, según el Banco Mundial (2016), a nivel mundial de cada 100 personas, aproximadamente 44 usan internet.

Todos estos datos indican que buena parte de la población, sobre todo en grandes ciudades, cuenta con la oportunidad de acceder a información sobre los sistemas de transporte público en tiempo real para hacer una planeación de sus viajes.

Además, se puede afirmar que, mediante el uso de sistemas de información al viajero, es posible atraer a mayor cantidad de usuarios a los sistemas de transporte público (Kenyon y Lyons, 2003). Esto debido a que la percepción del servicio mejora, alentando a la población a utilizarlos, quitándole algunos usuarios al transporte privado.

En un estudio llevado a cabo por Kenyon y Lyons (2003), se encontró que la comunidad está dispuesta a hacer uso y consultar de manera regular la información sobre el transporte que se le pueda ofrecer, pero resulta importante para ellos que dicha información sea en tiempo real y confiable para ayudarles a tomar una adecuada alternativa para moverse por la ciudad.

Pero además de lo anteriormente mencionado, para la implantación como tal de los Sistemas Avanzados para el Transporte Público, es necesario contar con líderes de proyecto capacitados que puedan ayudar a que se le dé un correcto uso, además de brindar el mantenimiento requerido.

Primero, es indispensable contar con profesionales del transporte capaces de trabajar con equipos multidisciplinarios; hoy en día los problemas requieren de la participación de especialistas de diversas áreas que aporten su conocimiento para el desarrollo de soluciones.

Es necesario que entiendan las implicaciones que tiene el uso de la tecnología en el diseño y operación de los sistemas de transporte, comprender que actualmente es un aspecto fundamental y que deben estar preparados para utilizar estas nuevas herramientas a su favor (Sussman, 2002).

En general, existen algunos aspectos que el profesionalista que pretenda adentrarse en el aspecto de la planeación de proyectos SATP debe dominar, para ser capaz de llevar a cabo una implantación exitosa.

Es conveniente que cuente con conocimientos sobre ingeniería del transporte, en especial de la ingeniería de tránsito, la ingeniería del transporte es la:

“aplicación de los principios tecnológicos y científicos a la planeación, al proyecto funcional, a la operación y a la administración de las diversas partes de cualquier modo de transporte, con el fin de proveer la movilización de personas y mercancías de una manera segura, rápida, comfortable, conveniente, económica y compatible con el medio ambiente” [Institute of Transportation Engineers (ITE) citado por Cal y Mayor, 2007].

Por su parte, la ingeniería de tránsito puede considerarse una de las etapas que incluye la ingeniería de transporte y se relaciona con “la planeación, el proyecto geométrico y la operación del tránsito por calles y carreteras, sus redes, terminales, tierras adyacentes y su relación con otros modos de transporte” (ITE citado por Cal y Mayor, 2007).

Esto es primordial debido a que deben tener conocimientos sobre el funcionamiento en general del sistema de transporte del lugar en donde se llevará a cabo el proyecto del SATP, es necesario el manejo de conceptos técnicos y que entienda el papel que desempeñan los diferentes componentes de un modo de transporte, tales como los usuarios, vehículos, vías y la relación entre ellos.

Obviamente, resulta lógico que la persona encargada de estos proyectos cuente con amplios conocimientos sobre los Sistemas Inteligentes de Transporte en general, actualmente si bien existen varios países en los que este tipo de soluciones tecnológicas han sido ampliamente estudiadas, también se pueden encontrar ejemplos de ciudades en las que no existen profesionistas expertos en estos temas.

Ciudades europeas, asiáticas y estadounidenses cuentan con una apreciable cantidad de experimentados profesionales y estudiantes que se encargan de la investigación de SIT, sin embargo, esta situación no es la misma en países latinoamericanos, en los que los problemas de transporte cada vez se vuelven más difíciles de solucionar.

Para el aspecto de la operación y mantenimiento, otra área sobre la que se debe tener dominio y que va muy relacionada con los SIT, son las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), que “son el conjunto de tecnologías desarrolladas para gestionar información y enviarla de un lugar a otro” (Servicios TIC, 2004).

Y es que hoy en día las TIC, son ampliamente utilizadas no solo en los aspectos de transporte, sino en diferentes ámbitos, de hecho “el medio tecnológico y particularmente en su interior las tecnologías de la información pueden considerarse actualmente el sustento de las actividades humanas” (Buzai, 2001).

Como puede apreciarse, cada vez son más grandes los retos que deben afrontar los profesionistas y más amplios los problemas a los que se enfrentan, por lo que deben estar actualizados en lo referente a los avances tecnológicos, ya que hoy por hoy no basta con los conocimientos básicos que se adquieren en una carrera profesional.

3.9. TECNOLOGÍAS EN EL MERCADO PARA CONFORMAR SISTEMAS AVANZADOS PARA EL TRANSPORTE PÚBLICO

Existen dispositivos con diferentes características distribuidos por varias compañías tanto para la parte de *hardware* como de *software*, requerido para implantar Sistemas Avanzados para el Transporte Público; en los siguientes apartados se presentarán algunas de las opciones que se tienen disponibles actualmente.

3.9.1. Pago electrónico

Como se mencionó anteriormente, para llevar a cabo el pago electrónico, es indispensable contar con tarjetas inteligentes; existen diferentes tipos, las principales son las tarjetas magnéticas, las de lectura con contacto y sin contacto.

Enseguida se presentan las características básicas de cada una y en la Tabla 3.2 se muestra una comparación entre estos tres tipos, analizando algunos de los criterios más importantes que las diferencian, como su funcionamiento, el nivel de seguridad que ofrecen, los costos de implantación y mantenimiento, además de la capacidad de almacenamiento.

Como se mencionó en el Apartado 3.3.1, las tarjetas magnéticas presentan varias desventajas en muchos de los criterios en comparación con los otros tipos de tarjetas, por lo que actualmente, la tendencia se orienta más al uso de tarjetas sin contacto.

Existen diferentes tipos de tarjetas inteligentes sin contacto, enseguida se presentan las principales características de éstas.

“La tecnología para desarrollar las tarjetas inteligentes ha estado en manos de cierta cantidad de compañías, cada una cumpliendo con sus propias necesidades y estándares que cree son los que busca el mercado” (*Smart Card Alliance*, 2015), entre las compañías líderes en este aspecto se encuentran: Mifare, Calypso, FeliCa y CIPURSE.

Mifare entró en funcionamiento en 1994; sus tarjetas utilizan el estándar ISO/IEC 14443, usan una frecuencia de 13.56 MHz y funcionan a una distancia de hasta 10 centímetros del lector sin contacto (FIMPE, 2013).

ISO/IEC 14443 es un estándar internacional que está “relacionado con las tarjetas de identificación electrónicas, en especial las tarjetas inteligentes, gestionado conjuntamente por la Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)” (LARCON-SIA S.R.L., s.f.).

En América Latina se han utilizado ampliamente las tarjetas Mifare; existen diferentes tipos de tarjetas con tecnología Mifare: Clásica, Plus, DESFire y Ultralight, entre otras (Ingeniería Electrónica, 2015). En la Tabla 3.3 se muestra un resumen de sus características principales, como la cantidad de ciclos de escritura que soportan, el tiempo de procesamiento requerido por transacción y algunas particularidades de cada una de ellas.

Tabla 3.2. Comparación entre los tipos de tarjetas para el pago en el transporte público

Criterio	Tarjetas magnéticas	Tarjetas con contacto	Tarjetas sin contacto
Funcionamiento	Pueden ser deslizadas o insertadas en los lectores	Deben ser insertadas en los lectores	Permiten comunicación desde distancias de 8-10 cm del lector
Seguridad	Moderada	Alta	Alta
Tiempo de abordaje	Depende del formato, pero es menos eficiente que las tarjetas sin contacto	Rápido, pero en menor medida que las tarjetas sin contacto	Rápido
Principales estándares	Aplican todos aquellos referentes a tarjetas magnéticas utilizadas en diferentes ámbitos	ISO 7816	ISO 14443
Costos de implantación	Bajo	Alto	Alto
Costo de operación y mantenimiento	Altos costos de mantenimiento de los equipos lectores y menor vida útil de las tarjetas	Mayor vida útil que las tarjetas magnéticas ya que se pueden reutilizar (recargar)	Menores costos de mantenimiento del sistema, larga vida útil de las tarjetas y capacidad de recarga
Capacidad de almacenamiento	Más de 0.2 KB	Más de 8 KB	Más de 64 KB

Fuente: (Hao, 2007)

Tabla 3.3. Comparación entre los diferentes tipos de tarjetas Mifare

Tipo de tarjeta	Ciclos de escritura	Tiempo de procesamiento	Otro
Clásica	100 000	300 milisegundos por transacción	-----
Plus	200 000	100 milisegundos por transacción	Creada para eliminar los fallos de seguridad que presentaba la tarjeta Clásica
DESFire	100 000	100 milisegundos por transacción	Se utiliza para realizar otros tipos de transacciones, además de pagos en los sistemas de transporte. Tiene una memoria de 8 Kbyte.
Ultralight	100 000	100 milisegundos por transacción	Ideal para sistemas sencillos, memoria de 512 bits (64 bytes).

Fuente: (Mifare, 2016)

Otra de las opciones es la tecnología Calypso, creada por Calypso Network Association (CNA) que comenzó a elaborar estudios para el desarrollo de tarjetas inteligentes en 1990, con un grupo de expertos de transporte de diferentes países como: Bélgica, Francia, Alemania, Italia y Portugal, después de años de estudio, “lograron la creación de la tecnología inteligente de tarjetas sin contacto adaptada a muchos mercados” (AECOM, 2011), en 2013 finalmente comenzaron a comercializar sus productos.

Calypso también utiliza “el estándar ISO/IEC 14443, que define la señal de radio y protocolo para una transmisión de inducción a 13.56 MHz” (*Smart Card Alliance*, 2015). Brinda un tiempo de procesamiento de alrededor de 200 milisegundos, para proporcionar altos niveles de seguridad utilizan algunos algoritmos de encriptación como DES y AES (Calypso, 2014).

Esta tecnología, es capaz de adaptarse a los diferentes requerimientos de los clientes, puede integrar diferentes servicios electrónicos y cumple con varios de los estándares internacionales (Giesecke & Devrient, 2016). En cuanto a tamaño de las memorias, éstas generalmente van desde los 2 hasta 16 Kbyte (Calypso, 2014).

Por otro lado, FeliCa, es propiedad de Sony, este tipo de tecnología se ha implantado principalmente en países asiáticos desde 1994 y es reconocida por su alto nivel de seguridad (Sony, 2016).

Las tarjetas con tecnología FeliCa se utilizan ampliamente en Japón, pero no solamente para el pago de servicios de transporte público, también sirven para realizar compras en varias tiendas, es decir, se utiliza como dinero electrónico (*Smart Card Alliance*, 2015).

Finalmente, CIPURSE, “proporciona una base avanzada para soluciones de recaudación de transporte flexibles, de alta seguridad e interoperables. Está construido según estándares probados, incluyendo ISO 7816, AES-128, ISO/IEC 14443-4 para asegurar múltiples tipos de pagos” (OSPT, 2016).

3.9.2. Contadores de pasajeros

Para poder llevar a cabo un adecuado control de las personas que entran y salen de las diferentes unidades de los sistemas de transporte público, se instalan los contadores de pasajeros, como se mencionó en la Sección 3.3.2 existen diferentes tecnologías que permiten a los dispositivos cumplir esta función y cada una de ellas cuenta con ventajas y desventajas.

Independientemente de la tecnología elegida, los contadores de pasajeros deben tener (Sisconper, 2015a):

- Capacidad para contabilizar personas en ambos sentidos y al mismo tiempo.
- Excluir personas que se detengan durante periodos prolongados en las puertas, pero no ingresen al vehículo.
- Excluir la carga que llevan las personas (cajas, mochilas, etc.). También excluir el conteo de niños, si así se requiere.
- Contar usuarios entrando y/o saliendo a cualquier velocidad.
- Entregar registros por cada punto de control de la ruta con fecha, hora y coordenadas de ubicación.
- Detectar bloqueos o desconexión de los sensores, registrando fecha, hora y duración del problema.

En la red de Metrobús de la Ciudad de México, como se puede apreciar en la Figura 3.43, se cuenta con contadores de pasajeros, en este caso, los equipos están instalados en la parte superior de los autobuses y cabe señalar que también podrían funcionar en otros sistemas como metros y trenes.

Este tipo de contadores son del tipo CCTV, mediante cámaras se hace la recolección de la información, sin embargo, existen diferentes tipos de ellas como la analógica y digital.

En las últimas décadas con el avance de la tecnología, las cámaras digitales son las más utilizadas (Figura 3.44), entre sus principales ventajas se encuentran (Seguridad Electrónica, 2008):

- Permite una mayor resolución.
- El zoom digital es posible.
- La expansión posterior del sistema de cámaras puede realizarse utilizando soluciones completamente digitales.
- Se presenta menos ruido en la transmisión digital.
- Las imágenes en vivo y los archivos pueden estar disponibles para todos los usuarios con derechos de acceso dentro de la red.

Existe también otro tipo de contadores, como los que se muestran en la Figura 3.45, más enfocados para su uso en los autobuses, funcionan mediante haces infrarrojos, pero al ser de los métodos más sencillos, presentaban algunas desventajas en cuanto a la exactitud en sus conteos; sin embargo, actualmente algunos fabricantes aseguran a sus clientes hasta el 97% de precisión en sus contadores, por lo que esto dejó de ser un inconveniente (Sistema Bea, 2017). En la Figura 3.46 se muestran ciudades donde los servicios de transporte público tienen en funcionamiento contadores de pasajeros de haces infrarrojos.



Figura 3.43. Contadores de pasajeros, Metrobús
Fuente: (Sisconper, 2015b)



Figura 3.44. Cámaras digitales para sistemas CCTV
Fuente: (Skynet Security Systems, 2009)

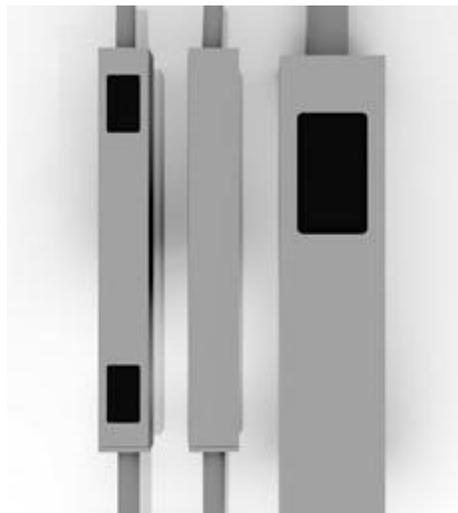


Figura 3.45. Contadores de pasajeros NC
Fuente: (NR Tec Desarrollos Tecnológicos, 2016)

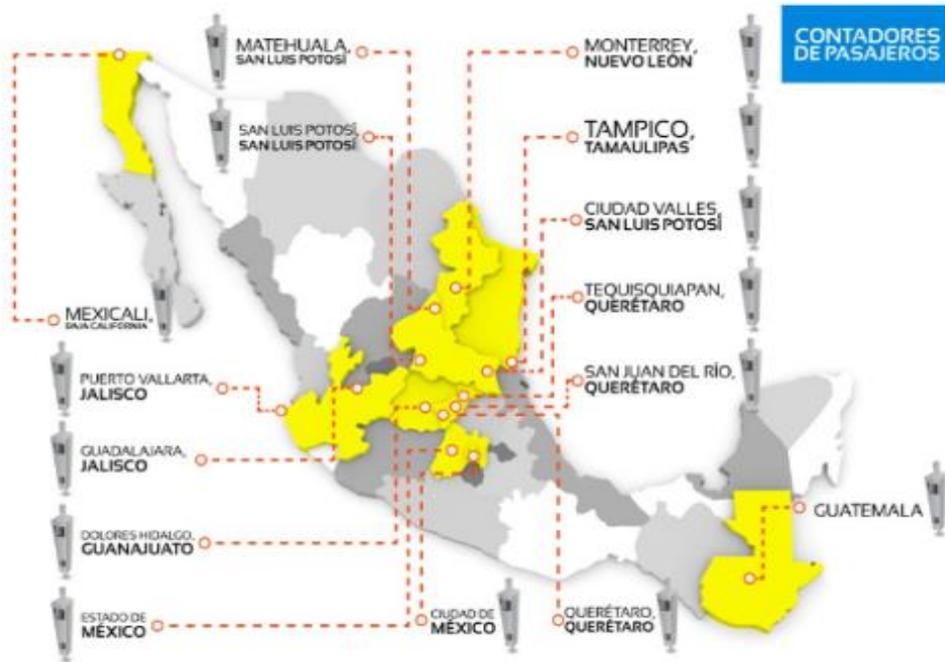


Figura 3.46. Contadores de pasajeros en México
Fuente: (NR Tec Desarrollos Tecnológicos, 2016)

También se tienen contadores térmicos como los que se muestran en la Figura 3.47, generalmente instalados en el techo de las unidades, permiten hacer conteos mucho más precisos que otros tipos de tecnologías implantadas.



Figura 3.47. Sensores térmicos para conteo de personas
Fuente: (Next Points, 2016 y Sigma, 2016)

Finalmente, dependerá de varios aspectos la elección de un tipo u otro de contador de pasajeros, por ejemplo, la exactitud requerida, las características propias del sistema de transporte donde se vaya a realizar la implantación, así como el aspecto económico, ya que algunos dispositivos cuentan con un precio más elevado que otros.

3.9.3. Localización de vehículos

Para llevar a cabo la localización de las unidades del transporte público, el GPS se ha posicionado como la tecnología de mayor uso, enseguida se presentan las principales propiedades de los dispositivos en el mercado.

En 1980 solamente existía un tipo de GPS a la venta y su precio era bastante elevado, sin embargo, la situación ha cambiado drásticamente, hoy en día se tiene una gran variedad de modelos de diferentes marcas y a precios accesibles (Olmedillas, 2012).

Los fabricantes suelen equipar cada uno de sus modelos con variadas partes y funciones, pero existen algunos componentes que deben estar presentes para su adecuado funcionamiento (Rada, 2001).

Por ejemplo, un receptor GPS siempre deberá de contar con una antena, que puede ser interna o externa, ella se encarga de detectar o recibir la señal de los satélites (El-Rabbany, 2002).

Una manera de categorizar a los receptores GPS es con base en el número de canales de rastreo, que puede ir desde uno solo (monocanal) hasta varios (multicanal), la tendencia actualmente está más orientada a los dispositivos multicanal, ya que ofrecen mayores ventajas (Franco, 2004).

Los receptores monocanal, son mucho más lentos para determinar la posición, ya que tiene que terminar de recabar la información de un satélite para poder pasar al siguiente, además son más susceptible a la presencia de obstáculos en la recepción de señales (Franco, 2004).

Por su parte, los dispositivos multicanal, como el que se muestra en la Figura 3.48, al ser encendidos reciben “al mismo tiempo las señales de todos los satélites que están en el hemisferio celeste en ese momento” (Franco, 2004), es por esta razón que establecen la posición con mayor rapidez que los monocanal y con mayor exactitud.

Además, si se encuentra en sitios con presencia de obstáculos (árboles o edificios), aunque puede deteriorarse la señal de uno o más satélites, siempre tendrá disponibles otros para no perder su posicionamiento.

Para llevar a cabo el rastreo de las unidades de transporte público, en el mercado existen diferentes marcas, entre las más importantes están: Garmin, Leica y Topcon.

Existen algunos receptores GPS que van directamente conectados al sistema eléctrico del vehículo como el que se presenta en la Figura 3.49, que también cuenta con un compartimento para conectar una tarjeta SIM y así, cuando se desea conocer la ubicación de una unidad, se envía la información mediante mensajes de texto, “entonces se mandarían unas coordenadas con las que se podrá rastrear el vehículo por internet en un mapa” (Localizadores GPS México, 2016).

Es importante señalar que los receptores GPS de este tipo, no afectan el funcionamiento del vehículo a pesar de estar conectados directamente al sistema eléctrico, ya que la energía que requieren para funcionar es baja.

Además, también permiten monitorear y controlar la velocidad de las unidades, los dispositivos se pueden instalar de manera oculta, basta con que se haga una adecuada conexión entre “la antena y los cables a la corriente de la unidad” (Xexun, 2016).



Figura 3.48. Receptor GPS Multicanal
Fuente: (Shenzhen Coban Electronics, 2017)

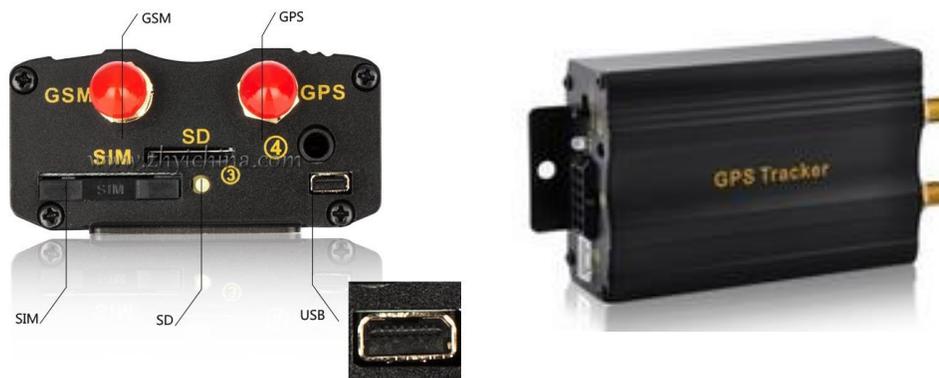


Figura 3.49. Dispositivo GPS conectado al sistema eléctrico del vehículo
Fuente: (PosiTrace, 2016)

En la Figura 3.50 se presenta un dispositivo GPS de pequeñas dimensiones (6.3x5x2.8 cm) y un peso de 44 gramos, cuenta con una antena interna y una batería de litio como respaldo, este tipo de dispositivos cuentan con su propia batería por lo cual no es necesario que estén conectados con el vehículo. La desventaja es que puede quedarse sin batería en un momento inoportuno, por lo que se debe cuidar ese aspecto y evitar que el dispositivo se descargue.



Figura 3.50. Dispositivos GPS con batería propia
Fuente: (PosiTracker, 2016)

Otra de las diferencias entre los dispositivos GPS es la capacidad de la memoria, esto es importante debido a que determina la cantidad de datos que son capaces de guardar para su posterior postprocesamiento o simplemente para formar una base de datos históricos, por ejemplo, el dispositivo de la Figura 3.51 puede almacenar hasta 275 millones de registros en caso de pérdida de cobertura (Teltonika, 2017).

Finalmente, en la Figura 3.52 se muestran algunos otros tipos de receptores GPS, que de manera general comparten varias de sus características con los equipos anteriormente mencionados. Por ejemplo, cuentan con baterías internas, pero también pueden conectarse a la batería del vehículo como fuente de energía, cuentan con antenas internas o externas, su peso no supera los 120 gramos y sus dimensiones no son mayores de 5.5 cm de largo, 8.8 cm de ancho y 2.2 cm de alto (Globalstar, 2016).

Existen más funciones que estos dispositivos pueden cumplir, por ejemplo, se les puede programar para enviar alertas de movimiento, de excesos de límites de velocidad y/o de batería baja.

También se puede establecer la función de autorastreo, mediante ella es posible indicar al dispositivo que envíe información de su posición cada cierta cantidad de segundos, minutos y horas, un número determinado de veces, este aspecto es muy importante debido a que es básicamente con esta información que se pueden hacer las predicciones de los tiempos de llegada de las unidades a las diferentes paradas de las rutas programadas.

Por otra parte, algunas empresas ofrecen plataformas de *software* desde donde es posible hacer un seguimiento de las unidades en un mapa, para llevar un control del recorrido en tiempo real, esta opción también ha sido más utilizada en el caso de vehículos comerciales (Figura 3.53). Además de esta alternativa, el cliente también puede solicitar la recepción de correos electrónicos o algún otro tipo de notificaciones dependiendo de sus objetivos.

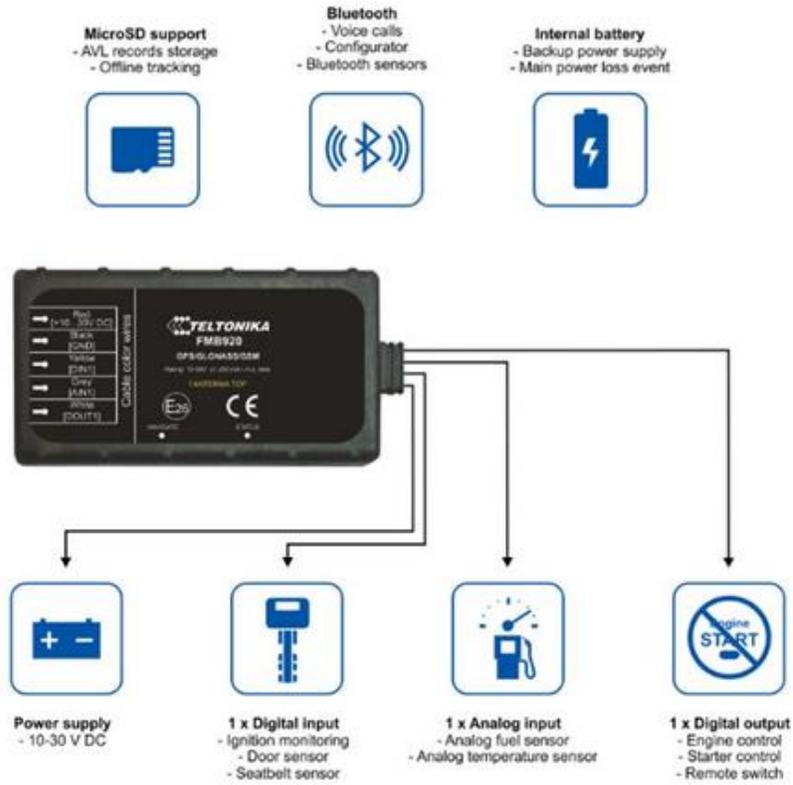


Figura 3.51. Dispositivos GPS con antena interna
Fuente: (Teltonika, 2017)



Figura 3.52. Diferentes tipos de dispositivos GPS
Fuente: (Globalstar, 2016)

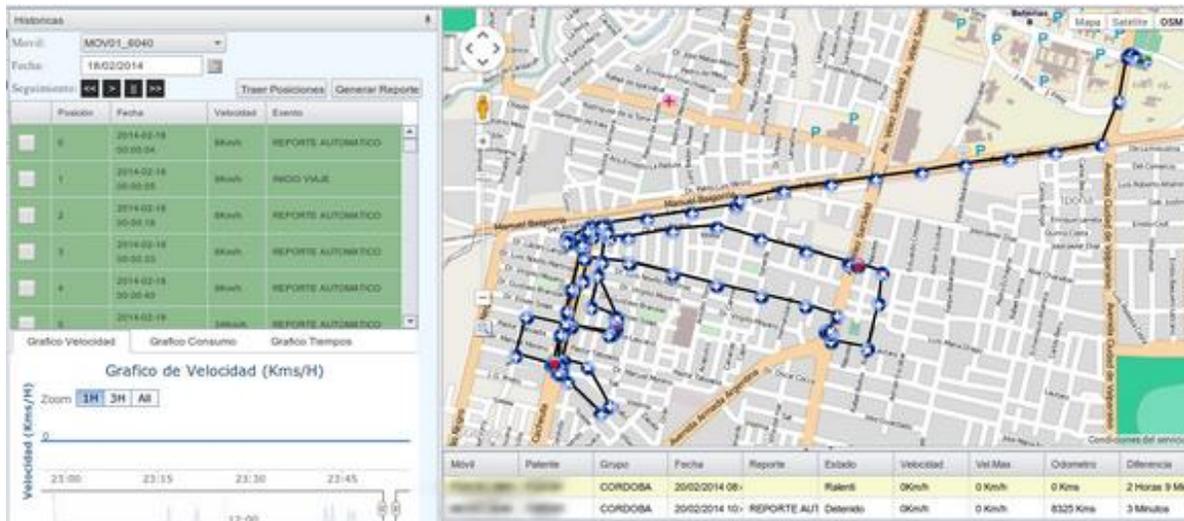


Figura 3.53. Software para el seguimiento de los vehículos
Fuente: (GPSTEC México, 2016)

3.9.4. Distribución de información en tiempo real

Como se mencionó en el Apartado 3.3.4, para brindar información a los usuarios de los sistemas de transporte público, se puede hacer uso de pantallas, quioscos o dispositivos móviles.

Las pantallas son una de las opciones más utilizadas para proporcionar información sobre transporte a los usuarios, de hecho, ya se aplican en diferentes áreas, lo que ha permitido que se cuenten con diferentes opciones en el mercado.

Dichas pantallas pueden estar instaladas a bordo de las unidades y/o en las estaciones, y deben ser capaces de presentar una amplia variedad de mensajes y gráficos que incluyen tanto anuncios de voz como información en texto o video (Swarco, 2016).

Existen varios aspectos que deben considerar para la elección del tipo de pantalla a utilizar, uno de ellos es la resolución, que indica el número de píxeles que puede ser mostrado, en términos generales, un pixel es:

“la parte más pequeña de la pantalla [...] es un punto cuadrado o rectangular, el color de cada pixel es una combinación de tres componentes del espectro de colores: rojo, verde y azul. Se asignan hasta tres bytes de datos para especificar el color de un píxel individual” (Microsoft, 2015).

Y existe otro concepto denominado *dot pitch* (Figura 3.54) que se refiere a la distancia que separa a dos puntos de un mismo color, también se le llama tamaño de punto, normalmente se recomienda que sea menor de 0.28 milímetros (mm) y “cuanto más pequeña sea esta cifra, más nítida y suave se verá la imagen” (Zahumenszky, 2010).

En general, cuanto mayor sea la resolución mejor se verán las imágenes que en ella se presentan, para asegurar una buena resolución es importante tomar en cuenta otros aspectos, como la distancia de visibilidad mínima y máxima que se requiere, la altura a la que se instalará la pantalla y el tipo de imágenes, videos o animaciones que se reproducirán (ExpoSign, 2016).

Existen dos tipos de pantallas que son comúnmente utilizadas con estos fines, las LCD y las LED. Las pantallas LCD o de cristal líquido, están compuestas básicamente por: un vidrio en la parte trasera, seguido de un vidrio polarizado con ranuras, un electrodo de iridio, capas de moléculas de cristal líquido, un vidrio con un electrodo y por último otro vidrio polarizado (OOcities, 2016). Entre sus principales ventajas se puede mencionar que son menos pesadas y ocupan menos espacio que algunas pantallas de otros materiales, la imagen no sufre distorsiones en las esquinas, claridad de los pixeles, entre otras (OOcities, 2016).

Por otro lado, las pantallas LED (diodo emisor de luz) tienen un funcionamiento muy parecido, en términos generales se puede decir que son “monitores LCD a los cuales se les ha mejorado uno de sus componentes” (Sánchez, 2016).

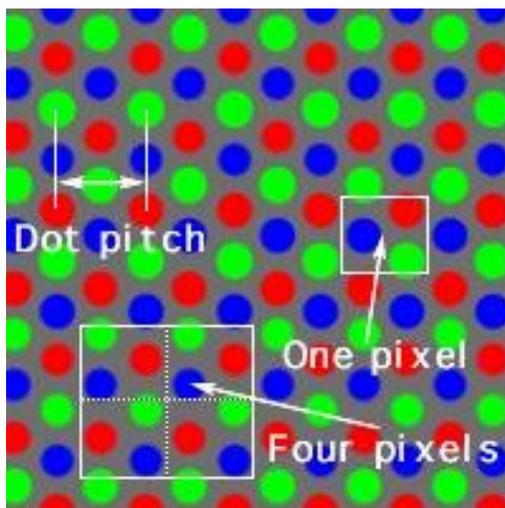


Figura 3.54. Píxel y dot pitch
Fuente: (Mahonkin.com, 2016)

La principal ventaja de los monitores LCD con respecto a los LED, es el precio, sin embargo, uno de sus problemas es que debido a la iluminación que utilizan no son capaces de mostrar con claridad algunos colores, en especial el negro, mientras las pantallas LED no presentan dicho inconveniente, ya que muestran colores más puros y generan un menor consumo energético (Sánchez, 2016).

Las pantallas LED pueden estar disponibles en dos tipos de LED: DIP Y SMD. El LED DIP (Dual In-line Package), brinda un mejor ángulo de visión, gran resistencia a la intemperie, buen índice de fatiga, alta luminosidad y es resistente a impactos (Visual LED, 2016).

Es el tipo de pantalla tradicional, cada píxel está compuesto por una agrupación de LED's con los tres colores básicos, es decir, rojo, verde y azul (RGB), y esta agrupación no se puede separar. En la Figura 3.55 se pueden ver un ejemplo de la configuración de una pantalla con LED tipo DIP (DreamLux, 2016).

Las características antes mencionadas, aunado a otros aspectos, hacen que este tipo de LED sea el más utilizado para las pantallas de localización exterior (Kineled, 2016).

Por otra parte, el LED SMD, está disponible en pitch reducidos, brinda un buen ángulo de visión, pero es generalmente utilizada en interiores ya que no es lo suficientemente brillante ni resistente a condiciones atmosféricas adversas, en la Figura 3.56 se puede apreciar su configuración (HTL Display, 2014).

Por otra parte, existen otras diferencias entre los tipos de pantallas que se pueden instalar, algunas versiones son pasivas, mientras otras son interactivas, unas pueden brindar contenido único, pero otras pueden estar cambiando en tiempo real la información que despliegan (Media Lab, 2016).

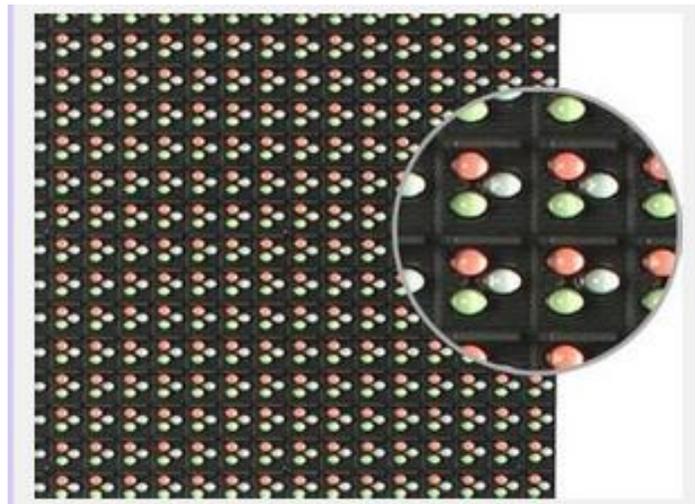


Figura 3.55. LED tipo DIP
Fuente: (HTL Display, 2014)

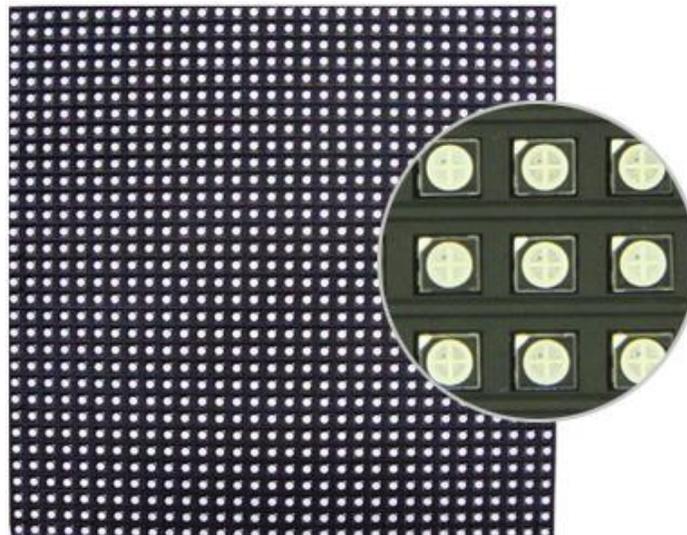


Figura 3.56. LED tipo SMD
Fuente: (HTL Display, 2014)

Y por supuesto, otra de las principales diferencias radica en el tamaño y peso de las pantallas, ya que actualmente en el mercado, se pueden encontrar modelos de calidad de diferentes dimensiones para cada una de las aplicaciones que se requieran.

Pero además de las pantallas, los pasajeros pueden obtener información a través de quioscos interactivos informativos, éstos generalmente tienen varias funciones y sirven como “canales de comunicación ágiles, modernos y de fácil uso” (Electrónicos.net, 2016).

Al igual que las pantallas, los quioscos pueden ayudar a los usuarios a identificar los recorridos de las diferentes rutas que pasan por una parada específica, así como a planear sus viajes con base en los tiempos de llegada de las unidades.

En la Figura 3.57 se aprecian algunos tipos de quioscos desde donde los usuarios pueden hacer las consultas que requieran, en la Sección 3.3.4 ya se explicaron algunas de sus características generales, sin embargo, existe una gran variedad de ellos, cuentan con dimensiones diferentes y los más sencillos solamente muestran datos en forma de texto, mientras algunos otros, son capaces de reproducir videos e imágenes con alta calidad.

También en estos casos, las pantallas con las que están equipados presentan diferentes dimensiones que dependen de las necesidades del proyecto, pueden ir desde las 19 hasta las 55 pulgadas, en la Figura 3.58 se presentan algunos ejemplos de quioscos a los que se les puede complementar con impresoras, teléfonos, bocinas, etc., si así se requiere (Captivanet, 2017).



Figura 3.57. Quioscos para brindar información
Fuente: (Electrónicos.net, 2016)



Figura 3.58. Quioscos con accesorios para la transmisión de información
Fuente: (Internet Kioskos, 2017)

En cuanto a la distribución de información mediante dispositivos móviles, lo único que se requiere es que el usuario tenga acceso a alguno de los siguientes elementos:

- Teléfonos móviles y *smartphones*: entre sus principales características se encuentran su portabilidad y comodidad, y con el paso de los años cada vez se les han agregado más aplicaciones y funcionalidades (Smash Media, 2017).
- Personal Digital Assistant (PDA) o Asistente Personal Digital: son pequeñas computadoras que cuentan con funciones similares a una computadora de escritorio, pero también con una agenda electrónica (Informática.com, 2017).
- Computadoras portátiles o laptops: de igual manera cumplen las mismas funciones que una computadora de escritorio, pero pueden ser llevadas a cualquier lugar “debido a su funcionamiento a través de una batería o de electricidad, pero no exclusivamente de esta última” (Definición ABC, 2017).

Con alguno de estos dispositivos y una buena conexión, las personas pueden hacer uso de diferentes aplicaciones que se desarrollan para ayudarlos a encontrar los caminos más cortos para llegar a su destino, los horarios de llegada de las unidades a las paradas o las posibles conexiones o transbordos que pueden llevar a cabo.

De manera general, los quioscos han sido utilizados en zonas donde se requiere brindar a los usuarios mayor cantidad de información, ya que incluso permiten adquirir boletos para utilizar los servicios de transporte. Mientras las pantallas informativas se instalan generalmente en las paradas del sistema de transporte público en cuestión y se enfocan principalmente en proporcionar los horarios y rutas de los autobuses, trenes, etc.

Por último, la distribución de información mediante dispositivos móviles se ha convertido en una manera muy práctica de llegar a los usuarios, ya que hoy en día se ha elevado el número de personas con acceso a este tipo de aparatos, pero lo más importante que se debe tener en cuenta si se utilizara esta opción es que la región donde se desarrolle el proyecto cuente con una buena conexión que permita a los usuarios obtener la información que requieren.

3.9.5. Prioridad semafórica

Para brindar la prioridad semafórica, los controladores de tránsito representan el *hardware* fundamental, son un “conjunto de mecanismos electromecánicos o electrónicos, alojados en una caja, que ordenan los cambios en las luces de los semáforos” (Alcaldía de Medellín, s.f.).

Es así que el controlador es el encargado de recibir las peticiones de prioridad semafórica, las evalúa y decide si dar la luz verde al autobús o mantener el ciclo preestablecido (Haridan, 2015).

Existen diferentes tipos de controladores, algunos pueden funcionar con tiempos fijos, semiactuados, actuado total, microrregulado, autoadaptativo, entre otros.

Algunos más funcionan por medio de la demanda peatonal (Figura 3.59), es decir, cuando una persona acciona el botón para solicitar el paso, el controlador se encarga de verificar si ha transcurrido un tiempo predeterminado y programado, que representa el tiempo mínimo que los automóviles necesitan para circular, y con base en eso determina los cambios en las luces (CSSR, 2017).

Además, existen controladores que no solamente están a cargo de una intersección, sino de varias, como el que se presenta en la Figura 3.60. Actualmente muchos de ellos permiten el manejo de planes dinámicos de forma actuada responsiva o adaptativa (Eyssa, 2013).



Figura 3.59. Controlador de semáforos con sincronía con detectores vehiculares y peatonales
Fuente: (Trafictec, 2016)



Figura 3.60. Controlador de semáforos para múltiples intersecciones
Fuente: (Eyssa, 2013)

Hoy en día, la tendencia es la utilización de sistemas de control adaptativo, éstos utilizan información referente a la presencia y conteo vehicular, así como su velocidad, para sincronizar las señales de control en tiempo real, para ello hacen uso de detectores instalados en las vialidades que les permiten “ajustar la oferta de los semáforos a las condiciones de la demanda del tráfico” (Jiménez y Sarmiento, 2011).

De acuerdo con Jiménez y Sarmiento (2011), cuando se va a implantar un sistema de control adaptativo se requiere:

- un controlador local, como el que se presenta en la Figura 3.61 que se encargue de procesar la información que es enviada por los detectores instalados en las vialidades y haga los cambios pertinentes en las fases semafóricas.
- varios controladores de zona que sirvan como sistemas intermediarios en el proceso de comunicaciones.
- un centro de control desde donde se supervise la correcta operación del sistema y se verifique que los planes generados por los controladores sean los adecuados para garantizar una buena movilidad.

Sin embargo, también existe otra alternativa, que consiste en que una vez que el controlador local recibe la información recabada por los detectores, la envía directamente al centro de control, donde después de ser procesada, se generan los ajustes necesarios, los controladores en este tipo de sistemas no necesitan grandes anchos de banda, lo importante en estos casos es que la información se envíe rápidamente, sin retrasos (Ramos, 2017).

Otro aspecto de gran relevancia para los sistemas de control adaptativos es el *software* de control en tiempo real que se utilice, ya que con la información que se está generando se encarga de hacer los ajustes requeridos, por ejemplo, puede cambiar el ciclo semafórico completo o la duración de las fases, además de garantizar la sincronía entre semáforos (Evans, 2016). Ejemplos de este tipo de *software* son SCATS y SCOOT, mismos que se mencionan en la Sección 2.4.3.

En cuanto a la prioridad semafórica, lo que se debe cuidar es que el controlador de tránsito que se utilice cuente con un módulo especial que le permita recibir las solicitudes de prioridad de los autobuses de transporte público o de cualquier vehículo al que se le desee brindar este tipo de servicio.

Y con ayuda del *software* se harán los cambios necesarios para evitar que el autobús tenga que detener su viaje por periodos de tiempo prolongados, también es posible hacer algunas configuraciones para determinar las situaciones en las que la prioridad se deba considerar alta, por ejemplo, valores máximos de retrasos, franjas horarios o tipo de día (Lertxundi, 2012).



Figura 3.61. Controlador de semáforos con sincronía GPS
Fuente: (Evans, 2016)

3.9.6. Centro de control

Existen diferentes elementos que deben trabajar en conjunto dentro de un centro de control para permitir que éste cumpla con todas las funciones que debe llevar a cabo.

Como se mencionó anteriormente, uno de los componentes básicos de los centros de control son las pantallas mural, las más comunes suelen ser: LCD (Figura 3.62), LED (Figura 3.63) o las más recientes lanzadas al mercado, conocidas como *Láser Video Wall*.

Las pantallas de LCD suelen tener una menor vida útil que las pantallas LED, es por eso que no se recomiendan para centros de control grandes, ya que estos generalmente funcionan las 24 horas del día y los 7 días de la semana (Gesab, 2017).

Tanto las pantallas LCD como las LED, están equipadas con ventiladores o sistemas de refrigeración líquida, con la finalidad de aumentar la duración de los equipos y evitar los sobrecalentamientos. Además de sistemas de calibración de color y brillo (BARCO, 2017).

Los *Láser Video Wall* surgen como respuesta a la necesidad de los centros de control de estar activos todo el año y todos los días, por lo que deben contar con equipos que sean capaces de trabajar de manera continua.

Es por eso que ahora se hace uso de la tecnología láser, conocida como láser RGB que “consigue colores 2 veces más brillantes que el LED, la calidad de la imagen aumenta, el deterioro de los consumibles es menor” (Gesab, 2017), entre otras características (Figura 3.64).



Figura 3.62. Pantallas murales LCD
Fuente: (Proyectos y Control SAC, 2014)



Figura 3.63. Pantallas murales LED
Fuente: (BARCO, 2017)



Figura 3.64. Pantallas murales de tecnología láser
Fuente: (BARCO, 2017)

Por otra parte, los puestos de control también son una parte esencial de cualquier centro de control, en la Figura 3.65 se presentan los elementos clave que deben tener a su disposición los trabajadores, en ese caso, se muestran tres monitores controlados por dos estaciones de trabajo, en una de ellas se ejecutan aplicaciones de gestión y control de datos, en la otra se gestionan las señales de video (Ponsa y Granollers, s.f.).

En la Figura 3.66, se pueden apreciar algunos otros ejemplos de consolas de control más actuales, ya que con el paso de los años se ha buscado aplicar la ergonomía al diseño de los centros de control y sus componentes.

La ergonomía es:

“el conjunto de conocimientos de carácter multidisciplinar aplicados para la adecuación de los productos, sistemas y entornos artificiales a las necesidades, limitaciones y características de sus usuarios, optimizando la eficacia, seguridad y bienestar” (Asociación Española de Ergonomía, 2017).

Es así que el estudio de los requisitos de la ergonomía ha llevado a los diseñadores a crear puestos de trabajo que se caracterizan por ser seguros, cómodos y productivos (Ponsa y Granollers, s.f.).

Como se aprecia en la Figura 3.67, incluso el tamaño del monitor que se va a utilizar determina las dimensiones con las que debe contar el puesto de trabajo.



Figura 3.65. Elementos básicos de un puesto de trabajo en un centro de control
Fuente: (Ponsa y Granollers, s.f.)



Figura 3.66. Ejemplos de consolas de control
Fuente: (Gesab, 2017)

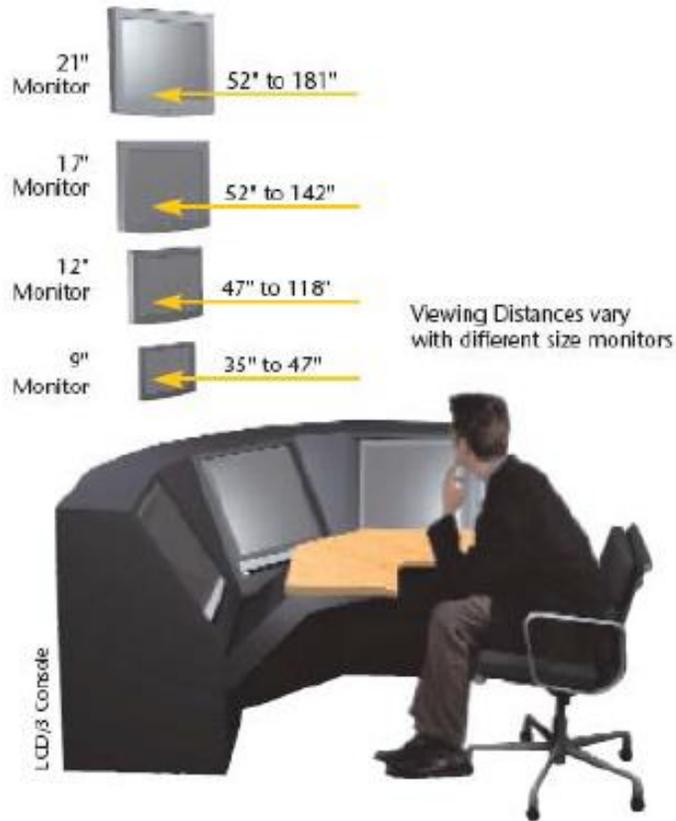


Figura 3.67. Tamaños de monitor y su relación con las dimensiones del puesto de control
Fuente: (Ponsa y Granollers, s.f.)

3.9.7. Sistemas de comunicación

En el Apartado 3.6 se hizo una clasificación de los sistemas de comunicación y en los siguientes párrafos se presentan las principales características que tienen los elementos a implantar en cada uno de los casos.

En cuanto a los sistemas de comunicaciones por cable metálico, se mencionó que se cuenta con cable de pares y cable coaxial, sin embargo, actualmente la fibra óptica es la opción más utilizada, por lo cual enseguida se presentan las diferentes opciones que se tienen en el mercado.

Según el modo de propagación, la fibra óptica se suele dividir en multimodo y monomodo (Figura 3.68). En las primeras, los rayos luminosos pueden circular por más de un camino (modo) dentro de la fibra. Son muy utilizadas en comunicaciones dentro de distancias cortas (máximo de 10 km) (Grami, 2016).

Dentro de las fibras multimodo se tienen dos sub tipos dependiendo del índice de refracción del núcleo, se cuenta con Salto de índice e Índice gradual (Grupo Comunicaciones Ópticas, 2006).

En el caso del Salto de índice, el índice de refracción es constante en todo el núcleo, para el Índice gradual el núcleo sí está compuesto por diferentes materiales (Figura 3.69) (Grupo Comunicaciones Ópticas, 2006).

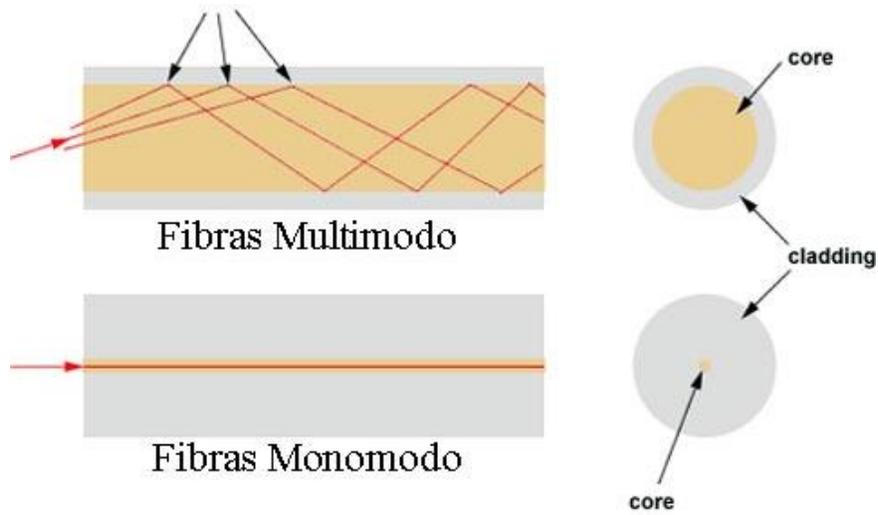


Figura 3.68. Fibra óptica multimodo y monomodo
Fuente: (Rodríguez, 2012)

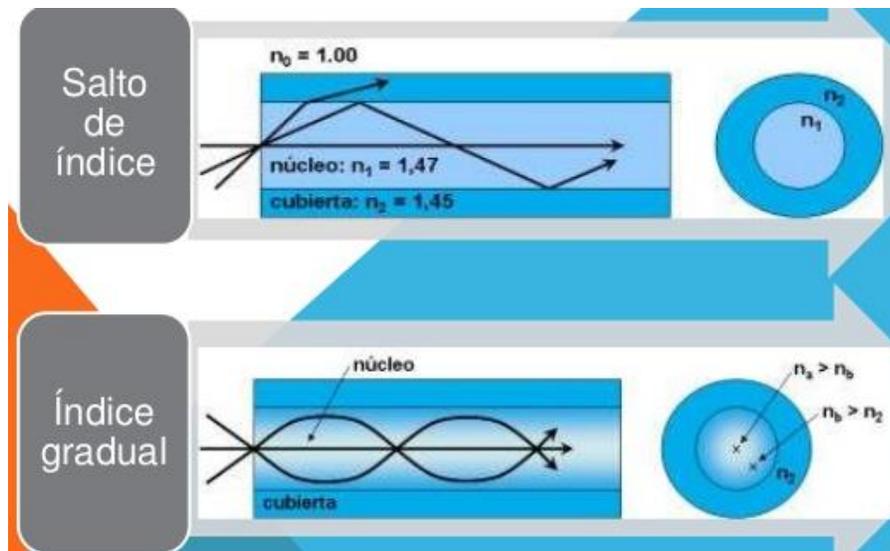


Figura 3.69. Tipos de fibra óptica multimodal
Fuente: (Cabascango, Lomas y Ramos, 2014)

Por su parte, las fibras monomodo presentan diámetros más pequeños, pero únicamente admite un rayo, “el cual se propaga directamente sin reflexión” (Optral, s.f.). Su uso es para distancias más grandes (más de 10 km).

Existen tres tipos de fibras monomodo:

- SMF (Estándar Single-Mode Fiber):
- DSF (Dispersion-Shifted Fiber)
- NZ-DSF (Non Zero Dispersion-Shifted Fiber)

Cada uno de ellos cuenta con características propias referentes a dispersiones, pérdidas, áreas efectivas de la fibra, etc. Por lo que dependiendo del proyecto en que se vayan a aplicar se debe elegir la que cumpla con los requisitos propios.

Por otra parte, en cuanto a los sistemas inalámbricos, en el área de radiocomunicaciones, como se detalló en el Apartado 3.6, el protocolo Tetra se ha convertido en uno de los más utilizados, gracias a que es abierto, es decir, está disponible para cualquier fabricante y permite que se ofrezca a los usuarios el diseño de un sistema de comunicaciones basado en sus necesidades (Intema Comunicaciones, 2017).

Además, la Asociación TETRA se encarga de probar y comprobar que “todas las funciones del protocolo funcionen entre los distintos fabricantes de infraestructura y terminales” (AR Comunicación Integral, 2017).

Esto es importante debido a que los usuarios Tetra tendrán libertad de seleccionar los productos de su preferencia, incluso usar dispositivos de diferentes fabricantes sin que se presente ningún inconveniente (AR Comunicación Integral, 2017).

Esto a la vez incentiva la competencia, pues los fabricantes saben que deben ofrecer buenos servicios y productos de calidad para convertirse en la mejor opción del usuario (AR Comunicaciones, 2017).

De manera general, para las comunicaciones Tetra se cuenta con fabricantes de infraestructura, terminales (radios portátiles y móviles) y aplicaciones.

Para que funcione un sistema de comunicaciones de este tipo se requieren radiobases, conmutadores, equipos fijos, móviles y portátiles, entre otros.

En la Figura 3.70 se pueden apreciar algunos ejemplos de radios portátiles, actualmente ya existen dispositivos que permiten incluso la captura de imágenes para así agilizar los procesos de generación de informes. También se presentan diferentes tamaños y pesos en estos tipos de radios.

Por otra parte, también se tienen los radios móviles que van instalados en los vehículos (Figura 3.71), deben ser diseñados para soportar diferentes condiciones como vibraciones, golpes, etc.

De igual manera, se pueden encontrar variados modelos que se elegirán dependiendo de los “requisitos específicos de operaciones comerciales y de seguridad que incluyen transporte, diversas industrias, [...] y seguridad pública” (Motorola Solutions, 2013).



Figura 3.70. Ejemplos de radios portátiles
Fuente: (Motorola y Kenwood, 2017a e Hytera e Icom, 2017)



Figura 3.71. Ejemplos de radios móviles
Fuente: (Motorola y Kenwood, 2017b)

Además, es posible encontrar a una gran variedad de fabricantes de infraestructura Tetra, “muchos de ellos con experiencia en redes grandes y pequeñas y para los diferentes perfiles de los clientes” (Mundo TETRA, 2014).

Algunos ejemplos de fabricantes son: Motorola, Cassidian, Rohill, Damn, Rohde & Schwarz, Teltronic, Thales, Etelm, Artevea, Team Simoco y Sepura (Mundo TETRA, 2014).

Algunas de las empresas, además de comunicaciones tetra, combinan otros sistemas de comunicación, con la finalidad de lograr unificar grandes volúmenes de datos y mejorar su eficiencia y eficacia (Motorola Solutions, 2013).

Finalmente, se encuentran los sistemas de comunicación móvil y de telefonía, para su utilización se requiere contar con “soporte por parte de un operador, equipos con compatibilidad 4G y un SIM con soporte para la tecnología” (Xataka México, 2014).

En México existen algunas compañías que ya ofrecen 4G, que como se vio anteriormente, es la generación más reciente ya que la 5G aún está en periodos de prueba.

Algunos de los puntos que se deben tomar en cuenta antes de hacer la contratación de los servicios son: los precios, velocidad de la red, la latencia y la cobertura del territorio que brinde la compañía operadora, ya que en ocasiones ese suele ser el principal problema, entre las empresas que brindan dicho servicio se encuentra: Telcel, AT&T, Movistar.

La latencia se refiere a una “medida del retraso que tienen los datos cuando viajan de un punto a otro” (Garrido, 2016).

Cabe señalar, que de acuerdo con el reporte de OpenSignal (2016) citado por Forbes (2016), México se encuentra rezagado en el aspecto de la velocidad LTE que se ofrece, comparándola con el promedio a nivel mundial se encuentra por debajo.

Sin embargo, la situación puede mejorar, debido a que las principales empresas operadoras aseguran que seguirán realizando inversiones en este sector, con la finalidad de ofrecer un mejor servicio en general, para todos sus usuarios (Lucas, 2016).

Cualquiera de los sistemas de comunicación anteriormente mencionados pueden ser utilizados para la implantación de un Sistema Avanzado para el Transporte Público, sin embargo, dependerá de las características del lugar donde se llevará a cabo el proyecto, así como de ciertos aspectos técnicos y económicos, la elección de un tipo u otro.

3.10. EMPRESAS INTEGRADORAS

Con el término de empresas integradoras, se hace referencia a aquellas capaces de implantar un Sistema Avanzado para el Transporte Público con todos sus componentes, es decir, no solamente se encargan de comercializar el *software* o *hardware* que se requiere, sino que pueden poner en funcionamiento el sistema en su totalidad.

Algunas compañías desarrollan sus propias tecnologías para resolver los problemas que sus clientes les plantean, generalmente buscan ofrecer una “gestión global de las necesidades del cliente, desde la consultoría, pasando por el desarrollo de proyectos, la integración e implantación de soluciones, hasta el outsourcing de sistemas de información y de procesos de negocio” (Indra, 2016b).

Y es que una de las características de este sector, es la diversidad de clientes y los diferentes requerimientos de cada uno de ellos, por lo que las empresas se ven en la necesidad de ofrecer soluciones que se adapten a sus necesidades.

Actualmente, este tipo de compañías gestionan gran cantidad de proyectos a nivel mundial, especialmente en países como USA, Brasil, Colombia, México, Argentina, Polonia, Portugal o España (Indra, 2016b).

Como trabajan en diferentes lugares alrededor del mundo, es importante que las soluciones que ofrezcan se alineen a los requisitos propios de cada país o empresa, por ejemplo, en lo referente a las arquitecturas ITS o normatividad de la región, además de una evaluación de los impactos económicos, sociales, ambientales o tecnológicos que traerán consigo (IBM, 2016).

Lo que sucedía era que, en muchos casos, el punto fuerte de la compañía se encontraba solamente en alguno de los aspectos del SATP, por lo que era necesario buscar la asociación con algunas otras empresas para lograr brindar un servicio completo (Siemens, 2016b).

Es por esta razón que, una empresa integradora establece alianzas con las empresas desarrolladoras, es decir, los fabricantes de los diferentes elementos para proveer soluciones integrales.

Por ejemplo, se debe buscar la colaboración de una empresa dedicada al rastreo de los vehículos, misma que se encargará de proveer los dispositivos para la localización de las unidades, así como la instalación de los mismos, además de supervisar su correcto funcionamiento.

Por otra parte, una empresa diferente puede encargarse del sistema de pago electrónico, es decir, de instalar los lectores de las tarjetas inteligentes en los accesos a los sistemas de transporte o en su caso en cada una de las unidades del sistema de transporte público.

También existen compañías que se dedican específicamente a comercializar las pantallas o quioscos mediante los cuales se brinda la información a los usuarios.

Asimismo, algunas empresas ofrecen soluciones para llevar a cabo el control del tránsito tanto en calles como en carreteras, mismas que brindan dispositivos capaces de coordinarse para brindar la prioridad semafórica a las unidades de transporte público.

Pero también existen aquellas enfocadas a la instalación de los sistemas de comunicación, que como ya se mencionó anteriormente, representan uno de los aspectos fundamentales para que se lleve a cabo la transferencia de datos entre los diferentes dispositivos.

Finalmente, algunas compañías se encargan de poner en funcionamiento los centros de control, es decir, instalar todos los equipos necesarios para que se desde ahí se lleva a cabo la gestión del tráfico y se reciban oportunamente todos los datos que se recaban por los dispositivos que se encuentran en las vialidades o unidades de transporte.

Hoy en día existen varias empresas integradoras de tecnologías para Sistemas Inteligentes de Transporte, con oferta en México entre ellas se encuentra: Indra, SIEMENS, Sociedad Ibérica de Construcciones Eléctricas, S.A. (SICE), Actica, IBM, entre otras.

Un ejemplo de un proyecto desarrollado por estas empresas es el sistema de transporte del campus de la Universidad de Ryhad en Arabia Saudita.

El proyecto consistía en la instalación de un sistema de trolebuses que estaría siendo supervisado desde un centro de control, en donde se recibiría toda la información en tiempo real “para asegurar la eficiente explotación del servicio” (SICE, 2017).

Cada una de las unidades de este sistema se equipó con dispositivos GPS, cámaras de seguridad y pantallas para brindar información a los viajeros.

Pero también se consideró necesario contar con un sistema centralizado de información al pasajero que permitiría brindar datos a los usuarios en cada una de las estaciones de las rutas de dicho sistema, donde además se cuenta con un sistema de megafonía y cámaras de seguridad (SICE, 2017).

Se consideró necesario utilizar un sistema de prioridad semafórica que permitiera darle preferencia de paso a los trolebuses al llegar a las intersecciones.

Además, también fue necesario instalar un sistema de comunicaciones completo, que incluyó redes de fibra óptica y una red wireless móvil (SICE, 2017).

Como se puede apreciar, se trata de un sistema complejo que requería de la colaboración de expertos en diferentes áreas, razón por la cual, una empresa integradora fue contratada para llevar a cabo el proyecto, y ésta se encargó de coordinar a los encargados de los diferentes subsistemas para que finalmente el SATP funcionara de la manera correcta.



Figura 3.72. Sistema de transporte Universidad de Ryhad
Fuente: (SICE, 2017)

Otro proyecto desarrollado de esta manera, fue el Centro Informativo de Transporte Inteligente (CITI) del sistema de transporte Metrobús en la Ciudad de México.

Desde este centro se gestionan y controlan los autobuses de dicho sistema que circulan por carriles exclusivos, lo que se pretendía con este proyecto era mejorar la eficiencia, seguridad y calidad en el servicio que se brinda (Indra, 2016a).

Lo que la empresa integradora desarrolló fue un:

“control de los subsistemas de programación, regulación, videovigilancia en el interior de las unidades y estaciones, y los sistemas de información al viajero a bordo y en 160 estaciones, a través de paneles informativos y cámaras de vigilancia” (Indra, 2016a).

Es así que, desde el centro de control los operadores pueden ver en tiempo real el lugar donde se encuentra cada una de las unidades, así como la ruta y velocidad de éstas. Todo gracias al equipo que se instala en los autobuses y la infraestructura de comunicaciones móviles con tecnologías 3G y WiFi. Desde ahí también se puede interactuar con el personal que se encarga de manejar los autobuses y comunicarles las decisiones que se tomen en caso de “incidentes, necesidades de refuerzos o cualquier desviación del servicio” (Indra, 2016a). Dicho centro está en funcionamiento todos los días del año, las 24 horas, por lo que se buscó contar con equipos que sean capaces de resistir dichas condiciones.

Además, en el CITI se hace la “programación de la flota día con día y su modificación en tiempo real en caso de contingencias” (Indra, 2016a). La empresa integradora también se encargará de dar soporte tecnológico y mantenimiento del sistema durante 10 años (Indra, 2016a).

Empresas integradoras han desarrollado recientemente proyectos de este tipo en metros de varias ciudades españolas y latinoamericanas.

Pero en ciudades europeas y asiáticas como Londres, París, Múnich y Tokio, entre muchas otras, la implantación de Sistemas Inteligentes de Transporte enfocados a los servicios de transporte público de pasajeros no es algo reciente, desde hace ya varios años se ha optado por este tipo de alternativas, ejemplos de ello se pueden apreciar en la Sección 2.4.

Los beneficios que se han logrado con la utilización de SIT han generado que su uso se extienda a muchas de las ciudades de dichos continentes y se continúa investigando sobre el tema, sin embargo, en específico en México, este tipo de sistemas se encuentran en sus primeras etapas de desarrollo, es en los últimos años que se ha comenzado a pensar en su implantación como una alternativa viable para mejorar los servicios de transporte que se brindan.

CAPÍTULO 4

PROPUESTA DE IMPLANTACIÓN DE UN SATP EN EL SISTEMA PUMABÚS

En este capítulo se elabora una propuesta para la implantación de un Sistema Avanzado para el Transporte Público en el sistema de transporte interno Pumabús en Ciudad Universitaria, se detalla el porqué de la elección de dicho servicio, además de las características que deben tener los elementos a implantar para lograr su correcto funcionamiento y por consecuencia, la mejora en el nivel de servicio de dicho sistema.

4.1. JUSTIFICACIÓN

El sistema de transporte interno Pumabús se encarga de trasladar diariamente a gran parte de la comunidad universitaria dentro de CU, sin embargo, es un servicio que bien podría mejorar.

Es común encontrar largas filas de usuarios esperando abordar una unidad de una ruta determinada de Pumabús o ver sobrecupo en sus unidades, situación que incluso dificulta a los choferes llevar a cabo una adecuada conducción.

También se observa a personas buscando información para ubicarse y poder abordar la ruta que los lleve finalmente a su destino, pero ésta es una tarea complicada debido a que existe muy poca información sobre el sistema que esté disponible para los usuarios.

En ocasiones ni en el mismo autobús se indica la ruta que sigue, por lo que es necesario pedir información a los choferes.

Lo único que se llega a encontrar son mapas de las rutas en las paradas establecidas, sin embargo, muchas veces éstos se encuentran rotos o dañados, lo que dificulta la transmisión de información.

Pero más allá de un mapa con o sin buena calidad, lo que los usuarios necesitan es información en tiempo real que les ayude a tomar mejores decisiones para la planificación de sus viajes, que les permita determinar si es conveniente esperar a que llegue la siguiente unidad o es mejor optar por otro modo de transporte.

Un Sistema Avanzado para el Transporte Público es una opción que puede traer beneficios reales al sistema Pumabús. Ya se han explicado en capítulos anteriores los beneficios de su implantación y los componentes básicos, sin embargo, con base en las características propias del Pumabús se deben hacer adecuaciones necesarias.

Dentro de Ciudad Universitaria ya se cuenta con carril exclusivo para los autobuses de Pumabús y paradas debidamente establecidas, además como el servicio es gratuito, los dispositivos de pago electrónico no serían necesarios.

Sin embargo, los dispositivos de localización de los autobuses, prioridad semafórica, así como aquellos encargados de la distribución de la información en tiempo real, además del *software* de predicción de tiempos de viaje y de optimización de la operación, forman parte de la propuesta para este caso.

4.1.1. Encuesta de satisfacción

Se realizó una encuesta de satisfacción del sistema Pumabús, con la finalidad de conocer la opinión de las personas sobre el servicio que se les brinda. La encuesta permite obtener “información sobre las debilidades y las fortalezas que los usuarios identifican” (Nicuesa, 2016).

Es importante reiterar que se trata solamente de una encuesta de opinión, por lo que los resultados que de ella se obtengan no tienen representatividad estadística.

Para la elección de los lugares de aplicación de las encuestas primero se establecieron las rutas que permitirían recaudar la mayor cantidad de información posible. De acuerdo con información de Cifuentes (2016), las rutas más utilizadas son la 1,2 y 9, es por esta razón que se llevaron a cabo los cuestionarios en algunas paradas de estas tres rutas (Figura 4.1).

Del total de paradas de las rutas antes mencionadas, se eligieron 10 de ellas; se buscaron aquellas donde se presentaba mayor afluencia, en la Tabla 4.1 se aprecian las paradas propuestas y en la Figura 4.1 se puede ver su ubicación.

Para elegir cuáles son las paradas adecuadas, se utilizó la misma información presentada por Cifuentes (2016), en donde establece que las facultades con mayor cantidad de usuarios son las que más viajes atraen y generan.

Tabla 4.1. Paradas Pumabús para hacer encuestas

Nombre de la parada
Metro C.U.
Metrobús C.U.
Posgrado de Ingeniería
Rectoría
Ciencias Circuito Exterior
Derecho
Cómputo Académico
Medicina
Química
Ingeniería

Fuente: Propia

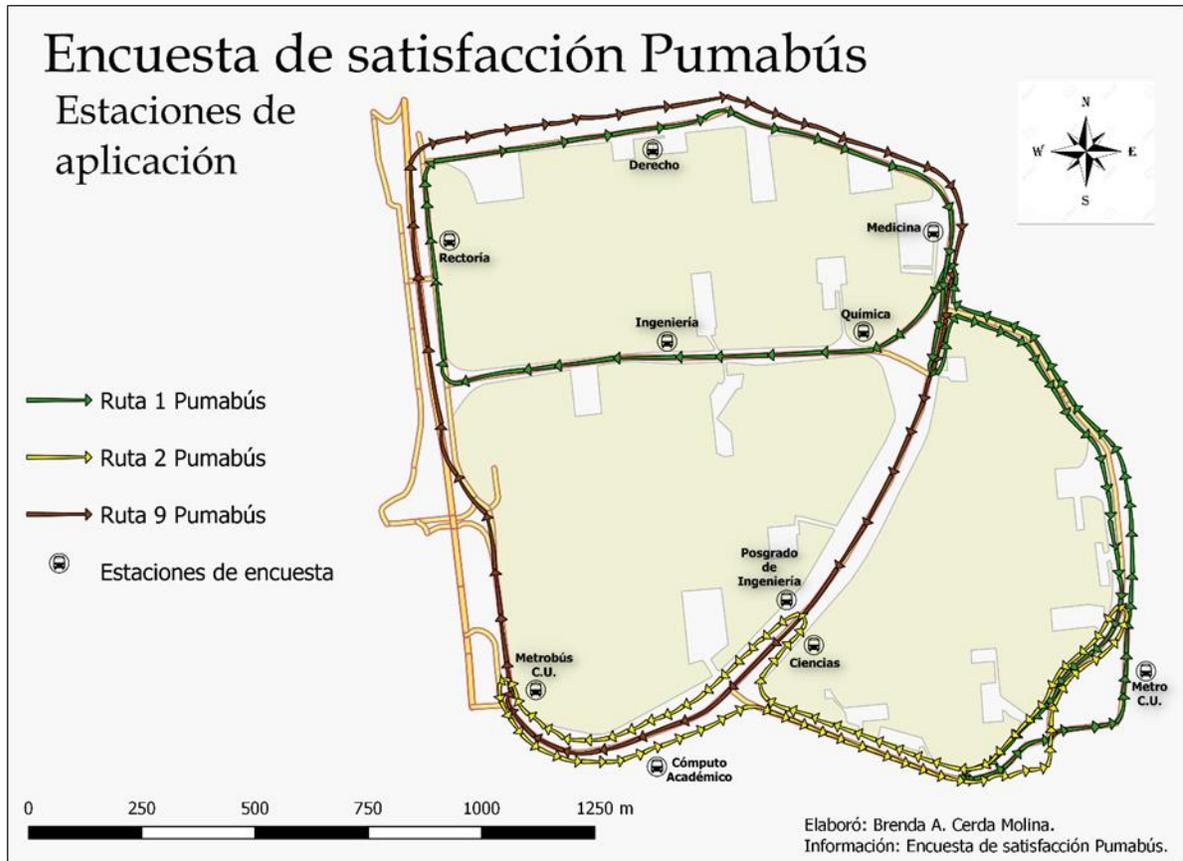


Figura 4.1. Paradas de encuesta
Fuente: Propia

4.1.2. Resultados encuesta de satisfacción

Con base en la encuesta de satisfacción realizada en los puntos antes mencionados, se logró obtener la participación de 253 usuarios, de los cuales el 57% eran mujeres y el 43% hombres, en su mayoría estudiantes de la UNAM que utilizan el servicio por lo menos una vez al día.

Como era de esperarse, se encontró que las rutas más utilizadas por los encuestados son la 1,2 y 9, esto es debido a que las paradas en donde se aplicaron los cuestionarios pertenecen a éstas. Además, el horario de aplicación de la encuesta es la hora pico de la mañana, de 6:00 a.m. a 9:00 a.m., por lo que los resultados pueden presentar variaciones a lo largo del día.

Se les preguntó a los usuarios qué tan satisfechos se sentían con el servicio que brinda el Sistema Pumabús, en la Figura 4.2 se puede apreciar que el 70% de los encuestados dice sentirse satisfecho, algunas personas mencionaron que la gratuidad del servicio es lo más importante para ellos, más allá de la comodidad o eficiencia del sistema.

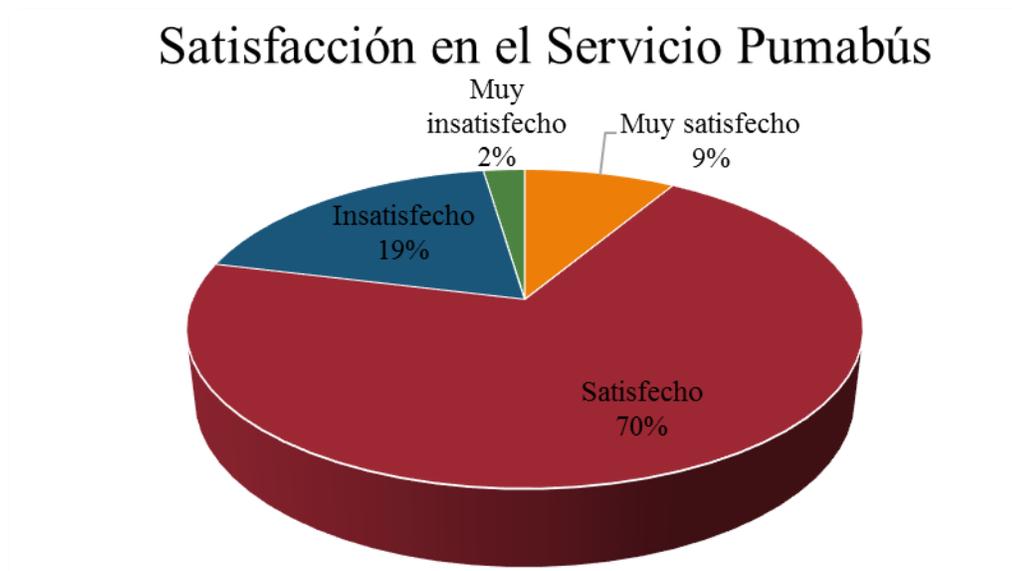


Figura 4.2. Satisfacción en el Sistema Pumabús
Fuente: Propia

Sin embargo, a pesar de que los usuarios dicen sentirse satisfechos con el servicio que se les brinda, existen algunas áreas en las que les gustaría que se trabajará, pues parecen estar conscientes de que existen varios aspectos a mejorar.

En la Figura 4.3 se presentan dichos aspectos. Para los encuestados la disminución de los tiempos de espera en las paradas resulta ser lo más importante, seguido por el establecimiento de los horarios de llegada de los autobuses a las paradas y la disponibilidad de información en tiempo real sobre la hora de llegada de las unidades.

Cabe señalar que, según los resultados obtenidos, el 45% de los usuarios tiene que esperar entre 10 y 20 minutos en las paradas de Pumabús a que pase algún autobús de la ruta que los lleva a su punto de destino. Esta espera resulta ser demasiado alta, si se toma en cuenta que el tiempo promedio de viaje de los usuarios se encuentra entre los 5 y 10 minutos.

En la Figura 4.4 se puede apreciar una comparación entre los tiempos de espera, marcados con color rojo, y los tiempos de viaje de los usuarios, en color verde y superpuestos a los tiempos de espera, ahí se observa que en muchos de los viajes es mayor el tiempo que deben esperar a que arriben las unidades, que el que pasan dentro de ellas.

En la Figura 4.5 se presenta de nuevo un análisis, pero ahora utilizando los porcentajes de viaje (color verde) y de espera (color rojo), nuevamente se superpone el porcentaje de viaje al de espera y como se aprecia, la proporción de espera en muchos de los casos resulta excesivo, esto explica por qué el aspecto de la disminución de los tiempos de espera es tan importante para ellos.

Sin embargo, como se mencionaba, también el establecimiento de los horarios de llegada de los autobuses y la disposición de información en tiempo real son puntos primordiales.

Algunos usuarios comentan que les gustaría tener a su disposición una aplicación móvil que les permitiera saber cuáles rutas pasan por una parada determinada, así como el tiempo que tardará el siguiente autobús en llegar.

Aseguran que, aunque las unidades muchas veces pasan llenas, ellos no saben cuánto tiempo más tendrán que esperar a que llegue el siguiente autobús, por lo que hacen todo lo posible por subirse al vehículo, aunque esto implique viajes incómodos.

Algunos otros problemas que perciben los usuarios son, por ejemplo, que existen algunas rutas en las que los autobuses van llenos prácticamente a todas horas, por lo que creen que conviene hacer un análisis para determinar la conveniencia de hacer algunas modificaciones en los recorridos y así evitar el sobrecupo.

Además, se quejan de los robos, en especial de celulares, dentro de las unidades de Pumabús y de la manera de conducir de algunos de los choferes, sin dejar de mencionar que es común encontrar vehículos privados o taxis invadiendo la vía del Pumabús, aun cuando esto está prohibido dentro de Ciudad Universitaria.

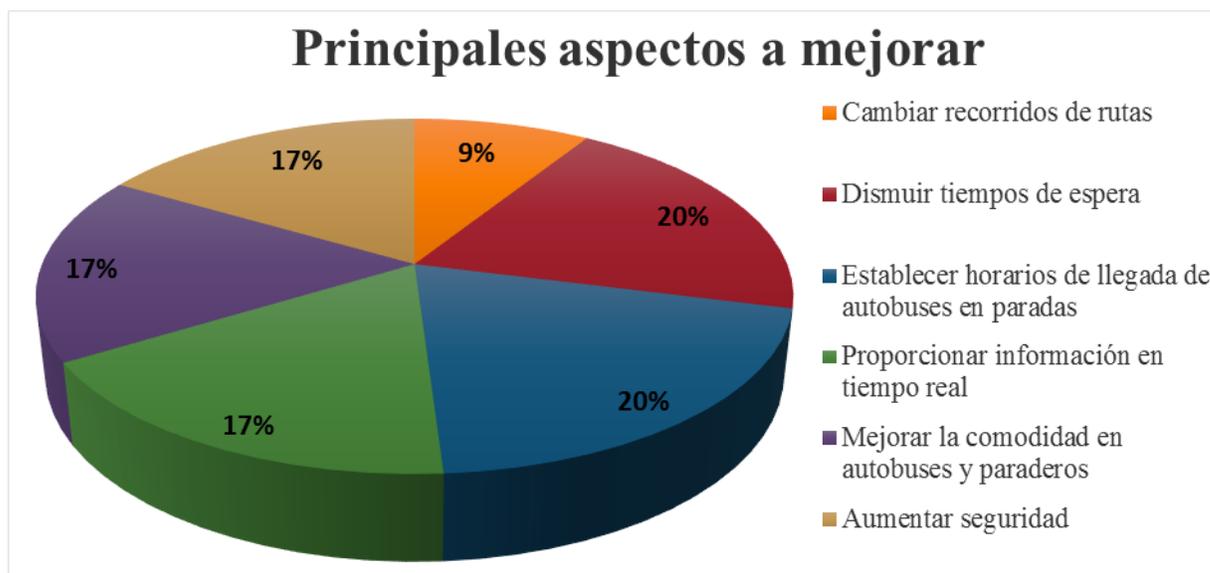


Figura 4.3. Aspectos por mejorar en el Sistema Pumabús
Fuente: Propia

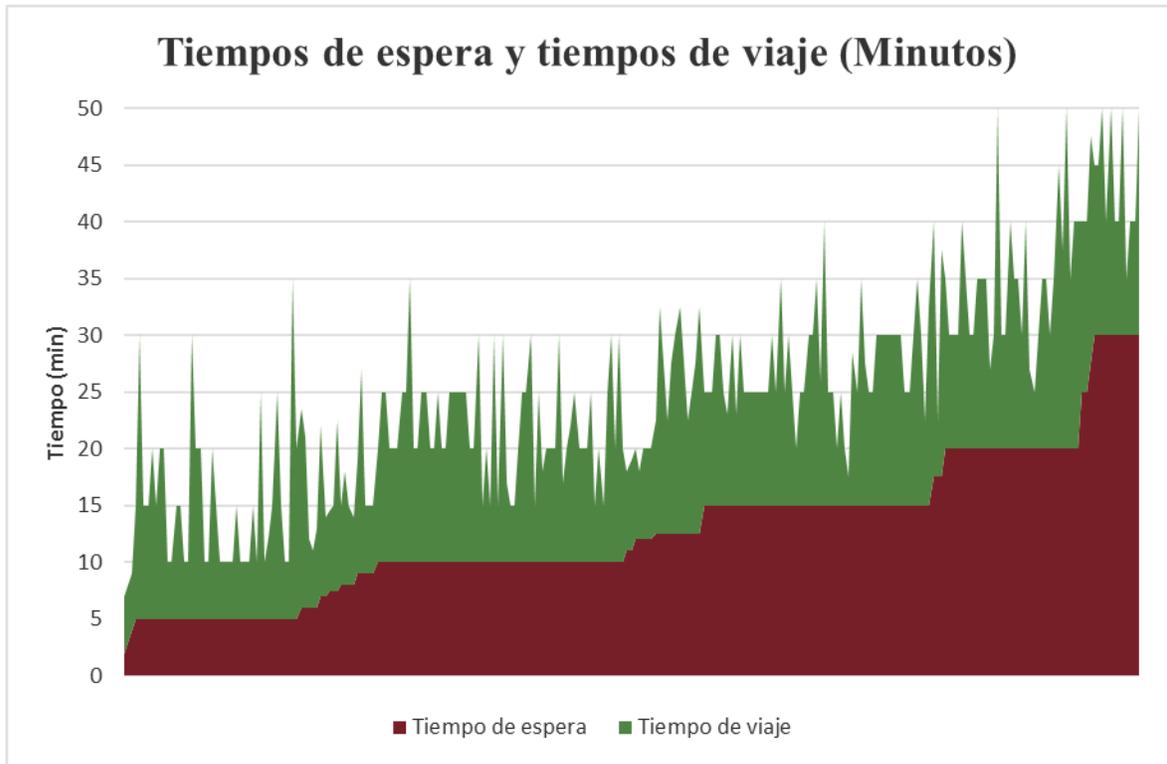


Figura 4.4. Tiempos de espera y viaje de los usuarios del Sistema Pumabús
Fuente: Propia

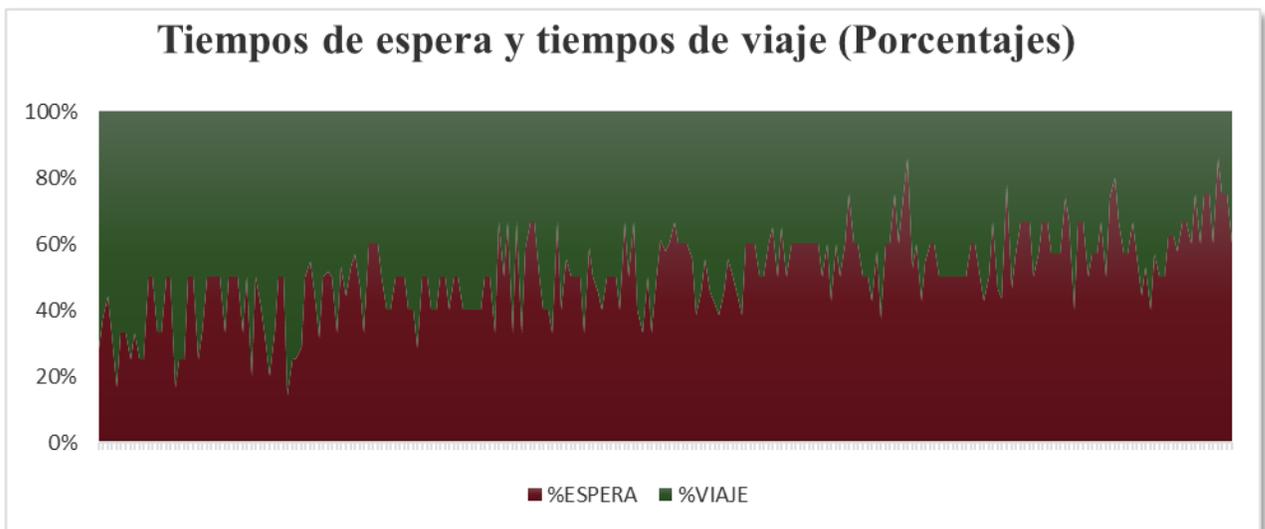


Figura 4.5. Comparación de tiempos de espera y viaje de los usuarios del Sistema Pumabús
Fuente: Propia

En la Figura 4.6 se muestran las líneas de deseo producto de los resultados de las encuestas de satisfacción aplicadas, es decir, se presenta de manera gráfica la distribución de los viajes que realizan los encuestados.

Como se puede apreciar en la Figura 4.7a, de los encuestados en la parada Metro C.U., el 67% se distribuye entre únicamente cuatro paradas destino, Arquitectura con el 21%, Ingeniería con el 20%, además de Psicología (14%) y Filosofía y Letras (12%).

Algunas de estas paradas se encuentran más cercanas a la parada del Metro Copilco, sin embargo, si bajarán en dicha parada de Metro, los usuarios tendrían que caminar para llegar a sus destinos, por lo que muchas personas prefieren bajar hasta la parada Metro Universidad y de ahí tomar la ruta de Pumabús que los deja directamente en su destino.

Mientras las paradas en las que mayor cantidad de encuestados tienen como destino el Metro C.U. son: Cómputo Académico, Rectoría e Ingeniería (Figura 4.7b).

En la Figura 4.8a, se realiza un análisis similar, pero en la parada Metrobús C.U., en donde se encontró que los usuarios tienen tres destinos principales, Filosofía y Letras que capta el 15% y Derecho y Economía, con el 12% cada una de ellas.

Aquí sucede una situación similar a lo anteriormente explicado en el caso del Metro C.U., ya que resulta interesante que estos puntos sean los principales destinos, tomando en cuenta que existe otra parada de Metrobús (Dr. Gálvez) más cercana, sin embargo, desde ahí no existe conexión con el Sistema Pumabús.

Si se toma en cuenta que la velocidad promedio de caminata es de cinco kilómetros por hora (Suárez y Delgado, 2015), les tomaría entre 15 y 20 minutos llegar a su destino, sin embargo, en la parada Metrobús C.U. sí cuentan con conexión con los autobuses Pumabús y, una ruta en específico que los deja en sus destinos, por lo que el tiempo de caminata es mínimo, esto puede explicar el porqué del comportamiento de los usuarios.

En la Figura 4.8b, se muestra que las paradas en las que gran parte de los encuestados tienen como destino Metrobús C.U. son: Ciencias, Posgrados de Ingeniería, además de Derecho y Medicina.

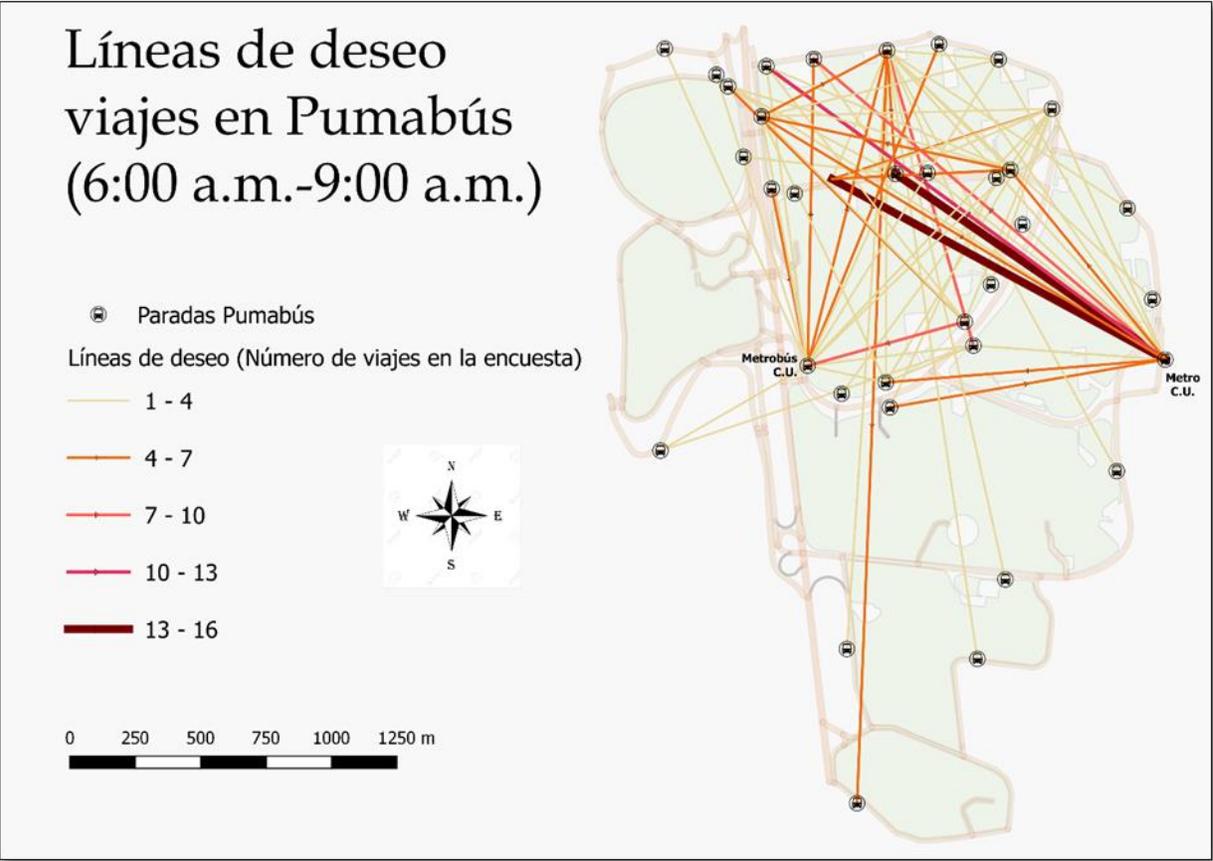


Figura 4.6. Líneas de deseo de los viajes en Pumabús
Fuente: Propia

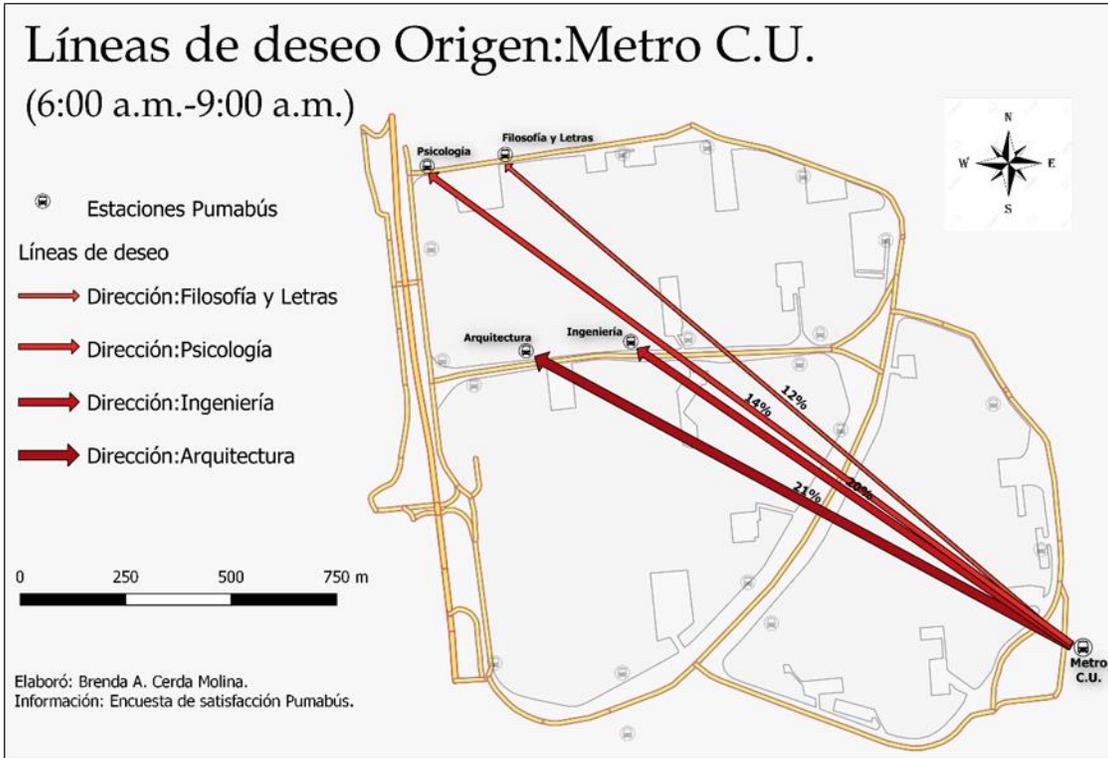


Figura 4.7a. Principales líneas de deseo de los viajes con origen en la parada Metro C.U.

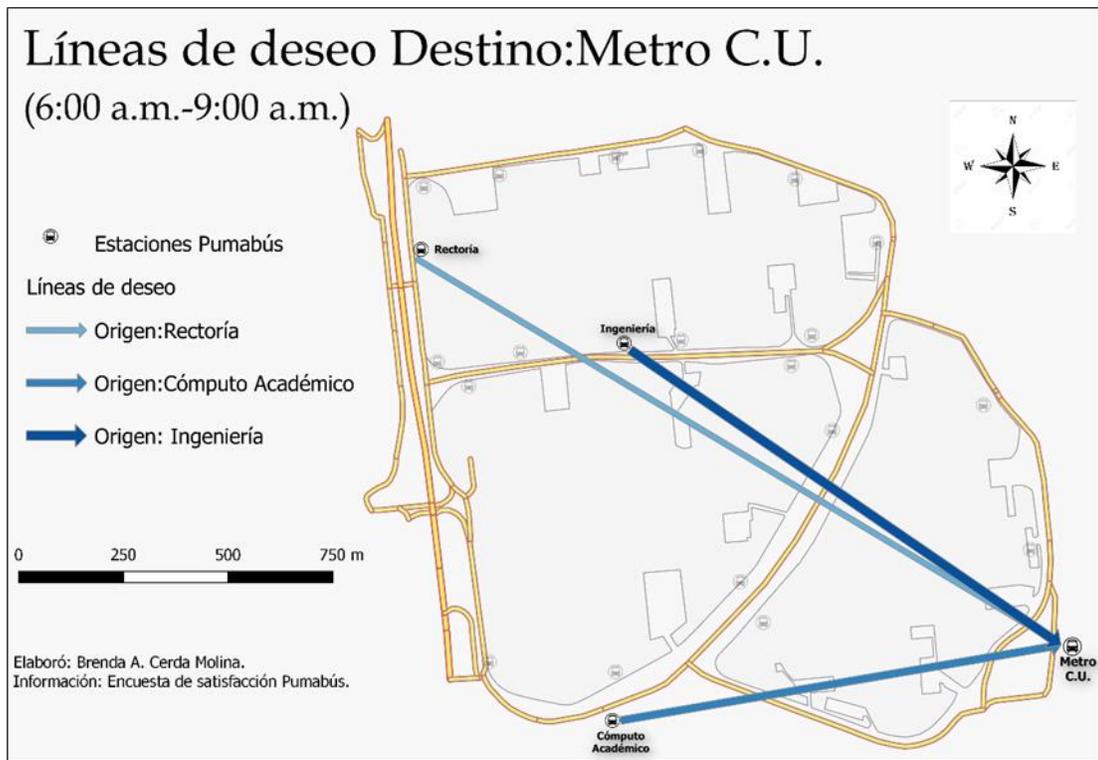


Figura 4.7b. Principales líneas de deseo de los viajes con destino en la parada Metro C.U.
Fuente: Propia

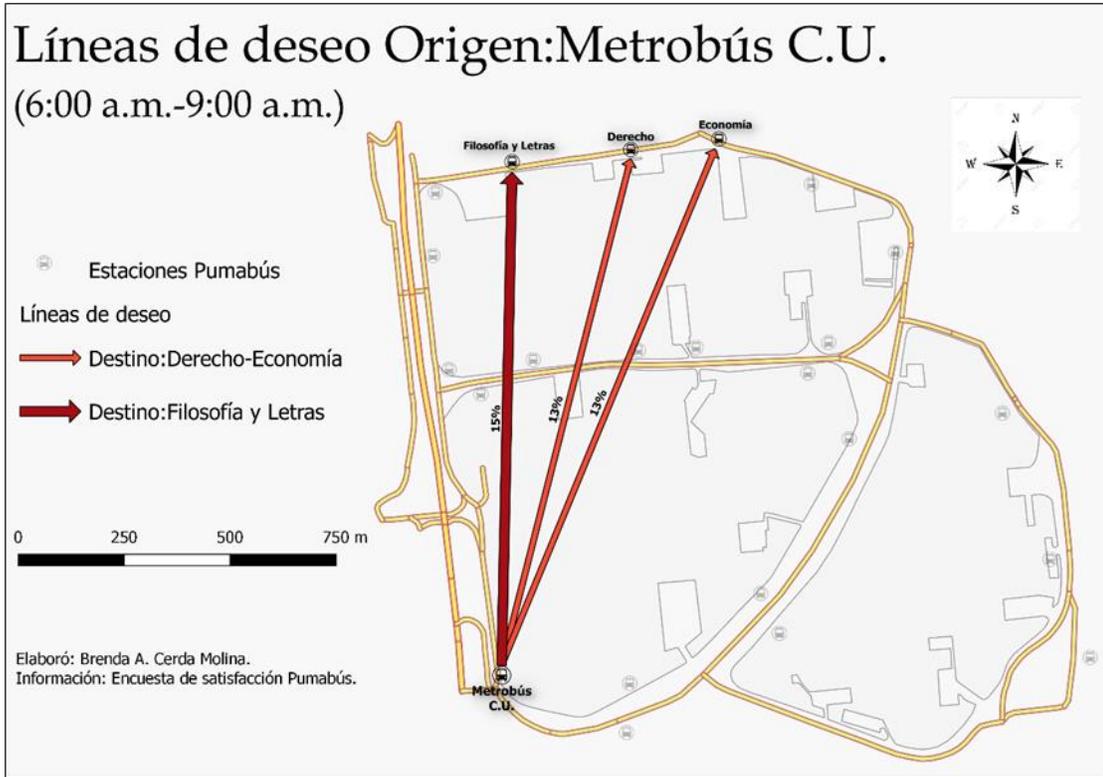


Figura 4.8a. Principales líneas de deseo de los viajes con origen en la parada Metrobús C.U.

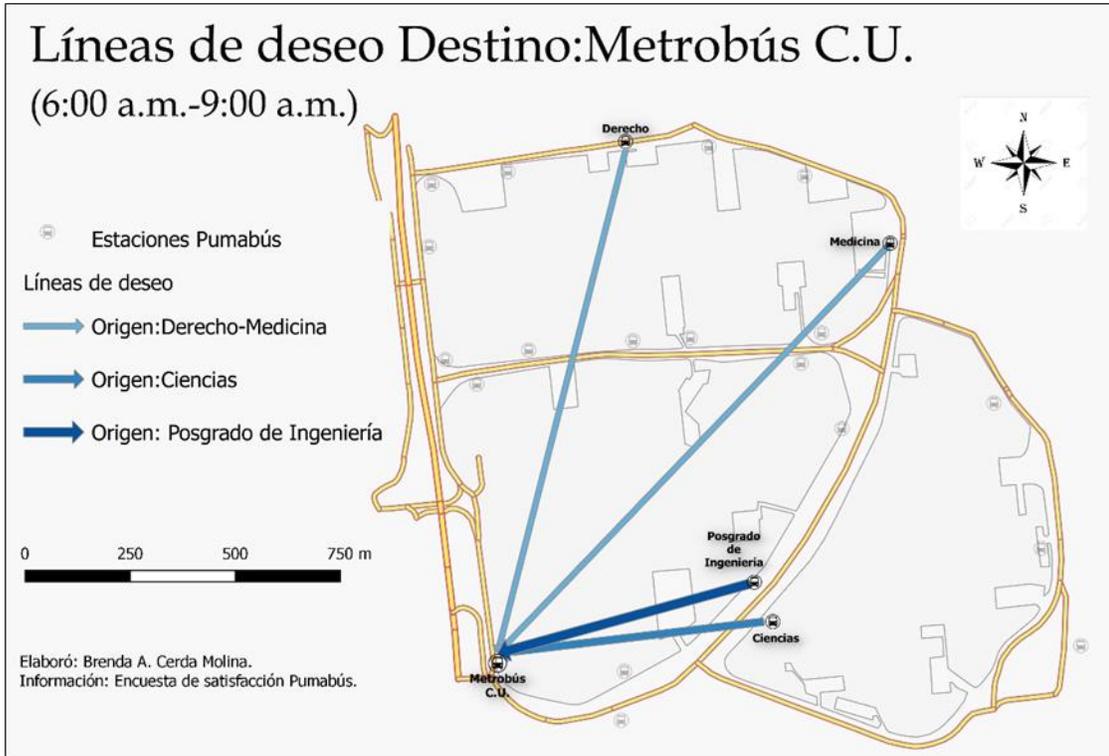


Figura 4.8b. Principales líneas de deseo de los viajes con destino en la parada Metro C.U.

Fuente: Propia

4.2. ELEMENTOS PROPUESTOS PARA LA IMPLANTACIÓN DEL SATP

En los siguientes apartados, se describirá la tecnología propuesta para la implantación de un Sistema Avanzado para el Transporte Público en el Sistema de Transporte Interno Pumabús, tomando en cuenta sus características particulares para lograr un adecuado funcionamiento.

4.2.1. Hardware

Enseguida se presentan las principales características con las que debe contar el *hardware* propuesto en cada uno de los diferentes aspectos para la implantación del Sistema Avanzado para el Transporte Público en el Sistema Pumabús.

4.2.1.1. Contadores de pasajeros

Los contadores de pasajeros se utilizan principalmente para recabar datos sobre el número de pasajeros que ingresan y salen de los vehículos del transporte público.

Sin embargo, estas cifras también se usan para llevar a cabo una supervisión de la operación del sistema, ya que permiten el cálculo de los ingresos que se deben tener, tomando en cuenta las tarifas vigentes.

En el caso del Sistema Pumabús, por tratarse de un servicio gratuito para la comunidad universitaria y/o visitantes, los contadores de pasajeros en las unidades servirían básicamente para conocer la demanda de manera precisa, tener cantidades exactas del número de usuarios del Sistema diariamente, rutas más utilizadas, horas pico, etc.

Es por esa razón, que el tipo de contadores propuestos para su uso en las unidades Pumabús, es el de infrarrojos, como el mostrado en la Figura 4.9, usualmente se requieren dos contadores en cada una de las puertas, pero actualmente existen algunas opciones en las cuales solamente basta con un dispositivo por puerta.

A pesar de que este tipo de contadores no son los más sofisticados, para el uso que se les va a dar en el Sistema Pumabús representan una buena opción.

Entre sus ventajas se encuentran que se instalan cerca de las puertas de las unidades, pero no obstruyen de ninguna manera el paso de las personas, además generalmente están fabricados con aluminio de alta resistencia, por lo que su vida útil puede extenderse durante varios años (Optimovilidad, 2017).

Una de las desventajas más notables era su falta de precisión, ya que se aseguraba que, al hacer uso de una tecnología relativamente sencilla, los conteos que ofrecía distaban mucho de ser exactos.

Sin embargo, hoy en día existen en el mercado varios dispositivos de buena calidad que ofrecen alta fidelidad en sus conteos y menores niveles de falla debido a obstrucciones o personas entrando y/o saliendo al mismo tiempo.

Finalmente, los resultados que arrojen los contadores de pasajeros servirían para hacer una mejor planeación del Sistema Pumabús, en caso de ser necesario, hacer reajustes en los recorridos de las rutas, conocer cuáles son las más y menos demandadas, etc.



Figura 4.9. Contadores de pasajeros mediante infrarrojos
Fuente: (Optimovilidad, 2017)

4.2.1.2. Localización de vehículos

A pesar de que hoy en día existen diferentes dispositivos para la localización de los vehículos, el sistema de posicionamiento global o GPS es la tecnología con mayor auge, y no solamente en el área de transporte, sino en diversos sectores.

De hecho, en el sistema Pumabús, todas las unidades ya cuentan con dispositivos GPS instalados, por lo que éste es el método propuesto para hacer la localización de los vehículos.

Sin embargo, existen algunas características con las que deben contar estos dispositivos para que cumplan su función de la manera correcta.

La mayoría de los GPS que se pueden encontrar en el mercado son fáciles de instalar en las unidades, sin embargo, es necesario asegurarse de que el dispositivo no interfiera con el correcto funcionamiento del autobús.

Lo mejor es elegir una opción de bajo consumo y alto rendimiento, pero que también sea altamente resistente, principalmente a golpes, polvo y vibraciones.

Esto debido a que cuando el vehículo hace sus recorridos habituales, se pueden generar movimientos bruscos, que en ocasiones suelen afectar el funcionamiento del GPS, y lo que se requiere es que envíen la posición de la unidad sin problemas de pérdida de datos.

A esta característica se le conoce como latencia, que se “refiere a los retardos temporales que se registran [...] y se producen por la demora en la propagación y en la transmisión de los paquetes de datos” (Pérez y Gardey, 2012b).

Con respecto a este punto, uno de los aspectos más importante es el referente a la frecuencia de transmisión de los datos que el dispositivo GPS va generando, ya que se requiere que la información se esté enviando en intervalos de tiempo cortos.

Es decir, existen algunos receptores GPS que permiten hacer diferentes configuraciones dependiendo de la frecuencia requerida, en algunos proyectos basta con recibir la información en periodos de tiempo largos, pero éste no es el caso.

Lo que se necesita, es que el dispositivo GPS sea capaz de hacer las transmisiones de manera constante, con la finalidad de rastrear el vehículo a cada momento para poder llevar a cabo los cálculos posteriores de una manera mucho más precisa.

Por otra parte, generalmente en la descripción de las características de los receptores GPS, se especifica la velocidad, aceleración, altura y temperatura a la cual funcionan correctamente, solamente se debe verificar que cumplan con los requisitos que se buscan.

Tomar en cuenta que la velocidad de circulación en Ciudad Universitaria es de 40 kilómetros por hora y de 10 kilómetros por hora en los estacionamientos (Consejo Universitario, 2017), y la altura promedio de la Ciudad de México es de 2 300 metros sobre el nivel del mar (msnm).

En cuanto a la aceleración, los dispositivos generalmente manejan rangos amplios por lo que no se debería presentar mayor problema.

Respecto a la temperatura de operación, se consultaron varios modelos en los que los intervalos van desde los -30°C hasta los 80°C , razón por la cual tampoco representa gran inconveniente.

Además, se debe buscar la mayor precisión posible en los receptores GPS a instalar y que estén diseñados para hacer conexión con otros elementos, por ejemplo, en caso de que se requiera utilizar DGPS o GPS Diferencial, como se explicó en la Sección 3.3.3, el DGPS es un sistema que brinda a los receptores GPS, correcciones de los datos recibidos de los satélites GPS, esto con la finalidad de proporcionar mayor precisión en las posiciones calculadas (Toposervic, 2016).

En el caso de la localización de las unidades del sistema Pumabús, resulta recomendable contar con DGPS para lograr la mayor precisión posible en los datos relacionados a la ubicación de los autobuses, éste es un aspecto al que se le debe dar prioridad, debido a que con base en estos datos es que posteriormente se hacen los cálculos de los tiempos de llegada de las unidades a las diferentes paradas, por lo que contar con información incorrecta o con errores, generaría poca precisión en las predicciones.

4.2.1.3. Distribución de información en tiempo real

Como se pudo apreciar en los resultados de la encuesta de satisfacción aplicada a los usuarios del Sistema Pumabús, uno de los puntos que consideran importante y les gustaría que se mejorara, se refiere a la disposición de información en tiempo real sobre los horarios de llegada de las unidades de las diferentes rutas a las paradas.

En el Apartado 3.3.4, se mencionó que existen diferentes opciones para brindar a las personas este tipo de información, sin embargo, en este caso se propone la implantación de pantallas informativas en algunas de las principales paradas.

Es conveniente señalar, que se propone comenzar con la instalación de estos dispositivos en las zonas que se muestran en la Figura 4.10, esto debido a que como se señaló anteriormente, es ahí donde circulan las tres rutas con mayor demanda del Sistema Pumabús.

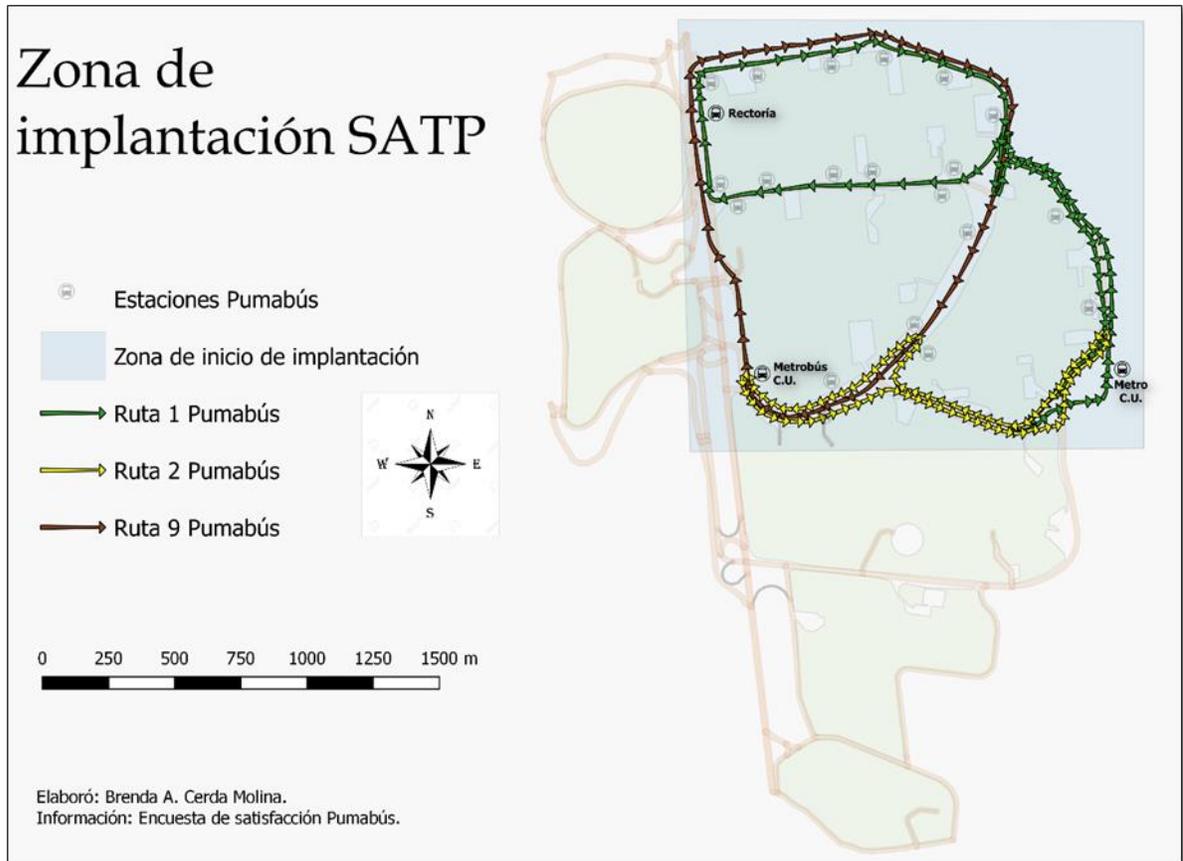


Figura 4.10. Zona propuesta para la implantación de un Sistema Avanzado para el Transporte Público en el Sistema Pumabús
Fuente: Propia

Para hacer la elección de las paradas Pumabús en las cuales resulta más adecuada la utilización de pantallas informativas, se utilizó la información presentada por Cifuentes (2016), en donde hace un análisis de la cantidad de personas a las que atienden cada una de las paradas.

“Para el cálculo de la población universitaria de cada nodo, se consideró la cantidad de personal académico, trabajadores y estudiantes de cada una de las facultades, edificios e institutos cercanos” (Cifuentes, 2016).

Con base en esto y, en los resultados de las líneas de deseo presentadas en el Apartado 4.1.2, resultado de la encuesta de satisfacción aplicada, se propone que las pantallas informativas sean instaladas en las paradas: Metro C.U., Metrobús C.U., Ingeniería, Psicología, Derecho, Medicina y Posgrado de Ingeniería (Figura 4.11).

Además, en caso de que se desarrolle una aplicación móvil que permita a los usuarios consultar a través de dispositivos electrónicos la información sobre el Sistema Pumabús en tiempo real, también sería en estas paradas donde se debe asegurar la correcta conectividad para los usuarios.

Como se explicó en la Sección 2.6.6, ya existe un Sistema de Información al Viajero denominado Hiperpuma, mediante el cual se obtienen las rutas más rápidas para desplazarse dentro de Ciudad Universitaria, desde un origen hasta un destino determinado.

Sin embargo, este sistema se basa en información histórica, con la implantación del SATP, podría llevarse a Hiperpuma a una siguiente fase de desarrollo, donde se utilice la información en tiempo real para presentar resultados mucho más confiables a los usuarios y, sobre todo basados en la situación del tráfico en el momento de la consulta.



Figura 4.11. Paradas propuestas para la distribución de información en tiempo real
Fuente: Propia

4.2.1.4. Prioridad semafórica

A pesar de que la prioridad semafórica no es propiamente parte de un Sistema Avanzado para el Transporte Público, sería conveniente tenerlo en cuenta como parte de las mejoras al Sistema Pumabús que se pueden implantar.

Una de las principales ventajas de dar prioridad de paso a los autobuses, sería el cumplir los horarios de llegada a las paradas.

Pero para poder brindar esta ventaja o prioridad, se requiere que se hagan algunas adecuaciones en los sistemas de control de tráfico para que los vehículos Pumabús sufran menos demoras cuando lleguen a las intersecciones semaforizadas dentro de Ciudad Universitaria.

Es importante recordar que el sistema de control de tráfico es el encargado de “gestionar y sincronizar los semáforos de manera eficiente, sencilla y segura, utilizando las últimas tecnologías para controlar y configurar cada semáforo” (Sistema de Control de Tránsito, 2017).

De acuerdo con la Agencia Universitaria de Noticias (2009), dentro de Ciudad Universitaria desde el año 2009 se decidió instalar un sistema de semáforos que cubre 17 de las intersecciones más problemáticas de la zona.

Esto formó parte de un conjunto de estrategias enfocadas a la reducción de los problemas de movilidad que comenzaban a surgir en C.U. (Agencia Universitaria de Noticias, 2009).

Sin embargo, aunque actualmente los autobuses Pumabús ya cuentan con un carril exclusivo, los semáforos que se encuentran en funcionamiento no están listos para brindarles la prioridad de paso.

Para esto, es necesario que se dé una comunicación entre los autobuses y los controladores de los semáforos, para que estos al recibir la solicitud de paso, sean capaces de hacer algunas adaptaciones a las fases que ya tienen programadas y así permitirles a las unidades Pumabús continuar su camino, pero sin comprometer tampoco la seguridad de los demás usuarios de las vialidades.

De hecho, lo ideal sería que las prioridades estén clasificadas en varios niveles, para así hacer una diferenciación de acuerdo al nivel de retraso que presenten los autobuses.

Además, los controladores también deben ser capaces de enviar información sobre el funcionamiento del semáforo al centro de control.

En la Figura 4.12 se muestran a grandes rasgos los elementos y flujos de información que se deben dar para el correcto funcionamiento del sistema de control de tránsito.

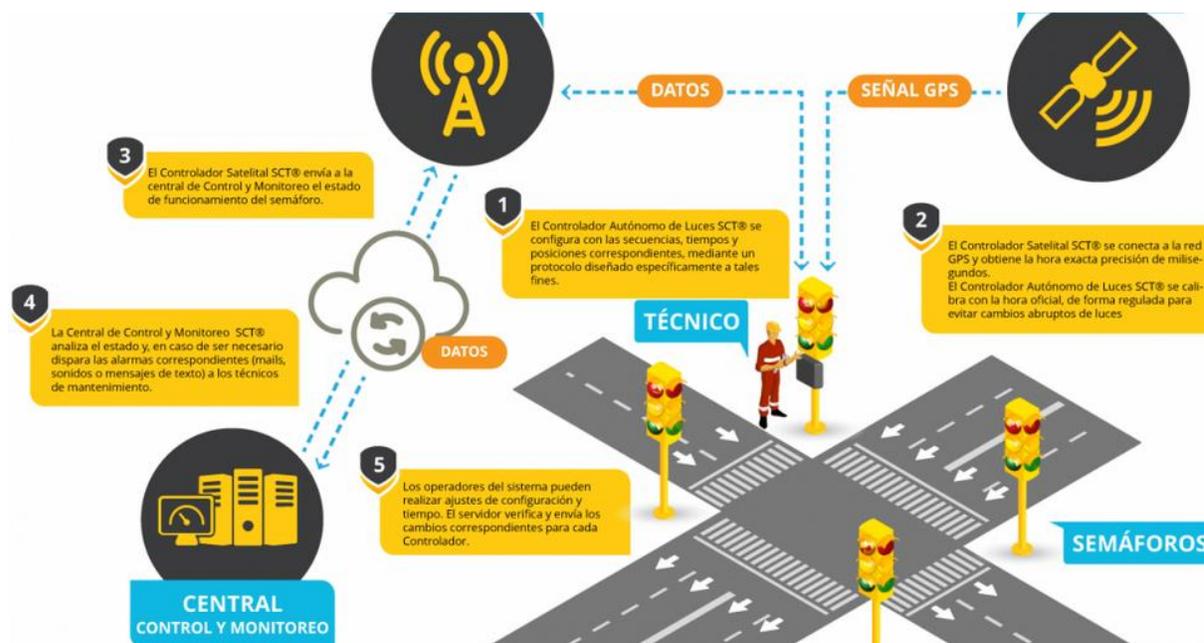


Figura 4.12. Sistema de control de tránsito
Fuente: (SCT Vial, 2017)

4.2.1.5. Sistemas de comunicación

Dentro de Ciudad Universitaria, en lo referente a las comunicaciones en distancias cortas se utiliza fibra óptica de tipo multimodo (Guerra, 2016).

De hecho, fue en 1989 cuando se “llevó a cabo el primer enlace para conectar las redes de área local, [...], utilizando enlaces de fibra óptica” (Centro de Información de Red UNAM, 2012).

Y a partir de ese momento se siguió desarrollando la infraestructura de comunicaciones de fibra óptica dentro de C.U. (Centro de Información de Red UNAM, 2012).

Se tienen instalados alrededor de 458 kilómetros de fibra óptica, “interconectando los principales centros de cómputo del área de la investigación científica con las computadoras de los grandes centros de cómputo y con el enlace satelital” (Guerra, 2016).

Es por eso que el sistema de comunicación propuesto para la implantación del Sistema Avanzado para el Transporte Público es fibra óptica.

A pesar de que no se cuenta con información exacta sobre los lugares por los que pasa la red de fibra óptica dentro de Ciudad Universitaria, en la Figura 4.13 se presenta la infraestructura que se tiene, esto con la finalidad de mostrar los edificios más cercanos a las paradas Pumabús donde se propone instalar pantallas informativas, para realizar desde esos puntos las conexiones de fibra óptica necesarias.

En la Figura 4.14 se muestra la parada Metro C.U., marcada con un triángulo rojo, donde se aprecia que los edificios más cercanos son: el Bicicentro perteneciente al servicio de transporte Bicipuma (círculo negro) y el Hospital Veterinario UNAM-Banfield (círculo azul).

Por su parte, en la Figura 4.15, se tiene la parada Posgrado de Ingeniería (triángulo rojo), como se puede apreciar, existen varios edificios cercanos a la parada en cuestión, desde los cuales se puede establecer la conexión sin problemas, uno de ellos es la Biblioteca Enrique Rivero Borrell (representada con un círculo negro).

Mientras la parada Metrobús C.U. (triángulo rojo), también presentada en la Figura 4.15, se encuentra localizada cerca de los edificios de la Escuela Nacional de Trabajo Social (círculo negro).

En la Figura 4.16, se aprecia que en la parada de Ingeniería (triángulo rojo) no habría mayor problema ya que se encuentra cerca de algunos de los edificios principales de dicha Facultad, como el Edificio B de salones (círculo negro).

En la misma Figura 4.16, se muestra la parada de Medicina (triángulo rojo), misma que tiene como inmueble más próximo el Edificio de Investigación (círculo negro).

La parada dónde se podrían presentar más inconvenientes es Psicología (triángulo rojo), ya que no está ubicada a las afueras de los edificios de esta Facultad, sino en la acera de enfrente, de cualquier manera, las edificaciones más cercanas son: Biblioteca Central (círculo negro), el Auditorio Justo Sierra perteneciente a la Facultad de Filosofía y Letras (círculo rojo) o incluso el Edificio A de la Facultad de Psicología (círculo azul).

Finalmente, en la Figura 4.17, se observa que cerca de la parada de Derecho (triángulo rojo) se encuentra la Biblioteca Antonio Caso (círculo negro) o el Edificio B de la Facultad de Economía (círculo azul).

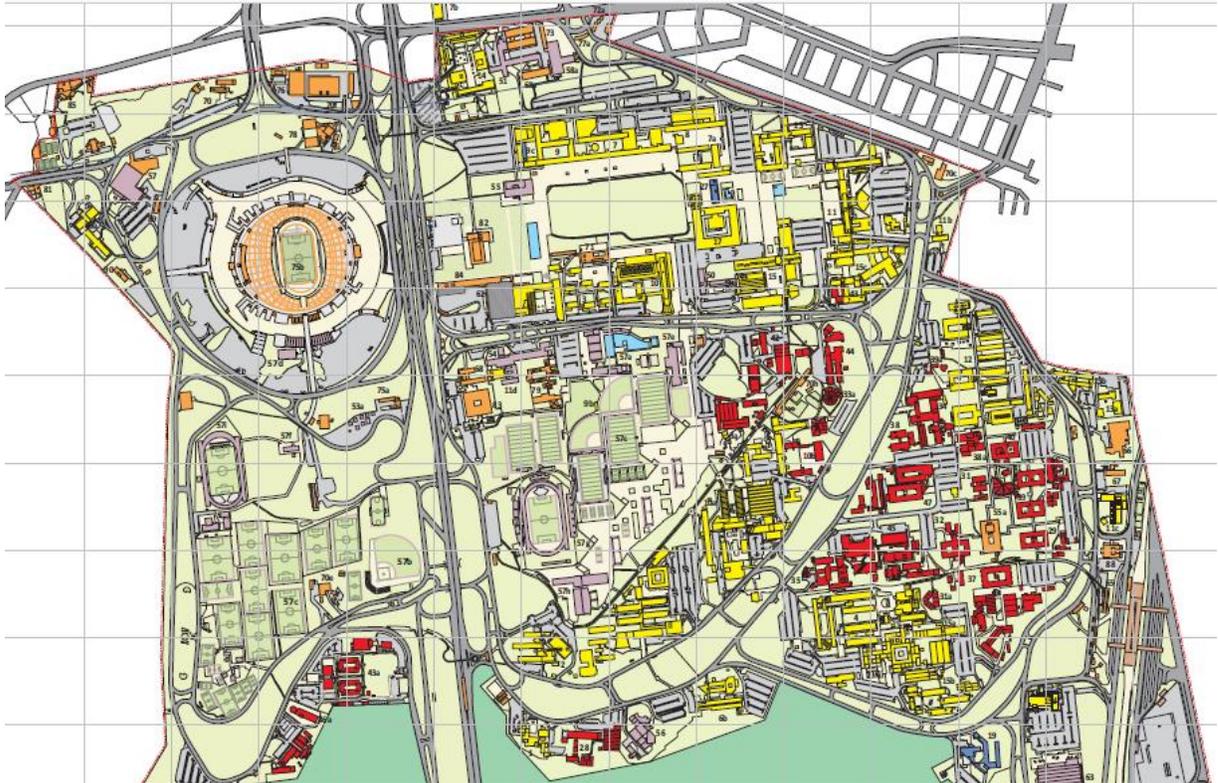


Figura 4.13. Ciudad Universitaria
Fuente: (Secretaría Universitaria UNAM, 2017)

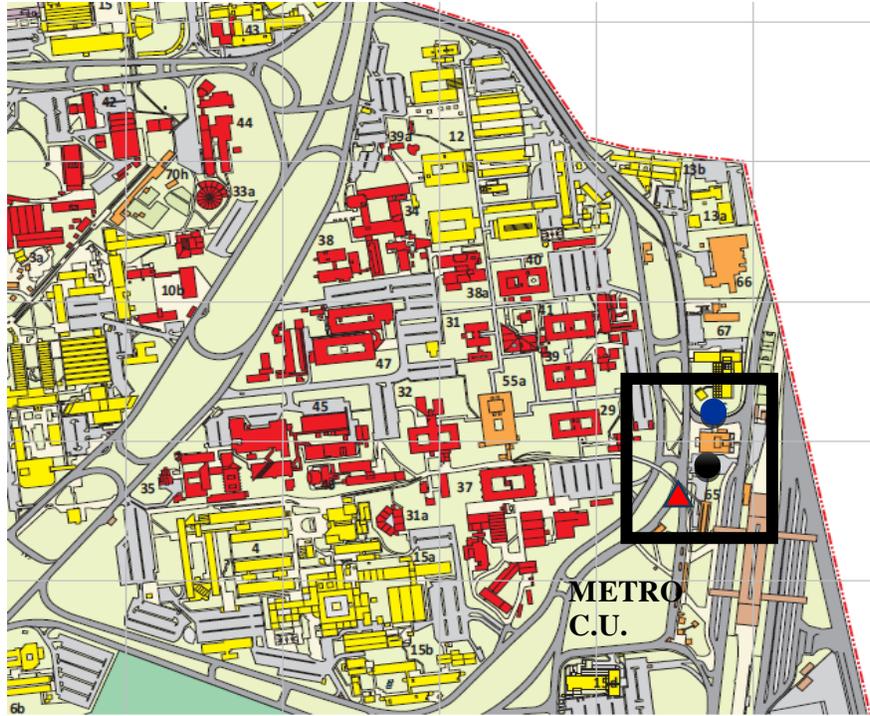


Figura 4.14. Parada Metro C.U.
Fuente: (Secretaría Universitaria UNAM, 2017)

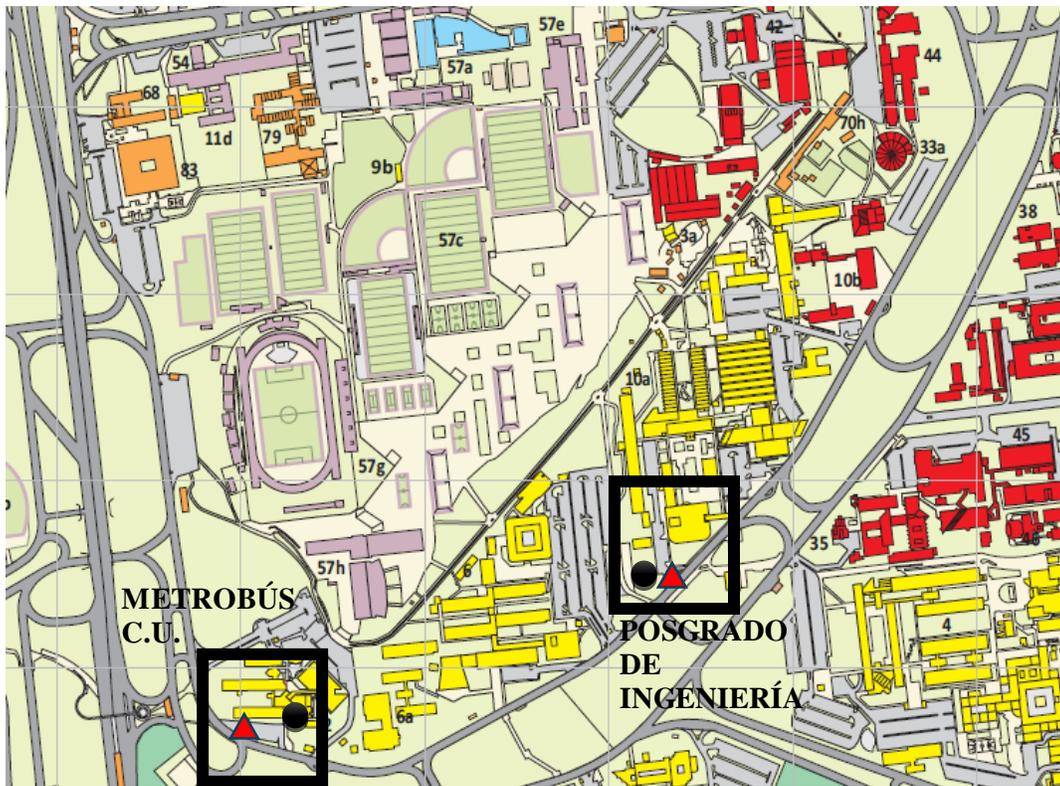


Figura 4.15. Paradas Metrobús C.U. y Posgrado de Ingeniería
Fuente: (Secretaría Universitaria UNAM, 2017)

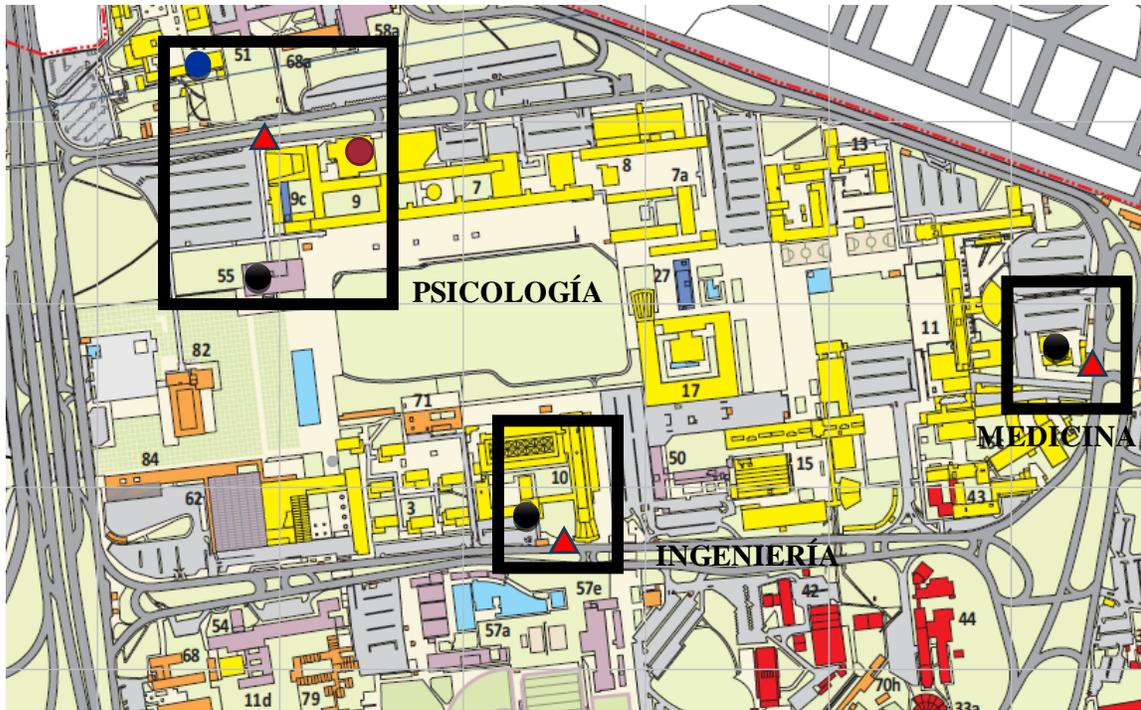


Figura 4.16. Paradas Psicología, Ingeniería y Medicina
 Fuente: (Secretaría Universitaria UNAM, 2017)

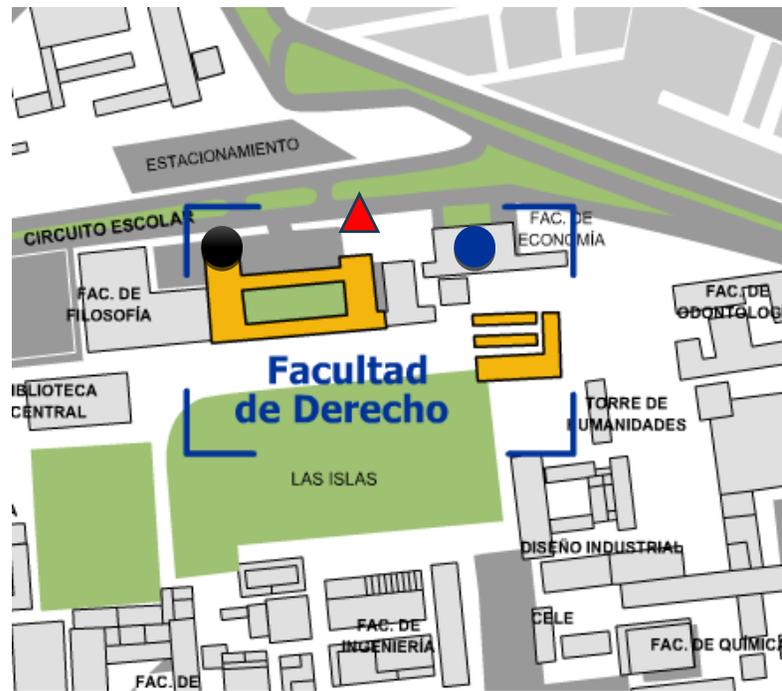


Figura 4.17. Parada Derecho
 Fuente: (Secretaría Universitaria UNAM, 2017)

4.2.2. Software

Existen dos opciones viables al momento de hacer la elección del *software* que se utilizará para el Sistema Avanzado para el Transporte Público, la primera de ellas consiste en adquirir alguno que ya haya sido desarrollado anteriormente y hacer las adecuaciones necesarias para la zona en cuestión.

La segunda alternativa es crearlo desde el inicio, la principal ventaja es que, aunque se tendría que comenzar desde cero, al final se contaría con un *software* propio, es decir, que cumpliría con todas las características que requiera el proyecto.

Se deben analizar diversos factores para determinar qué opción es la mejor, enseguida se presentan los principales aspectos que debe cumplir el *software*, independientemente de la decisión que se tome.

4.2.2.1. Predicción de tiempos de llegada de los autobuses a las paradas

Como se explicó en la Sección 3.4.1, existen diferentes modelos para la predicción de los tiempos de llegada de las unidades de transporte público a las paradas, muchos de ellos utilizan solamente información histórica, para este caso, este tipo no sería el adecuado, se requiere uno que sea capaz de usar la información en tiempo real que se va recolectando.

Es por esto que el tipo de modelos de aprendizaje, en especial, las redes neuronales, resultan ser una buena opción.

Se recomienda utilizar una red neuronal con su arquitectura típica de tres capas, la de entradas o insumos, la oculta y la de salidas.

En la Figura 4.18 se muestran los pasos básicos a seguir para el desarrollo de un modelo de predicción de tiempos de llegada de los autobuses, primero es necesario contar con datos que servirán como insumos, se debe tener cuidado con ellos, ya que datos erróneos ocasionarán problemas al momento de introducirlos al modelo, además de generar salidas incorrectas.

Después de la elección del modelo a utilizar, se lleva a cabo una calibración de los parámetros del mismo y, se evalúan los resultados que genera con la finalidad de verificar su exactitud, enseguida se explica con mayor detalle cada uno de los pasos a seguir.

Para hacer una adecuada predicción del tiempo de llegada de un autobús a la siguiente parada, primero se requiere determinar la localización exacta de la unidad, para eso es que se instalan los dispositivos GPS en los autobuses.

Es así que los datos generados a partir de estos dispositivos son enviados al centro de control, donde son almacenados en un servidor.

Sin embargo, como se mencionaba, éstos tienen que someterse a un proceso de limpieza, no todos los datos recibidos necesariamente serán usados para los posteriores cálculos, deben pasar por un filtro, que es el validador de datos GPS, encargado de eliminar aquello que no sirva y permitir que el algoritmo utilice solamente lo que requiere para brindar los resultados esperados.

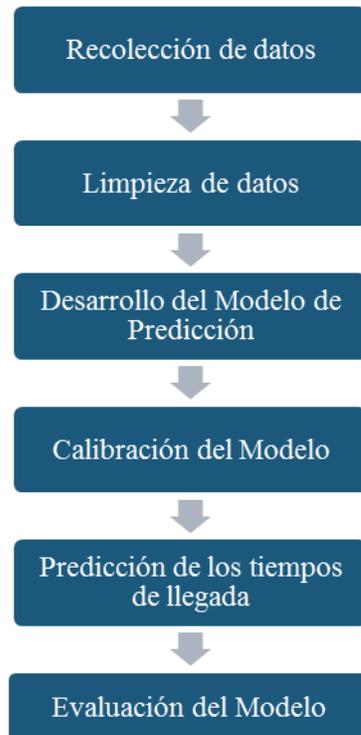


Figura 4.18. Procedimiento para la realización de un modelo de predicción
Fuente: (Hee, 2004)

Después, debe existir un servidor GPS en donde se hace el proceso de geocodificación, es decir, el par de coordenadas recibidas por cada autobús se transforman en una ubicación sobre la superficie terrestre (Environmental Systems Research Institute, 2016).

Así, es posible monitorear los autobuses que se encuentren activos y verificar su ubicación en los arcos de la red vial, una vez que se cuenta con todo esto, se está en posibilidad de hacer los cálculos necesarios para determinar el tiempo que les tomará a los autobuses arribar a las siguientes paradas.

Cabe señalar que, además de los datos en tiempo real que se están obteniendo, también se hace uso de datos históricos, éstos sirven para hacer el proceso de entrenamiento del modelo, la red neuronal en este caso.

Parte de la información histórica se utiliza para hacer la calibración del modelo y otra parte para hacer la evaluación del mismo, es decir, verificar que los resultados obtenidos de la calibración sean cercanos o iguales a la realidad.

Alessandrini (2015) sugiere que el 75% de la información con la que se cuente, se utilice en el proceso de entrenamiento y el 25% restante sea usado para la verificación.

Mientras Gurmú y Fan (2014) y Johar, et al., (2016), recomiendan un 70% para entrenamiento y 30% para verificación

Como se puede apreciar, una de las etapas más importantes es la elección de una función de entrenamiento de la red neuronal, existen diferentes y lo ideal es hacer pruebas y seleccionar la que ofrezca mejores resultados.

Es importante recordar que se requiere una función de entrenamiento y una de aprendizaje, ambas son procedimientos matemáticos que se utilizan para ajustar automáticamente los pesos sinápticos en la red neuronal (Gurmu y Fan, 2014).

La función de entrenamiento es la encargada de brindar un algoritmo que afecte a todos los pesos sinápticos que se utilizarán en la red neuronal. Mientras por su parte, la función de aprendizaje se puede aplicar a los pesos de manera individual (Gurmu y Fan, 2014).

Es por eso que también se selecciona una función de aprendizaje, para lo cual se puede seguir un procedimiento similar, es decir, hacer pruebas con diferentes opciones y elegir la que mejor se ajuste.

Una red neuronal se entrena para que los insumos lleven a conseguir salidas o resultados específicos y después se hacen ajustes con base en comparaciones entre el resultado que brinda el modelo y el resultado objetivo que se busca obtener.

Una manera de hacer una evaluación del modelo es usando el método del Error porcentual absoluto medio (MAPE: Mean Absolute Percentage Error), que permite medir el error en los cálculos, pero en términos porcentuales.

“Se calcula como el promedio de las diferencias absolutas entre los valores pronosticados y los reales y se expresa como porcentaje de los valores reales” (Assis, 2014).

En la Ecuación (29) se presenta la fórmula de error porcentual absoluto medio:

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{Y_t^P - Y_t^{Obs}}{Y_t^{Obs}} \right| \quad (29)$$

donde:

Y_t^P = El tiempo de viaje resultado de la predicción desde la última parada donde estuvo el autobús hasta la parada donde se mostrará información.

Y_t^{Obs} = El tiempo de viaje observado entre los mismos puntos

n = número de conjuntos de prueba

De manera general, mientras más pequeño sea el error porcentual absoluto medio, mejor será el algoritmo de predicción.

Como la información en tiempo real es generada de manera constante, los modelos pueden ser reentrenados en el mismo intervalo de tiempo que los datos son recibidos, pero ésta no es realmente la mejor opción, lo recomendable es establecer un intervalo de tiempo determinado para hacer la actualización.

Esto quiere decir que, se hacen las predicciones utilizando los parámetros pre-calibrados, mismos que son actualizados cada cierto tiempo, tal como se muestra en la Figura 4.19, donde se señala que a pesar de que los datos están siendo recibidos cada “ t ” unidades de tiempo, el proceso de actualización de los parámetros se hace cada “ u ” unidades de tiempo y que, $u \geq t$.



Figura 4.19. Proceso de actualización de parámetros en el modelo de predicción en tiempo real
Fuente: (Hee, 2004)

En la Figura 4.20 se presenta el ejemplo específico de la ruta 1 del Sistema Pumabús, el autobús de color rojo señalado debe contar con un dispositivo GPS para poder hacer su correcta localización.

La información que este dispositivo enviará al centro de control consiste en: un ID que permitirá reconocer la unidad de Pumabús desde la cual se envían los datos, hora, longitud y latitud, un ejemplo del tipo de datos que se recibirán se muestra en la Figura 4.21.

Es así que la información recibida pasará por el validador de datos GPS, donde se hace una depuración y posteriormente, se almacenará en el centro de control, donde quedará almacenada en la base de datos históricos.

El mismo procedimiento se llevará a cabo con los datos recibidos de cada una de las unidades Pumabús.

Una vez que se tienen los datos validados, será posible geocodificar la posición del autobús en el centro de control y determinar en qué arco de la red vial de Ciudad Universitaria se encuentra.

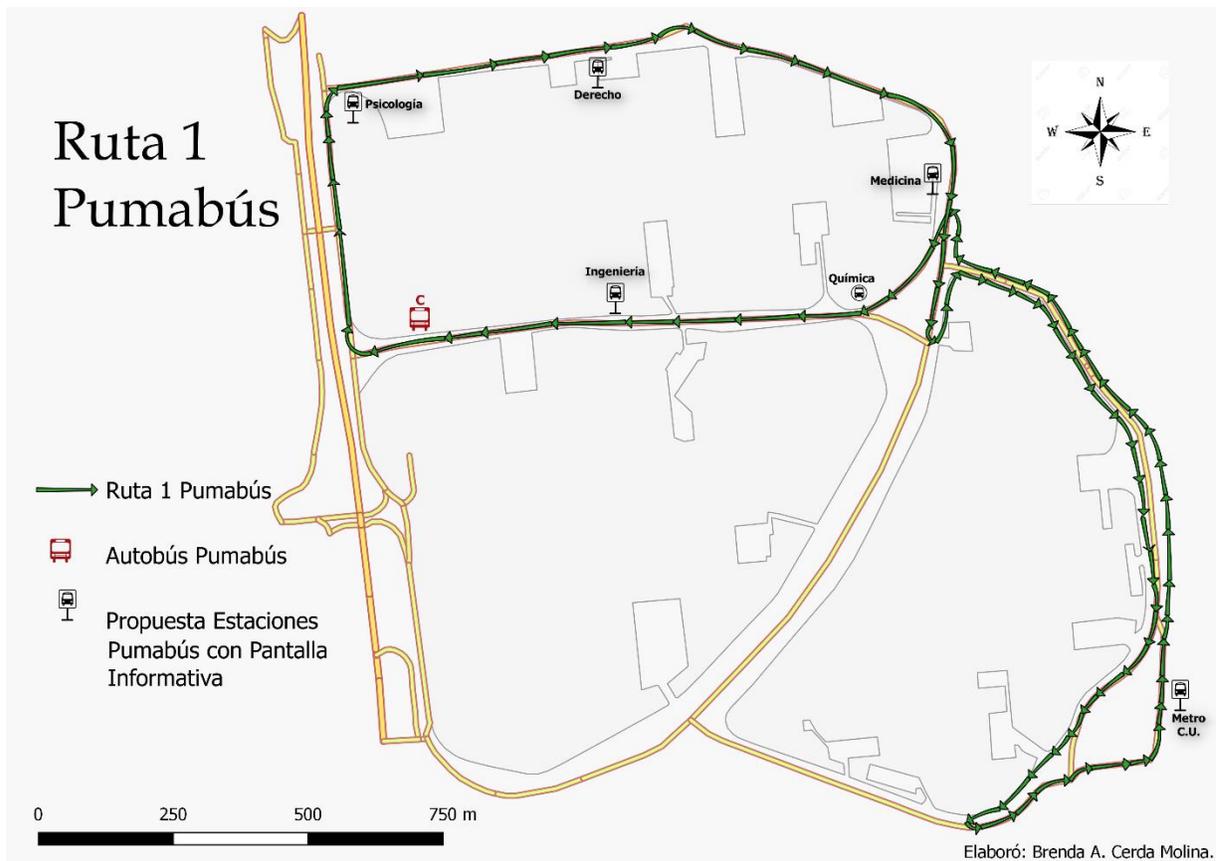


Figura 4.20. Ejemplo predicción de tiempos de llegada de los autobuses a las paradas Pumabús.

**Ruta 1
Fuente: Propia**

icon	Longitud	Latitud	Hora
	-99.1749069	19.3284886	08:30:48
	-99.1784319	19.3321387	08:31:03
	-99.1807067	19.3309122	08:31:53
	-99.1832799	19.3308259	08:32:11
	-99.1843611	19.3307251	08:32:49

Figura 4.21. Ejemplo de información enviada por los dispositivos GPS

Fuente: Propia

De manera general, de acuerdo con lo presentado en la Figura 4.20, se requiere presentar en la parada de Psicología la hora en la que llegará el siguiente autobús “A” (marcado con color rojo).

A grandes rasgos, los datos que se necesitan son: la hora en la que salió el Pumabús de la parada de Ingeniería, el tiempo que toma ir de Ingeniería a Psicología y la ubicación actual del autobús con su hora correspondiente, tal como se muestra en la Ecuación (30).

$$TT_{CP}^A = TT_{IP}^A - TT_{IC}^A \quad (30)$$

donde:

TT_{CP}^A = Tiempo requerido por el autobús A para ir del punto C a la parada de Psicología

TT_{IP}^A = Tiempo requerido por el autobús A para ir de la parada de Ingeniería a Psicología

TT_{IC}^A = Tiempo requerido por el autobús A para ir de la parada de Ingeniería al punto C

En este caso, considérese, tomando los datos de la Figura 4.21, que el autobús A salió de la parada de Ingeniería a las 08:30:48 horas y la última vez que envió su posición fue a las 08:32:49, cuando se encontraba en un punto intermedio entre Ingeniería y Psicología, al cual se le denominará “C”, por lo tanto, se sabe que lleva 2:01 minutos de viaje.

Por otra parte, la distancia que existe entre las paradas de Ingeniería y Psicología es de aproximadamente 950 metros y de acuerdo con algunos recorridos que se hicieron en la ruta 1, la velocidad promedio de viaje en un Pumabús es de 14 km/hora.

Con base en la Ecuación (31) y la (32), al dividir la distancia que separa las paradas entre la velocidad promedio del Pumabús, se obtiene que el tiempo promedio de viaje es de 4:04 minutos.

$$V = \frac{d}{t} \quad (31)$$

$$t = \frac{d}{V} = \frac{0.95 \text{ km}}{14 \text{ km/hr}} = 0.0678 \text{ hr} = 4:04 \text{ minutos} \quad (32)$$

donde:

V= Velocidad promedio de viaje (km/hora)

d= distancia (km)

t=tiempo (hr)

Por lo tanto, al autobús A le faltan 2:03 minutos para alcanzar la localización de la parada Psicología, es así como se puede establecer que la hora estimada de llegada serán las 08:34:53 horas.

Como se puede apreciar, los insumos que se utilizan para hacer los cálculos son: la hora de salida del autobús de la parada anterior, que en el ejemplo fue Ingeniería, la velocidad de circulación y la distancia entre paradas.

En la Ecuación (33) se muestra la función de manera general.

$$Y=f(S_{1A}, V_A, d_{12}) \quad (33)$$

donde:

Y = Hora de llegada del autobús "A" a la parada en cuestión

S_{IA} = Hora de salida del autobús "A" de la parada anterior

V_A = Velocidad de circulación del autobús "k"

d_{I2} = Distancia entre las paradas

También sería conveniente incluir el tiempo de espera de los autobuses debido a las intersecciones semaforizadas, tomando en cuenta que no contarán aún con prioridad semafórica, por lo que en ocasiones tendrán que detenerse hasta que cambie la fase.

Para poder hacer uso del modelo se debe hacer su entrenamiento, para lo cual se requiere utilizar una función, entre las más utilizadas se encuentra el algoritmo Bayesian Regulation Backpropagation o el algoritmo de Levenberg-Marquardt, que suelen ofrecer buenos resultados.

El modelo calibrado contará con algunas capas ocultas, según Hornik et al. (1989), basta con dos capas ocultas para que una red neuronal pueda representar bien cualquier relación no lineal entre variables.

Y por su parte Heaton (2008), propone que el número óptimo de neuronas por capa puede ir desde una sola neurona, hasta el doble del número de insumos o variables de entrada.

Después se procede a hacer la selección de la función de aprendizaje, que como se mencionó, también se cuenta con varias opciones para elegir.

Finalmente, se debe hacer la evaluación del modelo, en la Ecuación (29) antes mencionada, se presenta la fórmula del error porcentual absoluto, uno de los métodos más utilizados para medir el error en los cálculos generados.

4.2.2.2. Optimización de la operación

Al igual que para el *software* de predicción de los tiempos de llegada de los autobuses a las paradas, en el caso de la optimización de la operación, se pueden encontrar diferentes modelos que sirven para cumplir este objetivo.

Sin embargo, se debe buscar uno que sea capaz de incluir la información en tiempo real generándose gracias a los dispositivos GPS instalados en las unidades y los contadores automáticos de pasajeros.

Cabe señalar que, con este *software* no se pretenden cambiar radicalmente todas las rutas que ofrece el Pumabús, simplemente hacer una optimización.

Es por eso que, un punto importante al momento de hacer la elección de un modelo es lo referente a los objetivos que se buscan cumplir, muchas veces se contraponen lo que desea el operador del sistema y lo que busca el usuario, por lo que se presenta un problema multiobjetivo.

En la Figura 4.22 se presenta a grandes rasgos el procedimiento requerido para llevar a cabo una optimización multiobjetivo y enseguida se explican los pasos principales.

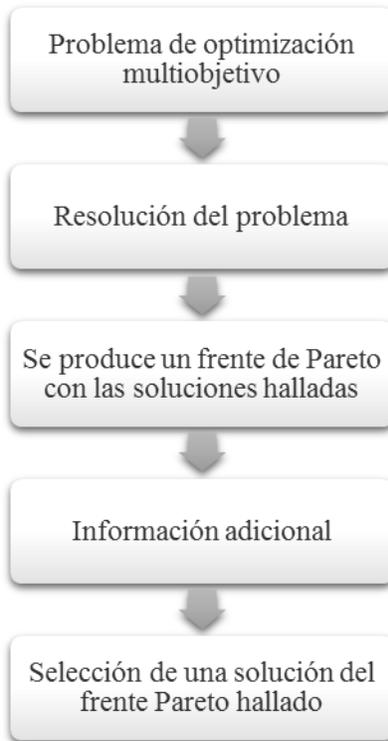


Figura 4.22. Método de optimización multiobjetivo
Fuente: (Mauttone et al., 2005)

Una vez que se conocen las características del sistema de transporte de pasajeros, tanto sus aspectos positivos como negativos, se está en posibilidad de establecer la función objetivo, misma que reflejará aquello en lo que se pretende mejorar.

Además, se debe contar con ciertas restricciones del problema, en las que se incluyen los límites de frecuencias (máxima y mínima), ocupación de las unidades para evitar que viajen con sobrecupo y, tamaño de la flota, entre otras.

Una vez que se tiene la función objetivo con sus restricciones se deben “hallar todas las soluciones no dominadas pertenecientes al frente de Pareto óptimo” (Mauttone et al., 2005).

Es aquí donde se requiere contar con un algoritmo para solucionar el problema, en la literatura se pueden encontrar diferentes ejemplos desarrollados por varios autores, pero de manera general, deben contar con tres componentes: construcción, evaluación y mejora de soluciones (Mauttone et al., 2005).

En la etapa de construcción, se brinda un conjunto de recorridos que a la vez tienen una frecuencia asociada y se asegura que atiendan a la demanda del sistema.

La evaluación consiste en el cálculo de la función objetivo del modelo, pero “a un costo computacional razonable” (Mauttone et al., 2005).

Y finalmente, en la etapa de mejora se analizan las soluciones arrojadas durante la construcción, ya que es posible “mejorar la calidad de la solución realizando modificaciones sistemáticas en la misma” (Mauttone et al., 2005).

La etapa de Información adicional se refiere a que una vez que se han generado las posibles soluciones, son los tomadores de decisiones, los que con base en sus conocimientos, experiencia u otros datos, determinan cuál de las opciones es la más adecuada para implantarse.

Para el caso del sistema Pumabús, antes de establecer la función objetivo es conveniente contar de antemano con la red sobre la cual se trazarán los recorridos, es decir, la red vial dentro de Ciudad Universitaria, que deberá tener los nodos que representen las paradas Pumabús que ya se tienen establecidas, además de una matriz origen-destino que plasme la demanda.

A pesar de que esta matriz se construye con información histórica, se puede estar actualizando con la información en tiempo real sobre el número de usuarios en cada una de las paradas de las diferentes rutas.

Además, se requieren también las características de las unidades Pumabús, como el tipo de vehículos y la capacidad de éstos.

En la Ecuación (34) se presenta la función objetivo propuesta basada en el trabajo desarrollado por Mahdi et al. (2014), lo que se busca es mejorar el nivel de servicio que se ofrece a los pasajeros, principalmente en lo referente a los tiempos de espera y de viaje.

Esto debido a que según los resultados obtenidos de la encuesta de satisfacción aplicada a los usuarios de Pumabús, éste es uno de los aspectos negativos que más les afecta.

Pero como los componentes de la función objetivo propuesta se encuentran en diferentes unidades, fue necesario utilizar ciertos coeficientes (c_1 , c_2 , c_3 y c_4) que le otorgan un peso específico a cada uno de ellos, que en cierta forma refleja su importancia.

Pero es importante señalar que, cambios en los valores de estos coeficientes, llevarán a obtener diferentes conjuntos de rutas óptimas.

Con la función objetivo también se busca minimizar el tamaño de la flota, es decir, brindar un buen servicio, pero sin verse en la necesidad de comprar más unidades. Esto no quiere decir que en todos los casos la solución se deba dar sin adquirir más autobuses, en ocasiones esto es necesario para mejorar el servicio, sin embargo, el modelo a utilizar cambiaría.

A su vez, la función objetivo está sujeta a ciertas restricciones, en la Ecuación (35) se encuentra la referente a los intervalos de tiempo entre salidas de los autobuses de la misma ruta.

En la Tabla 4.2 se presentan los intervalos de paso de los autobuses de las diferentes rutas de Pumabús, la información fue obtenida del trabajo realizado por Cifuentes (2016), se aprecia que los valores son demasiado grandes en algunas de las rutas, razón por la cual, es un aspecto que se consideró dentro de las restricciones.

Para establecer intervalos adecuados, existen algunas recomendaciones generales que se deben considerar, por ejemplo, el intervalo mínimo se determina dependiendo de las características del sistema, el total de pasajeros que suben y bajan de las unidades (demanda), entre otros (Vuchic, 2005).

Y si se presenta una demanda estable en el sistema, lo ideal es establecer intervalos constantes, además, se recomienda que para los intervalos se usen valores divisores de 60, como 6, 7.5, 10, 12 min, etc. (Vuchic, 2005).

Por su parte, la Ecuación (36) en donde se establece la segunda restricción, busca asegurar que la longitud de la ruta se encuentra debajo de la desviación máxima permitida con respecto a la ruta más corta entre dos paradas.

Mientras en la Ecuación (37) se limita el tema de la demanda insatisfecha, es decir, aquellos pasajeros que no pueden ser atendidos debido a diversos factores, como el sobrecupo de las unidades.

Finalmente, en la Ecuación (38) se determina que la flota vehicular requerida no debe exceder a la máxima permitida, que es el total de autobuses con los que se cuenta actualmente.

Según la Gaceta Digital UNAM (2016), el Sistema Pumabús contaba hasta 2016 con un total de 65 autobuses para dar servicio en todas rutas, sin embargo, 50 de ellos se encuentran en circulación constante, y el resto está en reserva.

Además, de acuerdo con Cifuentes (2016), en la flota vehicular total, se cuenta con 10 tipos de autobuses diferentes, cuyas capacidades varían desde los 60 hasta los 113 pasajeros en total.

Cabe señalar que esta diferencia en el tipo y capacidad de las unidades que dan servicio implicaría contar con restricciones diferentes, lo que generaría un modelo distinto para la solución del problema.

Para resolver el modelo presentado en las Ecuaciones (34) a (38), se pueden utilizar varios métodos, pero los algoritmos genéticos se han convertido en los más utilizados.

$$Z = \min (c_1 \sum_{ij \in N} WT_{ij} + c_2 \sum_{k \in BN} EH_k + c_3 UD + c_4 \sum_{k \in BN} FS_k) \quad (34)$$

$$H_{min} < H_k \quad \forall k \in PM \quad (35)$$

$$T_{ij}^k < \xi T_{ij}^{sp} \quad \forall k \in PM \quad (36)$$

$$UD_T < UD_{max} \quad (37)$$

$$\sum_{k \in BN} FS_k < FS_{max} \quad (38)$$

donde:

Z = Función objetivo asociada a la red de rutas Pumabús (PM)

WT_{ij} =Tiempo de espera de los pasajeros para ir desde una parada i hasta la parada j

EH_k =Capacidad que no se utiliza en los autobuses de la ruta k

UD = Total de la demanda que no se satisface

FS_k =Flota vehicular de la ruta k

H_k =Intervalo de los autobuses de la ruta k

H_{min} =Intervalo mínimo admisible

T_{ij}^k =Tiempo de viaje entre la parada i y la parada j en la ruta k

T_{ij}^{sp} =Tiempo de viaje entre la parada i y la parada j usando la ruta más corta

ξ =Máxima desviación permisible de una ruta programada con respecto a la ruta más corta

UD_{max} =Máxima demanda permisible que no se satisface

FS_{max} =Máxima flota vehicular permisible

c_1, c_2, c_3 y c_4 = Pesos de los términos de la función objetivo

Tabla 4.2. Intervalos de paso de los autobuses de las Rutas Pumabús

Ruta	Intervalos (minutos/autobús)			
	06:00-09:00	09:00-15:00	15:00-19:00	19:00-22:00
Ruta 1	17.0	27.5	17.9	18.9
Ruta 2	10.3	18.1	14.1	11.8
Ruta 3	12.6	29.7	27.4	21.6
Ruta 4	18.5	38.4	23.8	34.0
Ruta 5	13.9	29.1	18.5	19.9
Ruta 6	39.7	42.0	41.5	56.9
Ruta 7	21.7	24.0	23.2	25.2
Ruta 8	24.1	28.6	27.1	30.4
Ruta 9	28.6	33.6	32.3	31.9
Ruta 10	60.0	21.0	60.0	22.1
Ruta 11	60.0	29.5	60.0	120.0
Ruta 12	60.0	23.8	30.0	22.9

Fuente: (Cifuentes, 2016)

4.2.2.3. Prioridad semafórica

El *software* requerido para brindar prioridad semafórica forma parte de un sistema adaptativo de control del tránsito.

Este tipo de sistemas cuentan con la capacidad de manejar información en tiempo real para hacer ajustes a los ciclos semafóricos dependiendo de la situación del tránsito en ese momento.

Es cierto que ya cuentan con un conjunto de parámetros predeterminados, sin embargo, es gracias a su capacidad de incorporar información en tiempo real, que pueden hacer las modificaciones requeridas.

Es así que este tipo de algoritmos también buscan optimizar una función objetivo, por ejemplo, en algunos casos se desea minimizar los tiempos de viaje y las demoras de algunas unidades como las de transporte público o de servicios de emergencias, mientras otros modelos se enfocan en maximizar el uso de la red vial.

En el Capítulo 3, se mencionaba el *software* SCATS, que busca maximizar la utilización de las vialidades y, SCOOT cuyo objetivo es minimizar las demoras en las intersecciones semaforizadas y la congestión (Ahmed y Hawas, 2015).

Sin embargo, como cualquier modelo, éstos requieren ciertos insumos para un correcto funcionamiento, por lo que, para hacer cambios de fase con base en la demanda, se debe contar con detectores instalados en las vialidades, para determinar la cantidad de vehículos en cada uno de los accesos a la intersección y establecer los cambios necesarios.

Además de estas características, el *software* que se instale debe contar con un módulo específicamente enfocado en la prioridad semafórica, que permita que se dé la comunicación con el autobús que solicita la preferencia de paso.

Esta prioridad puede ser condicionada o no, la forma no condicionada consiste en brindar preferencia a la unidad de transporte público en cuanto se aproxime a la intersección, sin tomar en cuenta ningún otro elemento. Mientras la condicionada, que es la opción más recomendable, solamente brinda prioridad a los autobuses basándose en un conjunto de reglas, la más utilizada es solo otorgarle prioridad a la unidad, si ésta se encuentra retrasada según la predicción de la hora de llegada a la siguiente parada.

Y es que el hecho de brindar prioridad a los autobuses de transporte público siempre que así se solicite, en cierto momento puede llegar a afectar a todos los demás usuarios que se ven sujetos a estos cambios de fases.

En la Figura 4.23 se presenta la arquitectura con la que cuenta un sistema de este tipo, como se puede apreciar, se requiere que cuenten con diferentes módulos especiales para brindar ciertos tipos de servicios, como el de prioridad semafórica. También se cuenta con el módulo del estado del tránsito, que es el que se basa en la demanda en las vialidades para determinar cambios necesarios en las fases semafóricas. Finalmente, el módulo de incidentes se debe activar cuando ocurre algún tipo de percance que genera obstrucciones o alteraciones en la circulación normal de la red vial.

Una vez que se hace uso de módulo requerido, si no existe ninguna otra solicitud, el sistema regresa a su estado normal de fases semafóricas, hasta el momento en que se vuelva a requerir algún cambio.

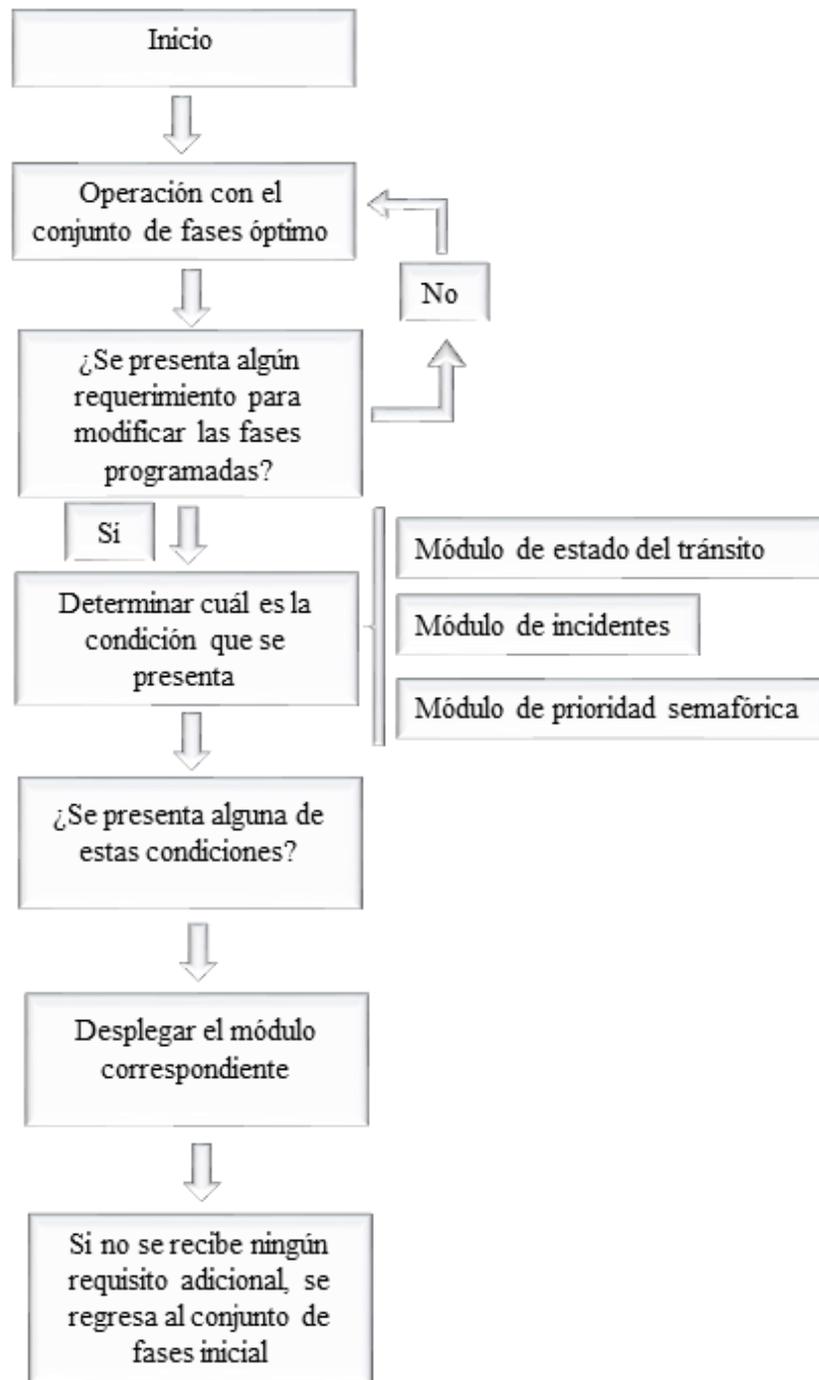


Figura 4.23. Arquitectura de un sistema de control
Fuente: (Ahmed y Hawas, 2015)

4.2.3. Centro de control

Para este caso, en el centro de control solamente se recopilará la información proveniente de los autobuses del Sistema Pumabús, para después de analizarla, presentarla a los usuarios a través de las pantallas informativas en las paradas seleccionadas o a través de aplicaciones móviles.

Por lo que centro de control que se requiere no es demasiado grande, pero para determinar su tamaño, el personal requerido, así como *hardware* y *software*, es necesario tener claros los objetivos de la sala de control, la información que se recibirá y los procesos que se llevarán a cabo en el lugar (Ponsa y Granollers, s.f.).

En este sentido, se puede decir que cada centro de control es único, ya que se deben hacer las adecuaciones requeridas dependiendo de las necesidades técnicas y de los operadores que ahí laborarán (Gesab, 2017).

Según la Gaceta Digital UNAM (2016), Pumabús contaba hasta 2016 con 65 autobuses, 50 de los cuales se encuentran en circulación constante, este número sirve para conocer la cantidad de vehículos que se deben rastrear.

Por otra parte, el Sistema Pumabús no funciona las 24 horas ni los 7 días de la semana, solamente operan de 6:00 a 22:00 horas de lunes a viernes, los sábados y domingos se modifican los horarios y no todas las rutas están en servicio.

Esta información es relevante debido a que es un aspecto que se debe considerar al momento de la elección de los equipos a instalar.

Para centros de control pequeños, como el de este caso, las pantallas mural que se recomienda instalar son de LCD, es importante señalar que, aunque suelen tener menor vida útil que las pantallas LED, los equipos se pueden apagar y al contar con tiempo de reposo, ya que no se necesita que estén en funcionamiento las 24 horas del día, presentan un buen rendimiento y duración (Gesab, 2017).

En la Figura 4.24 se muestra un ejemplo del tipo de pantalla recomendada, a pesar de que en la figura se muestra la unión de cuatro dispositivos de este tipo, para un centro de control, para el Sistema Pumabús, uno es suficiente.

En cuanto al aspecto de los puestos de control, para el centro de control Pumabús se sugieren solamente dos, para que el mismo número de personas se encarguen del monitoreo del funcionamiento del sistema de transporte en general y sean capaces de resolver cualquier problema que se llegue a presentar.

Así como mantenerse en comunicación con los choferes de los autobuses en caso de que se requiera actuar ante algún contratiempo.

Cada puesto de control debe contar con mínimo un monitor, un panel de enchufe para los accesorios que se requieren, como los audífonos diadema, además de un teléfono o radio para comunicarse con otros integrantes del equipo o a alguna dependencia externa de ser necesario.

En la Figura 4.25 se muestra un diseño de un puesto de control con algunos otros elementos relacionados con la ergonomía explicada en la Sección 3.9.6.

Pero también es necesario contar con un espacio para una persona más, que se encargue de la planificación del Sistema Pumabús, que sea capaz de analizar los datos que se obtengan gracias a los equipos que se instalen y tome decisiones para mejorar el servicio que se brinda a los usuarios.

Por ejemplo, gestionar el número de autobuses destinados a cada ruta, la modificación, eliminación o adición de rutas, operación en horas pico, etc.

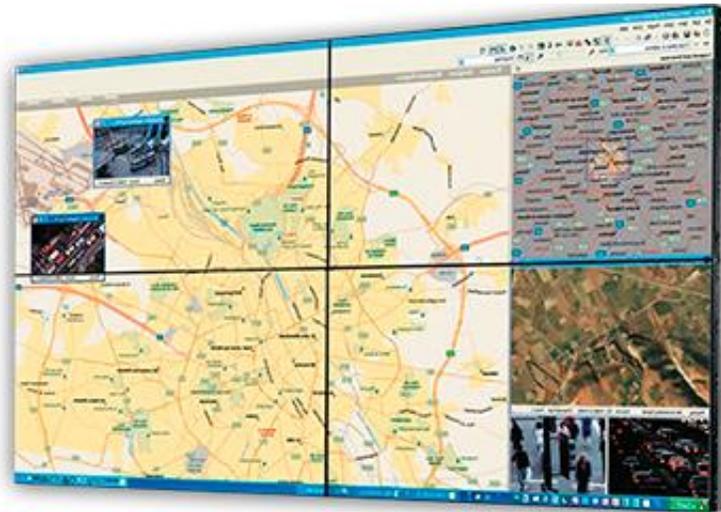


Figura 4.24. Pantallas murales LCD
Fuente: (Proyectos y Control SAC, 2014)



Figura 4.25. Puesto de control
Fuente: (Actea ATC, 2017)

4.3. COMPONENTE HUMANO

Para lograr que se dé el adecuado funcionamiento del Sistema Avanzado para el Transporte Público, es necesario contar con un equipo de trabajo multidisciplinario.

Como se ha visto hasta ahora, se requiere de la participación de varios profesionistas que se complementen para brindar soluciones innovadoras.

Enseguida se explican los principales perfiles del grupo de expertos que deberían formar parte del grupo de trabajo para la implantación exitosa de un SATP en Ciudad Universitaria.

Primero, dentro del centro de control se debe contar con personas que se encarguen del monitoreo constante de las unidades Pumabús, que verifiquen que se sigan las rutas e itinerarios y sean capaces de resolver los problemas que se puedan llegar a presentar en el día a día de la operación del Sistema Pumabús.

También es necesario contar con otra persona encargada de la planificación como tal, de proponer los cambios pertinentes para la mejora en la calidad del servicio que se ofrece a los usuarios, lo ideal es que sea una persona con conocimientos sobre Ingeniería de Transporte. Pero esto no es suficiente, también es necesario que domine el tema de los Sistemas Inteligentes de Transporte y las Tecnologías de la Información y Comunicación.

Dentro del equipo de trabajo, es importante tener a un profesionista en la rama de las Telecomunicaciones, que cuente con conocimientos en “electrónica, que es la base de todos los sistemas de información” (CODITEL, 2011), además de las comunicaciones y la telemática.

Por otra parte, para el aspecto del *software*, será necesario contar con expertos en el área de Investigación de Operaciones.

La Investigación de Operaciones es una rama de las matemáticas aplicadas que proporciona conocimientos que “ayudan en el proceso de toma de decisiones en sistemas complejos a través del análisis y con el uso de modelos matemáticos, con la finalidad de mejorar su funcionamiento” (Departamento en Ingeniería de Sistemas, 2016).

A la vez se requieren profesionistas del área de las Ciencias de la Computación, ellos cuentan con conocimientos teóricos y habilidades de programación, además pueden realizar análisis, diseño y construcción de sistemas de *software* complejos (UNAM, 2011). En específico, expertos en ingeniería de *software*, quienes cuentan con conocimientos sobre métodos y técnicas para “desarrollar y mantener *software* de calidad que resuelven problemas de todo tipo” (EcuRed, 2005).

4.4. PROCESO DE IMPLANTACIÓN

Un aspecto muy importante al que en ocasiones se le deja de lado, es el seguimiento de un proceso para la implantación de un SATP.

En la Figura 4.26 se presentan algunos pasos básicos que se deben tomar en cuenta para lograr una adecuada implantación.

Dentro de la etapa del Análisis Previo, se debe comenzar con un diagnóstico de la situación actual del Sistema Pumabús, esto ya se realizó en apartados anteriores dentro de esta tesis, principalmente a través de las encuestas de satisfacción aplicadas a los usuarios.

Lo que se logró, fue identificar los principales problemas a los que se les debe dar solución para brindar un mejor servicio.

Una vez hecho esto, es necesario reunir a un grupo de distintos profesionistas con perfiles bien definidos, cada uno de los cuales se encargará de la parte en la que se especializa para finalmente lograr el funcionamiento del SATP.

Es también durante esta etapa, cuando se identifica la información que ya se tiene disponible y, en su caso, aquella que será necesario generar para el proyecto, además de verificar con qué elementos (*hardware y/o software*) se cuenta y qué hace falta.

A la vez, es importante hacer una evaluación de riesgos, ya que proyectos de este tipo suelen presentar ciertas dificultades en su desarrollo, sobre todo en el aspecto de los sistemas de comunicación y la compatibilidad de los equipos a utilizar.

Y es que en México aún no existe una arquitectura SIT que provea un “marco que permita un adecuado desarrollo e implantación de los SIT y de los servicios a los usuarios que éstos proporcionen” (Acha y Espinosa, 2004), por lo que se debe poner especial atención a estos aspectos.

Es necesario verificar que tanto los sistemas como los dispositivos que se vayan a utilizar sean compatibles, con la finalidad “de lograr una adecuada y correctamente dirigida transferencia de información, y que ésta pueda emplearse en los diversos servicios que las tecnologías SIT ofrezcan” (Acha y Espinosa, 2004).

Posteriormente, se pasa a la etapa de Selección, donde con base en estudios bien sustentados se hace una elección de la tecnología y de los elementos a implantar tomando en cuenta las características propias del proyecto.

Por su parte, la priorización se refiere a determinar los aspectos que requieren una atención inmediata y aquellos que pueden esperar a una segunda fase de desarrollo.

Por ejemplo, en el Sistema Pumabús, se sugiere comenzar con la implantación del SATP en las rutas de mayor demanda y en aquellas paradas que captan mayor cantidad de usuarios.

Se mencionó que los sistemas de prioridad semafórica no forman parte del SATP, pero también generarían beneficios al Sistema Pumabús, sin embargo, éstos no se consideran un elemento prioritario.

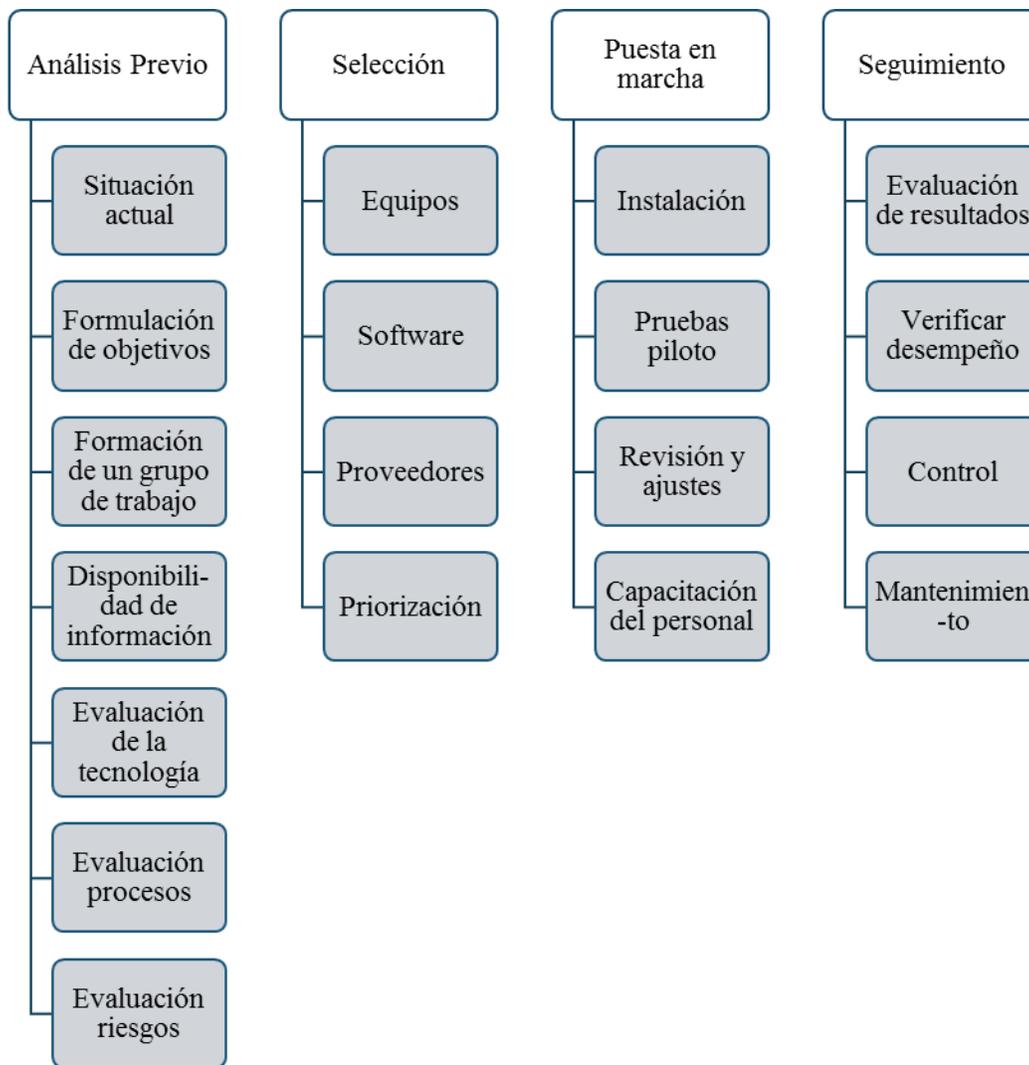


Figura 4.26. Proceso de implantación
Fuente: (TECRO Consultores, 2017)

Durante la Puesta en Marcha, una vez que se cuenta con todo lo requerido, se hace la instalación de los dispositivos y *software*, pero se llevan a cabo una serie de pruebas mediante las cuales se determina si todo funciona de la manera correcta.

Es en este punto cuando aún se pueden hacer algunos ajustes que se consideren pertinentes, con la finalidad de que se logre el correcto funcionamiento del SATP.

También se debe contemplar el aspecto del capital humano, llevar a cabo capacitaciones o contrataciones de personal calificado para cumplir con las funciones requeridas, ya que de nada servirá poner en funcionamiento el SATP, si después no se le da el uso, mantenimiento y actualización adecuados.

Es así como, la etapa de Seguimiento se da una vez que el sistema se pone en marcha en su totalidad, ya que se requiere hacer una evaluación de los resultados, es decir, establecer algunos criterios para determinar si el SATP está cumpliendo con los objetivos que se plantearon desde el inicio, y en caso de que no lo esté haciendo, determinar cuáles son los problemas que se presentan y las posibles soluciones a ellos (Yang y Zhou, 2003).

Existen diferentes criterios que se utilizan para evaluar el funcionamiento del sistema, entre los más comunes se encuentran: eficiencia operacional del sistema de transporte (tiempos de viaje, confiabilidad del servicio, seguridad, etc.), análisis económicos, beneficios sociales y ambientales en la zona de implantación, entre otros (Yang y Zhou, 2003).

Finalmente, se debe considerar el aspecto del mantenimiento, no solo basta con implantar el Sistema Avanzado para el Transporte Público, se le debe dar una revisión periódica que permita evitar y/o corregir problemas que puedan poner en riesgo su funcionamiento.

4.5. BENEFICIOS ESPERADOS

La finalidad de implantar el SATP en el Sistema Pumabús es mejorar en ciertos aspectos en los que el servicio presenta deficiencias.

Según los resultados que arrojó la encuesta de satisfacción aplicada, a pesar de que los usuarios agradecen el servicio de transporte que se les brinda, sobre todo por su gratuidad, han identificado ciertos aspectos en los cuales les gustaría que se trabajara.

Uno de los principales beneficios de la implantación del SATP sería el acceso a la información que tendrían los usuarios, actualmente en muchas de las paradas no existe ningún tipo de datos sobre el servicio.

Pero las personas, al tener acceso a información sobre los horarios de llegada de los autobuses de las diferentes rutas a una parada determinada, tendrían herramientas para hacer una mejor planificación de sus viajes.

A la vez, esto ayudaría a mejorar la imagen del Sistema Pumabús, ya que el simple hecho de proporcionar información continua y precisa a las personas, disminuye la incertidumbre y aumenta la satisfacción de los pasajeros con el servicio que están recibiendo.

Además, estarán conscientes del tiempo que tendrán que esperar, y pueden optar por otros modos de transporte cuando lo consideren necesario.

Y es que cuando los usuarios “carecen de información no son conscientes de la calidad real que el servicio puede ofrecer y exigen que el sistema trabaje de una forma poco realista” (Hernández, 2014).

Pero no solamente los pasajeros se beneficiarían con la implantación de este tipo de sistema inteligente de transporte, también la dependencia encargada del servicio se vería favorecida.

Al tener los dispositivos necesarios para hacer la localización automática de cada una de las unidades de Pumabús, además de la información obtenida por los contadores de pasajeros, se pueden plantear estrategias de mejora en la operación del sistema.

Esto debido a que permiten identificar las principales paradas atractoras y/o generadoras de viajes, las rutas que presentan mayor demanda y los horarios pico, y con base en esto pueden establecerse cambios en los recorridos que ya se tienen diseñados, con la finalidad de aumentar la cobertura del servicio y atender aquellos puntos más problemáticos.

También se puede generar una mejor organización en cuanto a los intervalos de salida de los autobuses de cada ruta, para disminuir los tiempos de espera de las personas y a la vez, evitar el sobrecupo en las unidades, un aspecto muy importante en cuanto a la seguridad de los pasajeros.

Además de lo anterior, es posible monitorear el desempeño en la conducción de los choferes, es decir, verificar que no rebasen los límites de velocidad, que hagan paradas en donde se tiene establecido y que cumplan con el recorrido de cada una de las rutas.

Asimismo, los encargados tienen la capacidad de actuar de manera oportuna para resolver cualquier contratiempo que se presente y afecte el funcionamiento del servicio.

Por otra parte, en caso de llevarse a cabo también la implantación del Sistema de Prioridad Semafórica, se podría lograr una disminución de los tiempos de viaje de los autobuses de Pumabús, de acuerdo con un estudio llevado a cabo por Peng et al. (2000), en lugares donde se tiene en uso este tipo de sistemas, se han dado reducciones de entre un 5 y 8% del tiempo total de viaje.

CONCLUSIONES

El objetivo principal de la tesis se cumplió, ya que consistía en elaborar una propuesta para la implantación de un Sistema Avanzado para el Transporte Público en el Sistema de Transporte Interno Pumabús. Enseguida se presentan los principales resultados obtenidos, además de algunas futuras líneas de extensión.

El Sistema de Transporte Interno Pumabús, representa uno de los principales modos de transporte para la comunidad que realiza sus actividades dentro de Ciudad Universitaria, sin embargo, presenta algunas deficiencias en ciertas áreas, principalmente en lo relacionado a los tiempos de espera de los usuarios en las paradas y la falta de información.

Es por eso que con la implantación del SATP se buscaría brindar información en tiempo real a los usuarios sobre las rutas y los horarios de llegada de los autobuses a las paradas, además de mejorar la cobertura del sistema, hacerlo más eficiente y eliminar los problemas de sobrecupo en las unidades, entre otros.

Para que se dé el adecuado funcionamiento de un SATP, hay ciertos elementos básicos con los que se debe contar, tanto de *hardware* como de *software*, y hoy en día existen diferentes tecnologías que cumplen estas funciones, por lo que se cuenta con una gran variedad de opciones en el mercado.

Entre estos componentes elementales se encuentran los de localización automática de vehículos, contadores de pasajeros y pantallas para la distribución de información en tiempo real, en cuanto a *software*, se requieren los de predicción de tiempos de llegada de las unidades a las paradas y los de optimización de la operación.

En el presente trabajo, se lograron identificar las principales opciones que se tienen en cada uno de estos campos y las características, así como ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

Sin embargo, los requerimientos que se deben buscar en los dispositivos que se van a utilizar dependen principalmente de las características del proyecto a desarrollar y sobre todo de la zona en la que se va a poner en funcionamiento.

En el caso de Pumabús, se recomienda comenzar con la implantación del SATP en las rutas con mayor demanda, que son la Ruta 1, 2 y 9.

Para la localización de las unidades, los dispositivos GPS son la mejor opción, de hecho, algunos autobuses ya los tienen instalados; pero resulta conveniente también que se utilice el DGPS o GPS Diferencial, sistema que permitirá que se obtenga una mayor precisión en la ubicación de los autobuses, un aspecto de suma importancia, ya que de ello dependen los posteriores cálculos que permitirán brindarle de manera precisa a los usuarios del sistema, los horarios de llegada de las unidades a las paradas.

Por otra parte, los contadores infrarrojos de pasajeros son la alternativa a utilizar, se instalan en las puertas de las unidades y servirán para conocer el número de usuarios que suben y bajan del autobús, y así obtener datos sobre la demanda en los diferentes horarios y rutas en las que se brinda el servicio.

En cuanto a las pantallas informativas, no se recomienda instalarlas en todas las paradas de las rutas antes mencionadas, es mejor colocarlas en las paradas con mayor concurrencia, como lo son: Metro C.U., Metrobús C.U., Ingeniería, Psicología, Derecho, Medicina y Posgrado de Ingeniería.

Respecto al *software*, existen básicamente dos opciones, se puede adquirir de algún fabricante o crearlo ad-hoc para el proyecto, a pesar de que se deben evaluar diferentes factores para hacer la elección adecuada, se sugiere construirlo desde cero, de esta manera, se estaría generando *software* propio, capaz de integrar todas las particularidades del Sistema Pumabús que se deban tomar en cuenta para lograr un mejor desempeño.

Además, el sistema de comunicación recomendado es la fibra óptica, dentro de C.U. ya se cuenta con una red de fibra óptica que interconecta los principales edificios de las distintas facultades de la universidad, por lo que solamente sería necesario hacer algunas adecuaciones para lograr las conexiones que se requieran.

Finalmente, por tratarse de un sistema de transporte que cuenta únicamente con 13 rutas, no se requiere un centro de control de grandes dimensiones, basta con uno pequeño, en el cual se cuente con una pantalla mural y dos puestos de control. Además de un espacio destinado al personal que se encargue de la planificación de la operación del Sistema Pumabús.

Pero además del *hardware* y *software*, uno de los aspectos más importantes y al que muchas veces se le deja de lado, es el factor humano, con todos los avances que se tienen hoy en día, para lograr el desarrollo de proyectos de este tipo, se requieren grupos interdisciplinarios, donde se reúnan profesionistas de distintas áreas que aporten sus conocimientos para el logro de un objetivo en común.

Es importante señalar, que en este trabajo solamente se hacen algunas recomendaciones sobre la tecnología que resulta más adecuada para su implantación, sin embargo, sería conveniente también realizar estudios económicos.

Esto serviría para determinar el monto aproximado que se requiere para poner en funcionamiento el Sistema Avanzado para el Transporte Público y verificar si desde el aspecto monetario realmente las alternativas propuestas son las mejores.

Como se puede apreciar, la solución a los problemas relacionados con el transporte se ha convertido actualmente en un asunto de gran importancia, sin embargo, no se puede recurrir a las mismas alternativas que desde hace tiempo se han planteado, ya que finalmente no han dado los resultados esperados.

Los Sistemas Inteligentes de Transporte surgen como una nueva opción que, haciendo uso de la tecnología, buscan mejorar el funcionamiento de los diferentes modos de transporte con los que se cuenta y a la vez reducir los impactos negativos que generan.

Sin embargo, aunque en muchas ciudades alrededor del mundo ya se están poniendo en marcha este tipo de estrategias desde hace algunos años, en México aún falta mucho por hacer, pero poco a poco han ido surgiendo proyectos cuya tendencia es el uso de estas tecnologías.

Es así como la implantación de un SATP en el sistema Pumabús representaría uno de los primeros esfuerzos en materia de SIT en la Ciudad de México, avance que debería encaminar a otros lugares en el país a su utilización en busca de un transporte de calidad.

REFERENCIAS

- A3M (2016). *Tarjetas plásticas*. [en línea], consultado 2016, <http://www.a3m.eu/es/>
- Acha, J. (2006). *Identificación de los servicios de ITS para mejorar la seguridad vial en las carreteras de cuota de México*. [en línea], consultado 2016, http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:9IJ09xa54ncJ:www.institutoivia.com/cisev-ponencias/control_gestion_gt/Jorge_Acha.pdf+&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=mx
- Acha, J. y Espinosa, J. (2004). *Hacia una arquitectura nacional para los sistemas inteligentes de transporte*. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 251, Sanfandila, Querétaro.
- Actea ATC (2017). *Consolas de control*. [en línea], consultado 2017, <http://gesab.com/es/centro-control/consolas-control/actea-atc/>
- ActSoft (2016). *Public Transportation Profits from GPS Tracking*. [en línea], consultado 2016, <http://www.actsoft.com/public-transportation-profits-from-gps-tracking/>
- Adeleke, O.; Alaro, Y. y Akinpelu, M. (2013). *Development of an Advanced Public Transportation System for captive commuters on urban arterials in Ilorin, Nigeria*. Alexandria Engineering Journal, Volumen 52, p.p. 447-454.
- ADLink (2015). *CompactPCI: Improving the synergy of public transportation systems*. [en línea], consultado 2016, http://www.adlinktech.com/Transportation/CompactPCI_Improving-the-Synergy-of-Public-Transportation-Systems.php?utm_source=
- AECOM (2011). *Study on Public Transport Smartcards-Final Report*. European Commission Smartcards Study Consortium.
- Agencia Universitaria de Noticias (2009). *Instalan semáforos en Ciudad Universitaria*. [en línea], consultado 2017, <http://aunamnoticias.blogspot.mx/2009/09/instalan-semaforos-en-ciudad.html>
- Aguilar, R. (1999). *Red Neuronal*. [en línea], consultado 2016, <http://grupo.us.es/gtocom/pid/pid10/RedesNeuronales.htm#estructuraANS>
- Aguirre, M. y Galán, H. (2015). *Los tranvías de la Ciudad de México, 1850-1971*. [en línea], consultado 2017, <http://www.mexicomaxico.org/Tranvias/TRANVIAS.htm>
- Ahmed, F. y Hawas, Y.E. (2015). *An integrated real-time traffic signal system for Transit signal priority, incident detection and congestion management*. Transportation Research Part C 60. p.p 52-76
- Alava Ingenieros (s.f.). *Monitorización continua y en tiempo real de ferrocarril mediante sensores FBC*. [en línea], consultado 2016, <http://www.mra.pt/repositorio/140e/pdf/9591/2/monitorizacion-continua-y-en-tiempo-real-de-ferrocarril-mediante-sensores-fbg.pdf>
- Albarracín, L. (2015). *Comunicación móvil*. [en línea], consultado 2016, <http://steven8cho.blogspot.mx/2015/11/entrada-segunda-sistemas-de.html>

Alcaldía de Medellín (s.f.). *Semáforos*. [en línea], consultado 2017, https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:QOS3mYh06oMJ:https://www.medellin.gov.co/movilidad/documents/seccion_senalizacion/cap7_semaforos.pdf+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=mx

Alegsa, L. (2010). *Definición de programador (informática)*. [en línea], consultado 2017, <http://www.alegsa.com.ar/Dic/programador.php>

Alessandrini, N. (2015). *Aplicación de algoritmos de aprendizaje estadístico para predecir velocidades de buses con información en tiempo real*. Tesis de Maestría. Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Altán (2016). *Altán redes, para un México más y mejor conectado*. [en línea], consultado 2017, <http://altanredes.com/>

Amaro, J. (2006). *Frecuencia y longitud de onda*. [en línea], consultado 2017, <http://www.ugr.es/~amaro/radiactividad/tema1/node4.html>

AR Comunicación Integral (2017). *Tetra*. [en línea], consultado 2016, <http://arci.com.mx/radiocomunicacion/tetra/>

Artemio, J. y De la Torre, E. (2006). *Identificación del conocimiento y necesidades de los servicios de ITS por parte de las empresas transportistas y con flota propia en México*. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 289, Sanfandila, Querétaro.

Asociación Española de Ergonomía (2017). *¿Qué es la ergonomía?* [en línea], consultado 2017, <http://www.ergonomos.es/ergonomia.php>

Asociación Mexicana de Agencias de Investigación de Mercados y Opinión Pública e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2008). *Nivel Socioeconómico*. México.

Assis (2014). *Error porcentual absoluto medio (MAPE)*. [en línea], consultado 2017, <http://www.assis.com.co/blog-2/error-porcentual-absoluto-medio-mape/>

Baaj, M. y Mahmassani, H. (1991). *An AI- Based approach for Transit Route System Planning and Design*. Journal of Advanced Transportation, Vol. 25(2) p.p. 187-210.

Banco Mundial (2014). *Acoso sexual: el alto costo de ser mujer en un autobús*. [en línea], consultado 2016, <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/09/08/gender-violence-public-transportation>.

Banco Mundial (2015). *Población, total*. [en línea], consultado 2016, <http://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL>

Banco Mundial (2016). *Unión Internacional de Telecomunicaciones, Informe sobre el Desarrollo Mundial/TIC de las Telecomunicaciones y estimaciones del Banco Mundial*. [en línea], consultado 2016, <http://datos.bancomundial.org/indicador/IT.NET.USER.P2?end=2015&start=1990&view=chart>

- Barco (2017). *Pantallas murales LCD*. [en línea], consultado 2017, <https://www.barco.com/es/Productos-y-soluciones/Pantallas-murales-de-v%C3%ADdeo/Pantallas-murales-LCD>
- Barfield, W. y Dingus, T. (1998). *Human factors in Intelligent Transportation Systems*. Virginia Polytechnic Institute and State University. Psychology Press. Taylor & Francis Group.
- Barnet, M. (2014). *Intelligent Transportation System on Ontario's Highways*. [en línea], consultado 2017, <http://uttri.utoronto.ca/files/2014/12/1-MTO-ITS-Now-and-Future1.pdf>
- Bierhoff, T.; Esteban, J.; Safont, J.; Alonso, A. y Thronicke, W. (2013). *Real time traffic Forecast*. ATOS Scientific Community.
- Biondi, M. (2012). *Localización automática*. Universidad de Palermo, Buenos Aires, Argentina.
- Blandón, D. (2014). *Ventajas de la fibra óptica*. [en línea], consultado 2016, <http://slideplayer.es/slide/149290/>
- Blog Tecnología (2015). *Cable de par trenzado*. [en línea], consultado 2017, <http://hurtadoagraz.blogspot.mx/2015/03/cable-de-par-trenzado.html>
- Borole, N.; Rout, D.; Goel, N.; Vedagiri, P. y Mathew, T. (2013). *Multimodal Public Transit Trip Planner with Real-Time Transit Data*. Procedia-Social and Behavioral Sciences 104. p.p. 775-784.
- Bradley, J. (2009). *New green license plate selected by ontarians*. [en línea], consultado 2017, <https://news.ontario.ca/mto/en/2009/11/new-green-licence-plate-selected-by-ontarians.html>
- Bullock, D.; Johnson, B.; Wells, R.; Kyted, M. y Li, Z. (2002). *Hardware in the loop simulation*. Transportation Research Part C. p.p. 73-89.
- Buzai, G.D. (2001). *Geografía global. El paradigma geotecnológico y el espacio interdisciplinario en la interpretación del mundo del siglo XXI*. Estudios Geográficos. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España.
- Cabascango, N.; Lomas, B. y Ramos, J. (2014). *Tipos de fibra óptica. Usos e instalación*. [en línea], consultado 2017, <https://es.slideshare.net/alexanderpc9/tipos-de-fo-final>
- Cabify (2016). *¿Cómo funciona?* [en línea], consultado 2016, <https://cabify.com/discover/learn-more#>
- Cableducación.org.mx (s.f.). *Sistemas de comunicación. Conceptos básicos*. [en línea], consultado 2016, http://www.ie.itcr.ac.cr/marin/telematica/trd/conceptos_basicos_previos.pdf
- Cal y Mayor, R. (2007). *Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones*. Alfaomega Grupo Editor, México, D.F.
- California Department of Transportation (2008). *Transit Signal Priority Research Tools. Final Report*. [en línea], consultado 2016, http://nacto.org/docs/usdg/transit_signal_priority_research_tools_caltrans.pdf

Calypso (2014). *Respuestas a las necesidades de movilidad*. [en línea], consultado 2016, https://www.gi-de.com/es/products_and_solutions/products/ticketing/Calypso-5507.jsp

Camacho, S. (2014). *Megacentralidades. Propuesta de integración de los CETRAM al desarrollo urbano de la Ciudad de México*. Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo en México, Ciudad de México.

Captivanet (2017). *Quiosco interactivo*. [en línea], consultado 2017, <http://www.captivanet.net/quiosco-interactivos.php>

Carbonell, A. (2003). *Los Sistemas Inteligentes de Transporte*. Conferencia del 4º Coloquio Internacional sobre Seguridad e Higiene. Universidad de Oporto.

Casado, M.; Vicente, L. y Vaquerizo, J. (2008). *Sistema de navegación hiperbólico de largo alcance Loran-C*. [en línea], consultado 2016, <http://mecg.es/archivos/AST2%20-%20Bloque2.pdf>

Casey, R.; Labell, L.; Moniz, L.; Royal, J.; Sheehan, M.; Sheehan, T.; Brown, A.; Foy, M.; Zirker, M.; Schweiger, C.; Marks, B.; Kaplan, B. y Parker, D. (2000). *Advanced Public Transportation Systems: The State of the Art Update 2000*. U.S. Department of Transportation. Federal Transit Administration.

Castro, F. (2012). *EcoDrive Live, el sistema que te ayuda a conducir de forma más eficiente*. [en línea], consultado 2016, <http://www.blogcoches.es/eco-drive-live/>

Centro de Información de Red UNAM (2012). *Historia NIC-UNAM*. [en línea], consultado 2017, <http://www.nic.unam.mx/historia.html>

Centros de Transferencia Modal (2016). *A cerca de CETRAM*. [en línea], consultado 2016, http://www.cetram.cdmx.gob.mx/acerca_cetram/index.html

Chen, K. (1992). *IVHS Lessons from European Experience*. University of Michigan Transportation Research Institute.

Chen, K. y Hyun, Y. (1991). *Intelligent Vehicle-Highway Systems (IVHS) for Newly Industrialized Countries (NICs)*. Department of Electrical Engineering and Computer Science. University of Michigan.

Chien, S.; Ding, Y. y Wei, C. (2002). *Dynamic bus arrival time prediction with artificial neuronal networks*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 128, p.p. 429-438.

Chow, J. (2014). *Taking the guesswork out of bus travel*. [en línea], consultado 2016, <http://transport.asiaone.com/news/general/story/taking-guesswork-out-bus-travel>

Cifuentes, S. (2016). *Modelación y diagnóstico del Sistema de Transporte Pumasabús*. Tesis de Maestría, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Ingeniería de Sistemas-Investigación de Operaciones, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

CIO México (2013). *Guadalajara mejorará el transporte público con apoyo de IBM*. [en línea], consultado 2016, <http://cio.com.mx/guadalajara-mejora-el-transporte-publico-con-apoyo-de-ibm/>

CODITEL (2011). *¿Qué hace un Ingeniero en Telecomunicación?* [en línea], consultado 2017, <http://quieroseringerodeteleco.blogspot.mx/p/que-hace-un-ingeniero-de.html>

Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (2003). *Libro Verde de los sistemas inteligentes de transporte terrestre*. Comisión de Transportes. Consorcio de Transportes Madrid.

Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal e Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo (2013). *Informe especial sobre el derecho a la movilidad en el Distrito Federal*. México, Distrito Federal.

Comisión Europea (2008). *Programas europeos de navegación por satélite Galileo y EGNOS*. Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas, Luxemburgo.

Comisión Federal de Competencia Económica (2016). *¿Quiénes somos?* [en línea], consultado 2017, <https://www.cofece.mx/cofece/index.php/cofece/quienes-somos>

Consejo Nacional de Población (2017). *Proyecciones de la población 2010-2050*. [en línea], consultado 2017, <http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones>

Consejo Universitario (2017). *Lineamientos de seguridad para la operación del sistema de transporte y vialidad dentro de Ciudad Universitaria*. [en línea], consultado 2017, <https://consejo.unam.mx/comisiones/especial-de-seguridad/reglamentos-y-lineamientos/110-sistema-de-transporte-y-vialidad>

Contenido (2014). *¿Cómo nació el programa “Hoy no circula”?* [en línea], consultado 2016, <http://contenido.com.mx/2014/07/como-nacio-el-programa-hoy-no-circula/>

Contreras, C. (2016). *Vuelve contingencia después de 14 años; contaminación por ozono*. [en línea], consultado 2016, <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2016/03/15/1080941>

Cortés, C.; Sáez, D.; Milla, F.; Núñez, A. y Riquelme, M. (2010). *Hybrid predictive control for real-time optimization of public transport systems' operations based on evolutionary multi-objective optimization*. Transportation Research Part C.

Counterest (2014). *Conteo de personas para transporte público*. [en línea], consultado 2016, <http://counterest.net/la-solucion/transporte-publico-contador-de-pasajeros/>

CSSR (2017). *Controladores de tránsito*. [en línea], consultado 2017, http://www.cssvialrami.com.mx/controladores_de_transito.aspx

ctsEMBARQ (2014). *El ABC de las encuestas Origen-Destino*. [en línea], consultado 2016, <http://movilidadamable.org/recursos/item/encuestas-origen-destino>

Definición ABC (2017). *Definición de laptop*. [en línea], consultado 2017, <https://www.definicionabc.com/tecnologia/laptop.php>

Departamento de Infraestructura y Desarrollo Regional Australiano (2015). *Intelligent Transport Systems*. [en línea], consultado 2016, <https://infrastructure.gov.au/transport/its/>

Departamento de Transporte de Estados Unidos (2005). *Managing demand through travel information services*. Federal Highway Administration. [en línea], consultado 2016, http://ops.fhwa.dot.gov/publications/manag_demand_tis/travelinfo.htm

Departamento de Transporte de Estados Unidos (2006). *Safety applications of Intelligent Transportation Systems in Europe and Japan*. Federal Highway Administration, American Association of State Highway and Transportation Officials and National Cooperative Highway Research Program.

Departamento de Transporte de Estados Unidos (2011). *Intelligent Transportation Systems (ITS) Standards Program Strategic Plan for 2011-2014*. Research and Innovative Technology Administration.

Departamento de Transporte de Estados Unidos (2014). *European ATIS Projects/Systems*. [en línea], consultado 2016, http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&ved=0ahUKEwikn5uH3efLAhXltoMKHXkfCwsQFggwMAU&url=http%3A%2F%2Fwww.channelingreality.com%2FNAU%2FIVHS%2FPrometheus_Europe_fhwa.dot.pdf&usg=AFQjCNHmZYTtoHTynPQO91TgIJD6DLyZ9sA

Departamento de Transporte de Estados Unidos (2015). *The architecture view*. [en línea], consultado 2016, <http://www.iteris.com/itsarch/html/menu/hypertext.htm>

Departamento de Ingeniería de Sistemas (2016). *Maestría en Investigación de Operaciones*. [en línea], consultado 2017, <http://www.ingenieria.unam.mx/sistemas/maestria.html>

Diario Oficial de la Federación (1992). *Ley Federal sobre Metrología y Normalización*. [en línea], consultado 2016, http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/130_181215.pdf

Díaz, C. (2014). *En Metro, Ecobici, Metrobús o Trolebús con una sola tarjeta*. [en línea], consultado 2016, http://www.milenio.com/df/homologa_tu_tarjeta_del_DF_0_234576765.html

Dirección General de Atención a la Comunidad Universitaria (2015). *Historia*. [en línea], consultado 2017, <http://www.tucomunidad.unam.mx/Bicipuma/historia.html>

Dirección General de Normas (2016). *Consulta del catálogo de Normas Oficiales Mexicanas*. [en línea], consultado 2016, <http://www.economia-noms.gob.mx/noms/consultasAction.do>

Dong, W. (2011). *An overview of in-vehicle route guidance system*. Facultad de Información y Comunicación. Universidad de Swinburne, Melbourne, Australia.

DreamLux (2016). *Pantallas Led Exterior*. [en línea], consultado 2016, <http://www.dreamlux.es/es/gama-pantallas-gigantes-led.html>

DriveBC (2016). *Map View*. [en línea], consultado 2016, <http://www.drivebc.ca/#mapView&ll=51.395777%2C-122.783203&z=6>

Dunckel-Graglia, R. (2013). *El nuevo color del feminismo: un análisis del transporte exclusivo para mujeres*. [en línea], consultado 2016, http://www.rua.unam.mx/repo_rua/temas_transversales_de_interes_general/300_ciencias_sociales/305_grupos_sociales/_5334.pdf

- Easy Taxi (2016). *Easy Taxi. Pasajero*. [en línea], consultado 2016, <http://www.easytaxi.com/mx/pasajero/>
- EcuRed (2005). *Ingeniería de software*. [en línea], consultado 2017, https://www.ecured.cu/Ingenier%C3%ADa_de_software
- EcuRed (2016). *Señales analógicas y digitales*. [en línea], consultado 2016, https://www.ecured.cu/Se%C3%B1ales_anal%C3%B3gicas_y_digitales
- Egomexico (2016). *¿Cómo funciona la tecnología de identificación por radiofrecuencia RFID?* [en línea], consultado 2016, http://www.egomexico.com/tecnologia_rfid.htm
- Eibenschutz, R. y Goya, C., Coord. (2009). *Estudio de la Integración Urbana y Social en la Expansión reciente de las Ciudades en México 1996-2006*. México: Secretaría de Desarrollo Social y Universidad Autónoma Metropolitana. Coeditado con la H. Cámara de Diputados LX Legislatura.
- El Economista (2013). *Indra gana contrato de Metrobús por 274 mdp*. [en línea], consultado 2016, <http://eleconomista.com.mx/industrias/2013/06/24/indra-gana-contrato-metrobus-274-mdp>
- El Poder del Consumidor e Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo (2014). *Encuesta sobre transporte público y uso del automóvil en los municipios de la zona metropolitana del Valle de México 2014*. [en línea], consultado 2016, <http://elpoderdelconsumidor.org/transporteeeficiente/es-hora-de-conformar-un-plan-integral-de-movilidad-y-transporte-publico-en-el-valle-de-mexico/>
- El-Rabbany, A. (2002). *Introduction to GPS. The Global Positioning System*. Artech House, Inc. Boston, Massachusetts.
- El Universal (2016). *Transporte público en CDMX, malo e inseguro: encuesta*. [en línea], consultado 2016, <http://lasillarota.com/transporte-publico-en-cdmx-malo-e-inseguro-encuesta#.WHkHslz5dmw>
- Electrónicos.net (2016). *Kioscos interactivos, informativos y publicitarios*. [en línea], consultado 2016, <http://www.rotuloselectronicos.net/kioscos-interactivos-informativos-y-publicitarios.html>
- Elkosantini, S. y Darmoul, S. (2013). *Intelligent Public Transportation Systems: A Review of Architectures and Enabling Technologies*. Proceeding IEEE Intelligent Transportation Systems, p.p. 233-238.
- Empretel (2016). *Detector de masa en una vía*. [en línea], consultado 2016, <http://www.empretel.com.mx/accesorios-barreras/1162-detector-de-masa-una-via-detecta-vehiculos-por-medio-de-cable-inductivo-en-el-suelo.html>
- Encontrack (2016). *Productos y servicios*. [en línea], consultado 2016, <http://www.encontrack.com/enk/index.php>
- Environmental Systems Research Institute (2016). *¿Qué es la geocodificación?* [en línea], consultado 2017, <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/guide-books/geocoding/what-is-geocoding.htm>
- Ericsson (2015). *Ericsson Mobility Report on the pulse of the networked society*. [en línea], consultado 2016, <http://www.ericsson.com/res/docs/2015/mobility-report/ericsson-mobility-report-nov-2015.pdf>

- ERTICO ITS Europe (2016). *The ERTICO-Partnership - Vision & Mision*. [en línea], consultado 2016, <http://ertico.com/vision-and-mission/>
- Espinoza, R. (s.f.). *Sistemas Inteligentes de Transporte-ITS*. [en línea], consultado 2016, http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:s9_LT93liNcJ:www.proviasnac.gob.pe/Archivos/file/Documentos_de_Interes/ITS-UGOP2.pdf+&cd=5&hl=es&ct=clnk&gl=mx
- Esteban, N. (2008). *Fiat y Microsoft te ayudan a cuidar el medio ambiente*. [en línea], consultado 2016, <http://www.actualidadmotor.com/fiat-y-microsoft-te-ayudan-a-cuidar-el-medio-ambiente/>
- European Telecommunications Standards Institute (1997). *Terrestrial Trunked Radio (TETRA)*. [en línea], consultado 2016, http://www.etsi.org/deliver/etsi_etr/300_399/30002/01_60/etr_30002e01p.pdf
- ExpoSign (2016). *Publicidad: Claves para pantalla LED*. [en línea], consultado 2016, <http://www.exposign.com.ar/?q=es/content/publicidad-claves-para-pantalla-led#>
- Eyssa (2013). *Controladores de tránsito*. [en línea], consultado 2016, <http://www.eyssa.com.mx/Controladores.html>
- Ezell, S. (2010). *Intelligent Transportation Systems*. The Information Technology & Innovation Foundation.
- Farjas, M. (2004). *Aplicaciones topográficas del GPS*. [en línea], consultado 2017, http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-ii/Teoria_GPS_Tema_12.pdf
- Federal Highway Administration (2007). *Advanced parking management systems: a cross-cutting study. Taking the stress out of parking*. [en línea], consultado 2016, http://ntl.bts.gov/lib/jpodocs/repts_te/14318_files/14318.pdf
- Federal Highway Administration (2015). *Intelligent Transportation System Architecture and Standards*. [en línea], consultado 2016, http://ops.fhwa.dot.gov/its_arch_imp/policy_1.htm
- Feng, Z.; Liu, J., Dong, X. y Gao, K. (2008). *Research on the Establishment of Xi'an Advanced Public Transport System*. Proceeding IEEE Intelligent Transportation Systems, p.p. 430-434.
- Fiat (2016). *Technology*. [en línea], consultado 2016, <http://www.fiat.co.uk/fiat-500/technology-safety>
- FIMPE (2013). *Gestión de sistemas de prepago en transporte público*. [en línea], consultado 2016, <http://www.sibrtonline.org/downloads/130909-seminario-tra-529498af8a409.pdf>
- Flotasnet (2013). *Gestión y localización de flotas*. [en línea], consultado 2016, <http://www.flotasnet.es/>
- Forbes (2015). *Así regulará el GDF a Uber y Cabify*. [en línea], consultado 2017, <http://www.forbes.com.mx/asi-regulara-el-gdf-a-uber-y-cabify/#gs.xQGiyu4>
- Forbes (2016). *¿Cuál es el mejor operador de telefonía móvil en México?* [en línea], consultado 2017, <https://www.forbes.com.mx/mejor-operador-telefonía-movil-mexico/#gs.IMaMAc>

- Frame Architecture (2016). *Relationship with the ITS Action Plan and ITS Directive*. [en línea], consultado 2016, <http://frame-online.eu/frame-architecture/detailed-information/relationship-with-the-its-action-plan-and-its-directive>
- Franco, A. (2004). *FAQ sobre los GPS*. [en línea], consultado 2017, <http://www.elgps.com/faq.html#12canales>
- Fuentes, V. (2013). *Topografía*. [en línea], consultado 2017, <http://es.slideshare.net/vmfuentes1/topografia-28183362>
- Gaceta Digital UNAM (2016). *Ya circula una nueva ruta del Pumabús*. [en línea], consultado 2017, <http://www.gaceta.unam.mx/20161128/ya-circula-una-nueva-ruta-del-pumabus/>
- Galván, S. (2012). *Cable de par trenzado*. [en línea], consultado 2017, <https://es.slideshare.net/sgalsan/cable-par-trenzado-14886425>
- García, A. (2013). *Comunicaciones Tetra: la red de las fuerzas de seguridad*. [en línea], consultado 2016, http://www.acta.es/medios/articulos/comunicacion_e_informacion/003001.pdf
- García, A. (2015). *¿Cómo hace Google Maps para predecir el tráfico?* [en línea], consultado 2016, <http://www.nerdilandia.com/como-hace-google-maps-para-predecir-el-trafico/>
- García, E. (2008). *Probamos el sistema Ecodrive de Fiat*. [en línea], consultado 2016, <http://es.autoblog.com/2008/10/17/probamos-el-sistema-ecodrive-de-fiat/>
- García-Álvarez, J. (2015). *Así funciona el GPS*. [en línea], consultado 2016, http://www.asifunciona.com/electronica/af_gps/af_gps_13.htm
- Garrido, R. (2015). *Es oficial: esta es la regulación de Uber y Cabify para la Ciudad de México*. [en línea], consultado 2016, <http://www.xataka.com.mx/otros-1/es-oficial-esta-es-la-regulacion-de-uber-y-cabify-para-la-ciudad-de-mexico>
- Garrido, R. (2016). *¿Cuál es la mejor red 4G LTE en México?* [en línea], consultado 2017, <https://www.xataka.com.mx/telecomunicaciones/cual-es-la-mejor-red-4g-lte-en-mexico>
- Gesab (2017). *4 aspectos clave en el diseño de una sala de control*. [en línea], consultado 2017, <http://gesab.com/es/4-aspectos-clave-en-el-diseno-de-una-sala-de-control/>
- Giesecke & Devrient (2016). *MIFARE Classic*. [en línea], consultado 2016, https://www.gi-de.com/es/products_and_solutions/products/ticketing/MIFARE-Classic-5504.jsp
- Globalstar (2016). *Rastreo vehicular*. [en línea], consultado 2016, <http://www.globalstar.com.mx/Servicios-Rastreo.html>
- Gobierno de Jalisco (2015). *EU financiará estudio para agilizar el tráfico en la ZMG*. [en línea], consultado 2016, <http://www.jalisco.gob.mx/es/prensa/noticias/18496>
- Gobierno del Distrito Federal (2002). *Programa Integral de Transporte y Vialidad 2001-2006*. Gaceta Oficial del Distrito Federal No. 146. Secretaría de Transporte y Vialidad.

Gobierno del Distrito Federal (2011). *Lineamientos para la administración, operación, supervisión y vigilancia de los centros de transferencia modal del Distrito Federal*. Gaceta Oficial del Distrito Federal No. 1120. Secretaría de Obras y Servicios.

Gobierno del Distrito Federal (2013). *Programa Integral para la Regularización y Mejoramiento del Transporte Público Colectivo de Pasajeros Metropolitanos, de unidades matriculadas en el Distrito Federal*. Gaceta Oficial del Distrito Federal No. 1661. Secretaría de Transportes y Vialidad.

Gobierno del Distrito Federal (2014a). *Ley de Movilidad del Distrito Federal*. Gaceta Oficial del Distrito Federal No. 1899 Bis. Artículo 12 y 101.

Gobierno del Distrito Federal (2014b). *Programa Integral de Movilidad 2013-2018*. Gaceta Oficial del Distrito Federal No. 1965 Bis. Secretaría de Movilidad.

Gobierno del Distrito Federal (2016). *Decreto por el que se modifica el diverso por el que se crea la Red de Transporte de Pasajeros del Distrito Federal*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México No. 93.

Goicoechea, A. (2016). *Centro de Control*. [en línea], consultado 2016, <https://arturogoicoechea.files.wordpress.com/2011/05/centro-de-control.jpg>

Goldsmith, T.C. (1998). *Automated Vehicle Guidance (AVCS) - The Real Automobile*. [en línea], consultado 2016, <http://www.azinet.com/articles/real98.htm>

González, R. (2013). *Cómo funciona: tarjetas de banda magnética*. [en línea], consultado 2016, <http://nosoloingenieria.com/como-funciona-tarjetas-banda-magnetica/>

González-Sánchez, R. (2013). *Aceptación del uso de los Sistemas Avanzados de Información al Viajero y vías urbanas de cuota para acceder a Ciudad Universitaria*. Tesis de licenciatura. México, Universidad Nacional Autónoma de México.

GPS.gov (2016). *Control Segment*. [en línea], consultado 2017, <http://www.gps.gov/systems/gps/control/>

GPSTEC México (2016). *Rastreo GPS para autobuses de transporte urbano de pasajeros*. [en línea], consultado 2016, <http://www.gpstec.mx/rastreo-gps-para-autobuses-de-transporte-urbano-de-pasajeros/>

Grami, A. (2016). *Introduction to Digital Communications*. Academic Press. Waltham, Massachusetts.

Granados, A. y González, B. (2010). *Acceso a contenidos web desde dispositivos móviles*. Memoria del Coloquio Jóvenes Investigadores en Diseño. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.

Grupo Comunicaciones Ópticas (2006). *Tutorial de Comunicaciones Ópticas*. [en línea], consultado 2017, http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_1_1.htm

Gruttner, E.; Pinninghoff, M.A.; Tudela, A. y Díaz, H. (2002). *Recorridos óptimos de líneas de transporte público usando algoritmos genéticos*. Jornadas chilenas de computación, Copiapó, Chile.

Guerra, V. (2016). *Actualidad de las telecomunicaciones en la UNAM*. [en línea], consultado 2017, www.posgrado.unam.mx/sites/default/files/2016/05/2504.pdf

- Gurmu, Z. y Fan, W. (2014). *Artificial Neural Network Travel Time Prediction Model for Buses Using Only GPS Data*. Journal of Public Transportation, Vol. 17, No. 2.
- Gutiérrez, F. (2012). *Señal digital vs señal analógica*. [en línea], consultado 2016, <http://ciscogtzs.blogspot.mx/2012/08/senal-digital-vs-senal-analogica.html>
- Haghighat, F. y Kim, J. (ed). (2009). *Sustainable Built Environment*. Volumen 2, Encyclopedia of Life Support Systems, Eolss Publishers. Oxford, Reino Unido.
- Hao, X. (2007). *Evaluation of benefits and effectiveness of smart cards for public transport*. University of Leeds, Institute for Transport Studies.
- Haridan, A. (2012). *Sistema de priorización semafórica*. [en línea], consultado 2017, http://www.gmv.com/blog_gmv/sistema-de-priorizacion-semaforica/
- Hasegawa, T. (2013). *Intelligent Transport Systems*. [en línea], consultado 2016, www.iatss.or.jp/common/.../iatss40_theory_05.pdf
- Heaton, J. (2008). *Introduction to neural networks with Java*. Heaton Research.
- Hee, R. (2004). *The Prediction of bus arrival time using automatic vehicle location systems data*. Tesis de doctorado. Estados Unidos de América, Universidad de Texas A&M.
- Hernández, E. (2013). *Sistemas inteligentes de transporte (SIT): principios de evaluación de proyectos para Sistemas Integrados de Transporte Urbano con Autobuses de Rápido Tránsito (SITUART) y de valuación de sus empresas*. Tesis de doctorado. México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández, P. (2014). *Sistemas inteligentes de transporte: Situación actual y prospectiva*. Tesis de licenciatura. México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hinojosa, L. (2007). *Tópicos selectos de fibra óptica*. [en línea], consultado 2016, <https://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/documentos/Topicos%20selectos%20de%20fibra%20optica.pdf>
- Hiperpuma (2016). *Hiperpuma*. [en línea], consultado 2016, <http://hiperpuma.iingen.unam.mx/HiperMovil/ConsultaActionDesktop.action>
- Hollborn, S. (2002). *Intelligent Transportation Systems in Japan*. Universidad Técnica de Darmstadt, Alemania.
- Hormazabal, F. (2005). *Capítulo 5: Banda Base y Banda Ancha*. [en línea], consultado 2017, <http://www.mailxmail.com/curso-conceptos-basicos-redes/banda-base-banda-ancha>
- Hornik, K.; Stinchcombe, M. y White, H. (1989). *Multilayer feedforward networks are universal approximators*. Neural Networks, Vol. 2, p.p. 359-366. USA.
- Houghton, J.; Reiners, J. y Lim, C. (2009). *Transporte inteligente. Cómo mejorar la movilidad en las ciudades*. IBM Global Business Services. IBM Institute for Business Value.

Hounsell, N. y Wall, G. (2002). *New intelligent transport systems applications in Europe to improve bus services*. Transportation Research Record 17910. Paper No. 02-3451.

HTL Display (2014). *Differences between LED display light sources*. [en línea], consultado 2016, <http://www.htldisplay.com/news/Industry%20News/315.html>

HyperPhysics (2012). *Refracción de la luz*. [en línea], consultado 2017, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/geoopt/refr.html>

Hytera (2017). *X1e*. [en línea], consultado 2017, <http://arci.com.mx/radios-portatiles-hytera/x1e/>

IBM (2016). *IBM Rational Intelligent Transportation Systems solution*. [en línea], consultado 2016, <http://www.ibm.com/developerworks/rational/solutions/intelligent-transportation-systems.html>

iCEX (2016). *Información inteligente para un tráfico más seguro*. [en línea], consultado 2016, <http://www.spaintechnology.com/technology/es/navegacion-global/especiales/4426516.html?print=yes>

Icom (2017). *F4161/DS*. [en línea], consultado 2017, <http://arci.com.mx/radios-portatiles-icom/f4161ds/>

Impulsora del Desarrollo y el Empleo en América Latina (2016). *Seguridad*. [en línea], consultado 2016, <http://www.arconorte.com.mx/seguridad/>

Imtech Traffic; Infra UK Ltd.; Siemens Traffic Controls y TRL Limited. (2012). *The SCOOT Urban Traffic Control System*. [en línea], consultado 2017, <http://ocw.nctu.edu.tw/course/sc011/2012-08-22.pdf>

Indra (2016a). *Indra implementa el sistema de ayuda a la explotación en los 568 autobuses y estaciones de las seis líneas de metrobús de la Ciudad de México*. [en línea], consultado 2016, <http://www.indracompany.com/es/noticia/indra-implementa-ayuda-explotacion-568-autobuses-estaciones-lineas-metrobus-ciudad-mexico>

Indra (2016b). *Nuestra actividad*. [en línea], consultado 2016, <http://www.indracompany.com/es/indra/actividad>

Indra (2016c). *ATTRACKTIVE: Advanced Travel Companion & Tracking Services*. [en línea], consultado 2017, <http://www.indracompany.com/en/indra/attractive-advanced-travel-companion-tracking-services>

Infodev (2014). *Comparative analysis of counting technologies*. [en línea], consultado 2016, <http://www.infodev.ca/about/read-our-articles/comparative-analysis-of-counting-technologies.html>

Informática (2017). *PDA-Asistente Digital Personal*. [en línea], consultado 2017, <http://www.informaticamoderna.com/PDA.htm>

Ingeniería Electrónica (2015). *Tipos de chip MIFARE*. [en línea], consultado 2016, <http://www.fqingenieria.com/es/conocimiento/tipos-de-chips-mifarer-52>

Instituto de Ingeniería UNAM (2014). *HIPERPUMA: Sistema avanzado de información al viajero*. [en línea], consultado 2016, <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Publicaciones/GacetaElectronica/GacetaJunio2014/Paginas/HIPERPUMA.aspx>

Instituto de las Mujeres (2016). *Programa viajemos seguras en el transporte público de la Ciudad de México*. [en línea], consultado 2016, http://www.14.df.gob.mx/virtual/wp_inmujeres/asesorias/victimas-de-violencia-sexual-en-transporte-publico/viajemos-seguras/

Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo (2012). *Transformando la movilidad urbana en México. Hacia ciudades accesibles con menor uso del automóvil*. México.

Instituto Federal de Telecomunicaciones (2015). *Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión*. [en línea], consultado 2016, <http://www.ift.org.mx/que-es-el-ift/ley-federal-de-telecomunicaciones-y-radiodifusion>

Instituto Mexicano del Transporte (2017). *Normativa para la Infraestructura del Transporte*. [en línea], consultado 2017, <http://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#001>

Instituto Mexicano para la Competitividad (2012). *Movilidad competitiva en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: diagnóstico y soluciones factibles*. [en línea], consultado 2016, http://imco.org.mx/wp-content/uploads/2012/1/costos_congestion_en_zmvm2_final_abril.pdf

Instituto Mexicano para la Competitividad (2014). *Índice de Competitividad Estatal 2014*. [en línea], consultado 2016, http://imco.org.mx/indices/documentos/2014_ICE_Libro_Las_reformas_y_los_estados.pdf

Instituto Mexicano para la Competitividad (2016). *Índice de Competitividad Estatal 2016*. [en línea], consultado 2017, <http://imco.org.mx/competitividad/indice-de-competitividad-estatal-2016/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2007). *Encuesta Origen-Destino 2007*. [en línea], consultado 2015, http://bicitekas.org/wp/wp-content/uploads/2013/07/2007_Encuesta_Origen_Destino_INEGI.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010a). *Censo de población y vivienda 2010*. [en línea], consultado 2016, http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/poblacion/2010/panorama_socio/df/panorama_df.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010b). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*. [en línea], consultado 2016, http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Zonas_metropolitanas_2010

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2012). *Relieve*. [en línea], consultado 2016, <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/territorio/relieve.aspx?tema=me&e=09>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015a). *Banco de información económica. Comunicaciones y transportes*. [en línea], consultado 2017, <http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015b). *Vehículos de motor registrados en circulación*. [en línea], consultado 2017, <http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2016a). *PIB entidad federativa-anual*. [en línea], consultado 2017, <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/cn/pibe/tabulados.aspx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2016b). *Sistema de posicionamiento global (GPS)*. [en línea], consultado 2016, <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/gps.aspx?dv=c1>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). *Banco de información económica. Comunicaciones y transportes*. [en línea], consultado 2017, <http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/>

Instituto Nacional de Tecnologías de la Comunicación (2010). *Guía sobre seguridad y privacidad de la tecnología RFID*. Agencia Española de Protección de Datos.

Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (2010). *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*. [en línea], consultado 2016, <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM09DF/index.html>

Intelligent Mechatronic Systems (2016). *Intelligent Transportation Systems-Next Wave of the Connected Car*. [en línea], consultado 2016, <http://www.intellimec.com/intelligent-transportation-systems-next-wave-connected-car/>

Intema Comunicaciones (2017). *Radio Comunicaciones*. [en línea], consultado 2017, <http://www.intema.biz/index.php/radio-comunicaciones/>

Intermec (2007). *Conceptos básicos de RFID: Conocimiento y uso de la identificación por radiofrecuencia*. [en línea], consultado 2016, http://www.intermec.com.mx/learning/content_library/white_papers/localized/wpABC_MX.pdf

Internet Kioskos (2017). *Productos. Hardware. IK22P*. [en línea], consultado 2017, <http://www.internetkioskos.com/ticketing-solutions/21-modelo-ik-22P.html>

Israeli, Y. y Ceder, A. (1993). *Transit Route Design Using Scheduling and Multiobjective Programming Techniques*. Computer-Aided Transit Scheduling, Lisboa, Portugal, p.p. 56-75.

ITS América (2002). *An overview of Transit Signal Priority*. [en línea], consultado 2016, <http://floridaapts.lctr.org/pdf/Overview%20of%20Transit%20Signal%20Priority%20Apr02.pdf>

ITS América (2016). *Intelligent Transportation Society of America*. [en línea], consultado 2016, <http://www.itsa.org/>

ITS Canadá (2016). *About Us*. [en línea], consultado 2016, <https://www.itscanada.ca/about/index.html>

ITS Decision (s.f.). *Singpost-based Automatic Vehicle Location*. [en línea], consultado 2016, http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Tif6uzxKGv6oJ:fresno.ts.odu.edu/newitsd/ITS_Serv_Tech/telecommunication/diagrams/AVL%2520Signpost-based/AVL%2520Signpost-based.htm+&cd=2&hl=es-419&ct=clnk&gl=mx&client=firefox-b

ITS International (2012). *Need for secure approach to connected vehicle technology*. [en línea], consultado 2016, <http://www.itsinternational.com/sections/nafta/features/need-for-secure-approach-to-connected-vehicle-technology/>

ITS Japan (2001). *What is ITS Japan?* [en línea], consultado 2016, http://www.its-jp.org/english/what_its_e/

ITS Products (2015). *Advanced Traveler Information Systems: An ITS revolution*. [en línea], consultado 2016, <http://www.itsproducts.com/advanced-traveler-information-systems/>

Izaurieta, F. y Saavedra, C. (2000). *Redes neuronales artificiales*. [en línea], consultado 2016, http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/36957207/Redes_neuronales.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1476854708&Signature=Qijy4lbH%2BfrtGbRIUQmfm8oqA6c%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DRedes_Neuronales_Artificiales.pdf

Jardón, H. y Linares, R. (1995). *Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas*. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México, D.F.

Jeong, R. y Rilett, L. (2004). *Bus arrival time prediction using artificial neural network model*. IEEE, Intelligent Transportation Systems Conference Washington, D.C., USA, p.p. 988-993.

Jiménez, J. (2012). *Redes neuronales*. [en línea], consultado 2017, <https://prezi.com/xvts5quhvake/redes-neuronales/>

Johar, A., Jain, S. y Garg, P. (2016). *Prediction of bus travel time using ANN: A case study in Delhi*. Transportation Research Procedia 17. p.p. 263-272.

Kenwood (2017a). *NX 240 kenwood*. [en línea], consultado 2017, <http://arci.com.mx/radios-portatiles-kenwood/nx-240-radio-portatil-kenwood/>

Kenwood (2017b). *NX-900*. [en línea], consultado 2017, <http://arci.com.mx/radios-moviles-kenwood/nx-900/>

Kenyon, S. y Lyons, G. (2003). *The value of integrated multimodal traveler information and its potential contribution to modal change*. Transportation Research Part F. p.p. 1-21

Kineled (2016). *Catálogo Pantallas LED*. [en línea], consultado 2016, <http://www.kineled.com/catalogo-pantallas-led>

Kristof, T.; Lowry, M. y Scott, G. (2005). *Assessing the benefits of Traveler and transportation information systems*. Washington State Transportation Center (TRAC).

Kumar, M. y Albert, S. (2005). *A summary of rural intelligent transportation systems. Benefits as applied to ODOT Region 1*. Western Transportation Institute. College of Engineering-Montana State University.

Lara, F. (1996). *Fundamentos de redes neuronales artificiales*. [en línea], consultado 2016, http://conceptos.sociales.unam.mx/conceptos_final/598trabajo.pdf

- LARCON-SIA S.R.L. (s.f.). *Tarjeta de proximidad*. [en línea], consultado 2016, <http://www.larconsia.com/Tarjeta%20de%20proximidad.asp>
- Ledezma, M. (2012). *Bandas de frecuencia utilizadas por los satélites*. [en línea], consultado 2017, http://mariledezma.blogspot.mx/p/blog-page_7847.html
- Lertxundi, G. (2012). *Máxima eficiencia del Transporte Público. Prioridad semafórica para los autobuses de Donostia-San Sebastián*. Conferencia Jornadas AMTU.
- Levinson, D. (2003). *The value of advanced traveler information systems for route choice*. Transportation Research C 11. p. 75-78. Elsevier Science.
- Liu, Y.; Dion, F. y S. Biswas. (2005). *Dedicated short-range wireless Communications for intelligent transportation System applications*. Transportation Research Record.
- Localizadores GPS México (2016). *Localizador para transporte público*. [en línea], consultado 2016, <https://localizadorgpstracker.com.mx/blog/noticias/269-localizador-para-transporte-publico>
- López, H. (2012). *Un plástico para viajar en el Metro y Metrobús con la TarjetaDF*. [en línea], consultado 2016, <http://www.excelsior.com.mx/2012/10/18/comunidad/864946>
- López, J. (2016). *En enero estrenarán semáforos inteligentes en la CDMX*. [en línea], consultado 2017, <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2016/11/07/1126816>
- López, M. (2009). *El transporte de pasajeros y el Sistema vial en la Ciudad de México*. En el libro Régimen Jurídico del urbanismo. Memoria del Primer Congreso de Derecho Administrativo Mexicano.
- Lozano, A. (2016). *Metaheurísticas. Apuntes Análisis y Modelación de Redes de Transporte*. Posgrado de Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Sistemas. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lucas, N. (2016). *AT&T ya empató a Telcel en redes 4G LTE en México*. [en línea], consultado 2017, <http://eleconomista.com.mx/industrias/2016/10/26/att-ya-empato-telcel-disponibilidad-redes-4g-lte>
- Lucas, N. y Pineda, A. (2016). *Uber exprime a sus socios para ser el líder*. [en línea], consultado 2016, <http://eleconomista.com.mx/tecnociencia/2016/03/12/uber-exprime-sus-socios-ser-lider>
- Maccubbin, R. ; Staples, B. ; Kabir, F. ; Lowrance, C. ; Mercer, M. ; Philips, B. y Gordon, S. (2008). *Intelligent Transportation Systems. Benefits, Cost, Deployment, and Lessons Learned*. U.S. Department of Transportation. Research and Innovative Technology Administration.
- MacKechnie, C. (2016). *Automated Passenger Counting (APC) Systems: How do they work?* [en línea], consultado 2016, http://publictransport.about.com/od/Transit_Technology/a/Automated-Passenger-Counting-Apc-Systems-How-Do-They-Work.htm
- Madera, C. (2007). *Predicting Where the Traffic Will Flow*. [en línea], consultado 2016, <http://www.planetizen.com/node/26091>
- Mahdi, S., Shariat, A. y Ceder, A. (2014). *Optimal Modification of Urban Bus Network Routes Using a Genetic Algorithm*. Journal of Transportation Engineering. Vol. 141.

- Mahonkin.com (2016). *What is dot-pitch anyway?* [en línea], consultado 2016, <http://www.mahonkin.com/~milktree/dot-pitch/dot-pitch.html>
- Marsh Products (2000). *The basics of loop vehicle detection*. [en línea], consultado 2016, <http://www.marshproducts.com/pdf/Inductive%20Loop%20Write%20up.pdf>
- Martínez, G. y Méndez, G. (2014). *Sistemas eléctricos, una visión limpia del transporte público*. [en línea], consultado 2017, <http://www.comunicaciencia.uam.mx/octubre2014/c17.html>
- Mateos, E. (2016). *GLONASS, qué es y cuándo usarlo*. [en línea], consultado 2017, <https://www.correrunamaraton.com/glonass-que-es-uso/>
- Matich, D. (2001). *Redes neuronales: conceptos básicos y aplicaciones*. [en línea], consultado 2016, https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/orientadora1/monogriais/matich-redesneuronales.pdf
- Mauttone, A.; Cancela, H. y Urquhart, M. (2002). *Diseño y optimización de rutas y frecuencias en el transporte colectivo urbano, modelos y algoritmos*. Departamento de Investigación Operativa, Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Mauttone, A.; Cancela, H. y Urquhart, M. (2005). *Optimización de recorridos y frecuencias en Sistemas de Transporte Público Urbano Colectivo*. Tesis de Maestría en Informática, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- McCann, B. (2014). *A review of SCATS operation and deployment in Dublin*. Intelligent Transportation Systems, Dublin, Wood Quay.
- Media Lab (2016). *Señalización digital. Sistemas de Cartelería Electrónica*. [en línea], consultado 2017, <http://lhymo.com/index.php/servicios/senalizacion-digital>
- Mediamobile (2013). *The Company*. [en línea], consultado 2016, <http://www.mediamobile.com/index.php/en/who-we-are>
- Medina, J. (2008). *La Telemática es la esencia de las telecomunicaciones*. [en línea], consultado 2017, http://coitt.es/res/revistas/05a_Telematica.pdf
- Mejía, M. (2016). *Sensores de movimiento*. [en línea], consultado 2016, <https://seguridadprimero.wordpress.com/configurando-su-sistema-de-seguridad/parte-4-sensores-de-movimiento-de-tecnologia-dual/>
- Metro Infrasy (2014). *Parking Management System*. [en línea], consultado 2016, <http://www.metroinfrasy.com/solution/urban-its/parking-management-guidance-system/>
- Metrobús (2014). *Informe de cuenta pública 2014*. [en línea], consultado 2016, http://www.metrobus.cdmx.gob.mx/transparencia/documentos/art14/X/E/Cuenta14_E.pdf
- Metrobús (2015). *Metrobús Informe Anual 2015*. [en línea], consultado 2016, http://www.metrobus.cdmx.gob.mx/transparencia/documentos/art14/XIX/CD_3a-2015.pdf
- Metrobús (2016a). *Fichas técnicas*. [en línea], consultado 2016, <http://www.metrobus.df.gob.mx/fichas.html>

- Metrobús (2016b). *Preguntas frecuentes*. [en línea], consultado 2017, <http://data.metrobus.cdmx.gob.mx/faq.html>
- Metrobús (2016b). *Tarifa y pago*. [en línea], consultado 2016, http://www.metrobus.cdmx.gob.mx/tarifa_pago.html#tarjeta
- Metrobús (2017). *Línea 7*. [en línea], consultado 2017, <http://interactivo.eluniversal.com.mx/2016/metrobus-17/>
- Metropolitan Transportation Authority (2016a). *MTA Subway Time*. [en línea], consultado 2016, <http://apps.mta.info/traintime/>
- Metropolitan Transportation Authority (2016b). *MTA Bus Time*. [en línea], consultado 2016, <http://bustime.mta.info/>
- Microsharp Software Technologies (2016). *Scoot software*. [en línea], consultado 2016, <http://www.mxroad.com/scoot-software-1871651.html>
- Microsoft (2015). *Definición y descripción de un píxel*. [en línea], consultado 2016, <https://support.microsoft.com/es-es/kb/253680>
- Microsoft Environment (2009). *Fiat desarrolla una nueva forma de interactuar con los conductores*. [en línea], consultado 2016, https://www.microsoft.com/spain/medioambiente/software_showcase/articles/eco_drive.aspx
- MIFARE (2016). *MIFARE Classic*. [en línea], consultado 2016, http://www.nxp.com/products/identification-and-security/mifare-ics/mifare-classic:MC_41863
- Ministerio de Fomento Español (2010). *Los Sistemas Inteligentes de Transportes. Su aplicación a los modos terrestre, marítimo y aéreo*. Gobierno de España. Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica.
- Ministerio de Transporte de Ontario (2007). *Ontario Traffic Manual*. [en línea], consultado 2017, http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/per/0980389/19_Book_19.pdf
- Mishra, A. (ed.). (2007). *Advanced Cellular Network Planning and Optimisaion*. John Wiley & Sons Ltd., The Atrium, Southern Gate, Chichester, England.
- Mitta, D.; Kelly, M. y Folds, D. (1996). *Design of an ITS-level Advanced Traffic Management System, a human factors perspective*. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration.
- Molinero, A. y Sánchez, L. (1997). *Transporte público: planeación, diseño, operación y administración*. Universidad Autónoma del Estado de México, Coordinación General de Investigación y Posgrado, México.
- Morales, C. (2007). *Transmisión de datos utilizando dispositivos móviles*. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo. ISSN 2007-2619.
- Morales, C. (2016). *ABC para entender el proyecto de Red Compartida*. [en línea], consultado 2017, <https://www.forbes.com.mx/abc-forbes-para-entender-el-proyecto-de-red-compartida/#gs.uEZxWuU>

Moreira, K. (2014). *Sistemas de comunicaciones móviles*. [en línea], consultado 2017, <https://es.slideshare.net/edu395090/sistema-de-comunicaciones-moviles>

Morelia.gob.mx (2016). *Sistema de Control de Movilidad Vehicular otorga seguridad a medios alternativos de transporte*. [en línea], consultado 2017, <http://morelia.gob.mx/index.php/lista-de-comunicados/3715-sistema-de-control-de-movilidad-vehicular-otorga-seguridad-a-medios-alternativos-de-transporte-antonio-plaza>

Motorola (2017a). *Dep 450*. [en línea], consultado 2017, <http://arci.com.mx/radios-portatiles-motorola/dep-450-radio-portatil-motorola/>

Motorola (2017b). *Dmg 4100+*. [en línea], consultado 2017, <http://arci.com.mx/radios-moviles-motorola/dgm4100/>

Motorola Solutions (2013). *Soluciones Tetra de Motorola*. Motorola Solutions Inc.

Mundo TETRA (2014). *La importancia de la integración*. [en línea], consultado 2016, <http://mundotetra.com/es/>

Muñoz, M. (2004). *TETRA: el mejor sistema de comunicaciones para servicios de emergencia y seguridad ciudadana*. [en línea], consultado 2016, http://www.belt.es/expertos/HOME2_experto.asp?id=1990

National Agency for Automotive Safety & Victim's Aid (2016). *Advanced Safety Vehicle (AVS) Technology Put to Practical Use*. [en línea], consultado 2016, http://www.nasva.go.jp/mamoru/en/assessment_car/asv.html

Next Points (2016). *Sensor 3D EasyOne*. [en línea], consultado 2016, <http://www.cuenta-personas.es/sensores/>

Ngamchai, S. y Lovell, D.J. (2000). *Optimal Time Transfer in Bus Transit Route Network Design Using a Genetic Algorithm*. Computer-Aided Scheduling of Public Transport, Berlín, Alemania.

Nicuesa, M. (2016). *¿Para que sirven las encuestas de satisfacción del cliente?* [en línea], consultado 2017, <http://empresariados.com/para-que-sirven-las-encuestas-de-satisfaccion-del-cliente/>

Noonan, J. y Shearer, O. (1998). *Advanced Traveler Information Systems*. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Washington, D.C.

NR Tec Desarrollos Tecnológicos (2016). *Prepago en el Transporte Público*. [en línea], consultado 2016, <http://www.nrtec.com.mx/prepago.html>

Núñez, M. (2016). *¿Qué es el 5G y cómo hará tu vida más sencilla?* [en línea], consultado 2017, <http://es.gizmodo.com/que-es-el-5g-y-como-hara-tu-vida-mas-sencilla-explicad-1761270138>

Ohene, F. y Kaseko M. (1998). *System selection, benefits, and financial feasibility of implementing an advanced public transportation system*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Volumen 1618.

Oki Electric Industry (2011). *Vehicle Information and Communication System*. [en línea], consultado 2016, <https://www.oki.com/jp/SSC/ITS/eng/vics.html>

Olmedillas, J. (2012). *Introducción a los sistemas de navegación por satélite*. Editorial UOC, Barcelona, España.

Olvera, J.; Sara, C.; Mancera, M.; Reséndiz, H. y Chías, L. (2014). *Infraestructuras de datos espaciales y normatividad geográfica en México: una perspectiva actual*. Colección: Geografía para el siglo XXI. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.

Omnitracs (2016). *Omnitracs, innovation driven*. [en línea], consultado 2016, <http://www.omnitracs.com/mx/>

Ontario (2017). *Traveller Information Services*. [en línea], consultado 2017, <http://www.mto.gov.on.ca/english/traveller/trip/map.shtml>

ONU-Hábitat (2015). *Reporte nacional de movilidad urbana en México 2014-2015*. México, Distrito Federal.

Oocities (2016). *Principio de funcionamiento de las pantallas de cristal líquido (LCD)*. [en línea], consultado 2016, www.oocities.org/vifibio/06PRINCIPIODEFUNCIONAMIENTOOLCD.PDF

Optimovilidad (2017). *Contador de pasajeros*. [en línea], consultado 2017, http://www.optimovilidad.com/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=150

Optral (s.f.). *Tipos de fibra óptica*. [en línea], consultado 2017, <http://platea.pntic.mec.es/~lmarti2/optral/cap2/fibra-5.htm>

OSPT (2016). *El estándar abierto CIPURSE (CIPURSE Open Standard)*. [en línea], consultado 2016, http://www.osptalliance.org/the_standard

Padmanaban, R.; Vanajakshi, L. y Subramanian, S. (2009). *Automated delay Identification for bus travel time prediction towards APTS applications*. Second International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology.

Páramo, A. (2015). *Se acerca fin de la Red de Transportes de Pasajeros del DF*. [en línea], consultado 2016, <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2015/11/13/1057051>

Park Milwaukee (2016). *Map Search*. [en línea], consultado 2016, <http://www.parkmilwaukee.com/>

Patnaik, J.; Chien, S. y Bladikas, A. (2004). *Estimation of Bus Arrival Times Using APC Data*. Journal of Public Transportation.

Paz, M. (2014). *Por qué Londres es un ejemplo mundial en transporte público*. [en línea], consultado 2016, http://www.eldefinido.cl/actualidad/mundo/2948/Por_que_Londres_es_un_ejemplo_mundial_en_transporte_publico/

Pazos, F. (2015). *Paran servicio 60 trolebuses; descartan sustitución*. [en línea], consultado 2016, <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2015/10/21/1052302>

Pelletier, M.; Trépanier, M. y Morency, C. (2010). *Smart card data use in public transit: A literature review*. Transportation Research Part C. p.p. 557-568.

Peng, Z.; Beimborn, E. y Neluheni, M. (2000). *A Framework for the evaluation of the benefits of Intelligent Transportation Systems*. Center for Urban Transportation Studies. University of Wisconsin-Milwaukee.

Perallos, A.; Hernández, U.; Onieva, E. y García, I. (2016). *Intelligent Transport Systems. Technologies and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd. Reino Unido.

Pérez, G. (2001). *Nuevas tecnologías de Información y Telecomunicaciones en el Sector Transporte*. Boletín FAL de la CEPAL. [en línea], consultado 2016, <http://www.cec.uchile.cl/~tranvivo/tranvia/tv9/cepal.html>

Pérez, J. y Gardey, A. (2012a). *Cable UTP*. [en línea], consultado 2017, <http://definicion.de/cable-utp/>

Pérez, J. y Gardey, A. (2012b). *Latencia*. [en línea], consultado 2017, <http://definicion.de/latencia/>

Pérez, J. y Gardey, A. (2012c). *Modulación*. [en línea], consultado 2017, <http://definicion.de/modulacion/>

Piacente, P. (2011). *Sensores ópticos optimizan la seguridad de los trenes de alta velocidad chinos*. [en línea], consultado 2016, http://www.tendencias21.net/Sensores-opticos-optimizan-la-seguridad-de-los-trenes-de-alta-velocidad-chinos_a7025.html

Planetpin (2015). *Vehicle Telematics*. [en línea], consultado 2016, <http://www.planetpin.com/vehicle-telematics/>

Ponsa, P. y Granollers, A. (s.f.). *Diseño de sala de control*. [en línea], consultado 2017, <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:8Rt38ldeUkJ:www.epsevg.upc.edu/hcd/material/lecturas/salacontrol.pdf+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=mx>

Portal de Estadística Universitaria UNAM (2017). *La UNAM en números 2016-2017*. [en línea], consultado 2017, <http://www.estadistica.unam.mx/numeralia/>

PosiTrace (2016). *Rastreo GPS y gestión de flotas*. [en línea], consultado 2016, http://tracking.positrace.com/esp-gps-tracking-f1/?country=mexico&source=google_adwords&gclid=Cj0KEQiAkO7CBRDeqJ_ahuiPrTEBEiQAbYupJQdybChQ93cmRz-8fzrCaxhYg31JhGliKMzPI5Lxsg0aAsDO8P8HAQ

PosiTracker (2016). *PosiTracker XTOBD*. [en línea], consultado 2016, <https://www.positrace.com/es/gps-tracking-solutions/devices/positrackerxtobd>

Proyectos y Control SAC (2014). *Pantallas murales LCD Series OverView-BARCO*. [en línea], consultado 2017, <http://www.procont.com.pe/es/barco/pantallas-murales-lcd.html>

Purcell, B. (2013). *City Driving and Parking*. [en línea], consultado 2016, <http://www.gettingaroundgermany.info/parken.shtml#parking>

Racca, D. (2004). *Cost and benefits of Advanced Public Transportation Systems*. Centro de Transporte de Delaware. Universidad de Delaware.

Ramakrishna, Y.; Ramakrishna, P.; Lakshmanan, V. y Sivanandan, R. (2006). *Bus travel time prediction using GPS data*. [en línea], consultado 2016, [http://www.gisdevelopment.net/proceedings/mapindia/2006 /student% 20oral/mi06stu_84.htm](http://www.gisdevelopment.net/proceedings/mapindia/2006/student%20oral/mi06stu_84.htm)

Red de Transporte de Pasajeros (2016a). *Servicios*. [en línea], consultado 2016, <http://www.rtp.gob.mx/servicios.html>

Red de Transporte de Pasajeros (2016b). *La Red de Transporte de Pasajeros se actualiza y se convierte en el Sistema de Movilidad 1 de la CDMX*. [en línea], consultado 2016, <http://www.rtp.gob.mx/boletin/M1.pdf>

Requiz, R. (2009). *Señales en banda base*. [en línea], consultado 2017, <http://sealesdebandabase.blogspot.mx/>

Reséndiz, H. (2004). *Los Sistemas de Información Geográfica y su Aplicación en la Ingeniería Civil*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores de Acatlán. Universidad Nacional Autónoma de México.

Rivas, L.; Chávez, J.; Maldonado, B.; Chávez, A.; Carmona, S.; Cienfuegos, E. y Molina, D. (2007). *Incentivos y desincentivos en los sistemas de transporte público en Londres, Madrid y la Ciudad de México*. INNOVAR. Revista de Ciencias Administrativas y Sociales, julio-diciembre, p.p. 113-131.

Robles, J. (2014). *Modernización, el reto del Metro a sus 45 años*. [en línea], consultado 2016, <http://archivo.eluniversal.com.mx/ciudad-metropoli/2014/modernizacion-el-reto-del-metro-a-sus-45-anos-1035420.html>

Rodríguez, A. (2012). *Historia de la fibra óptica (II)*. [en línea], consultado 2017, <http://www.cablesyconectoreshoy.com/historia-de-la-fibra-optica-ii/>

Roldán, I. y Rodríguez, J. (2010). *Análisis de procesos en un Centro de Control de Tráfico Urbano*. Tesis de Especialidad. Ingeniería Técnica de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Cataluña.

Rouse, M. (2016). *Red de área local (LAN)*. [en línea], consultado 2017, <http://searchdatacenter.techtarget.com/es/definicion/Red-de-area-local-LAN>

Rural ITS (2016). *What is rural ITS?* [en línea], consultado 2016, <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:-it4Kwd3C9UJ:www.ruralits.org/&num=1&hl=es&gl=mx&strip=0&vwsrc=0>

Rye, T. (comp.). (2006). *Intelligent Transport Systems*. Proyecto COMPETENCE. Intelligent Energy Europe.

Sáez, D.; Cortés, C.; Milla, F.; Núñez, A.; Tirachini, A. y Riquelme, M. (2012). *Hybrid predictive control strategy for a public transport system with uncertain demand*. Transportmetrica, p.p. 61-86.

- Salas, R. (2004). *Redes neuronales artificiales*. [en línea], consultado 2016, http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/37429671/Redes_Neuronales_Artificiales.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1476855140&Signature=RDKB37PLcM1%2BiLhO4ad7RWTRBZk%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DRedes_Neuronales_Artificiales.pdf
- Salazar, F. (2013). *¿Qué es la telemática? ¿Para qué sirve?* [en línea], consultado 2017, <http://dudasinformaticass.blogspot.mx/>
- Saldívar, C. (2009). *Metrobús en el D.F.* [en línea], consultado 2017, <http://revista-porque.blogspot.mx/2009/04/metrobus-en-ciudad-de-mexico-vialidad-o.html>
- Samsung (2013). *Qué son NFC y las pegatinas TecTiles de Samsung*. [en línea], consultado 2016, <http://www.samsung.com/es/article/que-son-nfc-y-las-pegatinas-tectiles-de-samsung>
- Sánchez, A. (2016). *¿Cómo funciona un monitor LED o LCD?* [en línea], consultado 2016, <http://computadoras.about.com/od/comprar-computadora/a/Led-O-Lcd-Cual-Comprar.htm>
- Sanchis, A.; Ledezma, A.; Iglesias, J.; García, B. y Alonso, J. (2006). *Complejidad computacional*. [en línea], consultado 2016, <https://es.scribd.com/document/318934342/Complejidad-Computacional>
- Sandoval, A. (2014). *Hyundai 2014: nuevos modelos con EcoDrive*. [en línea], consultado 2016, <http://noticias.demotores.com.co/hyundai-2014/>
- Santa Cruz, O. (s.f.). *Módulo introductorio: Principios generales del sistema de fibra óptica*. [en línea], consultado 2016, <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/PlanteIExterior/IntroduccionResumen%20FO.pdf>
- Sayeg, P. y Charles, P. (2006). *Sistemas de Transporte Inteligentes*. Deutsche Gessellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). Eschborn, Alemania.
- SCATS (2016). *Software Options*. [en línea], consultado 2016, <http://www.scats.com.au/packages-software-options.html>
- Schnitzler, S. (s.f.). *Fibras ópticas*. [en línea], consultado 2016, <http://www.yio.com.ar/fo/indiceref.html>
- Science and Technology Options Assessment (2014). *Integrated urban e-ticketing for public transport and touristic sites*. European Parliamentary Research Service (EPRS).
- SCT Vial (2017). *Sistema de control de tránsito. ¿Cómo funciona?* [en línea], consultado 2017, <http://www.sctvial.com/como-funciona>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1999). *Normatividad para la Infraestructura del Transporte*. [en línea], consultado 2017, <http://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#1>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2012). *N-OPR-CAR-3-01/12. Operación. Carreteras. Sistemas de Información de Carreteras. Obtención y Presentación de Datos Geoespaciales*.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2013a). *N-EIP-1-01-007/13*. Características de los Equipos y Sistemas de Instalación Permanente. Calidad de los Equipos y Sistemas. Sistemas Inteligentes de Transporte. Antenas de Telepeaje.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2013b). *N-EIP-1-01-008/13*. Características de los Equipos y Sistemas de Instalación Permanente. Calidad de los Equipos y Sistemas. Sistemas Inteligentes de Transporte. Transpondedores de Telepeaje.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2013c). *N-EIP-2-01-001/13*. Características de los Equipos y Sistemas de Instalación Permanente. Protocolos de Comunicación. Sistemas Inteligentes de Transporte. Protocolos de Comunicación para Tableros de Señalamiento Variable con LED's.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2014a). *¿Quiénes somos y qué hacemos?* [en línea], consultado 2016, <http://www.sct.gob.mx/despliega-noticias/article/quienes-somos-y-lo-que-hacemos/>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2014b). *N-EIP-1-01-002/14*. Características de los Equipos y Sistemas de Instalación Permanente. Calidad de los Equipos y Sistemas. Sistemas Inteligentes de Transporte. Tableros de Señalamiento Cambiable con LED's.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2014c). *N-EIP-1-01-003/14*. Características de los Equipos y Sistemas de Instalación Permanente. Calidad de los Equipos y Sistemas. Sistemas Inteligentes de Transporte. Tableros de Señalamiento de Encendido-Apagado con LED's.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2014d). *N-EIP-1-01-010/14*. Características de los Equipos y Sistemas de Instalación Permanente. Calidad de los Equipos y Sistemas. Sistemas Inteligentes de Transporte. Cámaras de Video para Vigilancia.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2014e). *N-EIP-1-01-011/14*. Características de los Equipos y Sistemas de Instalación Permanente. Calidad de los Equipos y Sistemas. Sistemas Inteligentes de Transporte. Cámaras de Video para Reconocimiento de Placas.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2014f). *N-EIP-1-01-012/14*. Características de los Equipos y Sistemas de Instalación Permanente. Calidad de los Equipos y Sistemas. Sistemas Inteligentes de Transporte. Cámaras de Video para Detección Automática de Incidentes.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2014g). *N-EIP-1-01-015/14*. Características de los Equipos y Sistemas de Instalación Permanente. Calidad de los Equipos y Sistemas. Sistemas Inteligentes de Transporte. Lazos Inductivos.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2015a). *N-EIP-1-01-009/15*. Características de los Equipos y Sistemas de Instalación Permanente. Calidad de los Equipos y Sistemas. Sistemas Inteligentes de Transporte. Unidad Central de Procesamiento del Sistema de Telepeaje.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2015b). *N-EIP-1-01-013/15*. Características de los Equipos y Sistemas de Instalación Permanente. Calidad de los Equipos y Sistemas. Sistemas Inteligentes de Transporte. Unidad Central de Procesamiento del Sistema de Pesaje Dinámico y Dimensionamiento Vehicular.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2016). *Reformas. Reporte actualizado de avances*. [en línea], consultado 2017, <https://www.gob.mx/sct/reformas/reportes-actualizado-de-avances>

Secretaría de Desarrollo Económico (2015). *Reporte Económico de la Ciudad de México*. [en línea], consultado 2017,

http://reporteeconomico.sedecodf.gob.mx/pdf/Reporte%20Econ%C3%B3mico%20de%20la%20CDMX_2015%20anual.pdf

Secretaría de Economía (2015). *Indicadores*. [en línea], consultado 2016, http://mim.promexico.gob.mx/wb/mim/seleccion_de_indicadores

Secretaría de Medio Ambiente (2016). *Programa temporal Hoy No Circula*. [en línea], consultado 2016, <http://www.sedema.df.gob.mx/sedema/index.php/verificacion-hoy-no-circula/hoy-no-circula/por-que-se-modernizo-el-programa-hoy-no-circula>

Secretaría de Medio Ambiente (2017). *Verificación Vehicular*. [en línea], consultado 2017, <http://www.sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/verificacion-vehicular>

Secretaría de Movilidad (2015). *A cerca de SEMOVI*. [en línea], consultado 2016, <http://www.semovi.df.gob.mx/wb/stv/estructura.html>

Secretaría de Movilidad (2016). *Historia del Transporte*. [en línea], consultado 2016, http://www.semovi.cdmx.gob.mx/wb/stv/cinco_siglos_de_transporte_en_la_ciudad_de_mexico/_rid/71-page=5.html

Secretaría de Seguridad Pública (2016). *SSP-CDMX se apoya en nuevas tecnologías para garantizar movilidad y brindar seguridad vial*. [en línea], consultado 2017, <http://www.ssp.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/1344-ssp-cdmx-se-apoya-en-nuevas-tecnologias-para-garantizar-movilidad-y-brindar-seguridad-vial>

Secretaría de Seguridad Pública (2017). *Subsecretaría de Control de Tránsito*. [en línea], consultado 2017, <http://www.ssp.df.gob.mx/transito.html>

Secretaría del Trabajo y Previsión Social (2017). *Información Laboral*. [en línea], consultado 2017, www.stps.gob.mx/gobmx/estadisticas/pdf/perfiles/perfil%20distrito%20federal.pdf

Secretaría Universitaria UNAM (2017). *Mapa de los campus UNAM*. [en línea], consultado 2017, <https://www.unam.mx/transporte/mapa-de-los-campus-unam>

Seguí, J. y Martínez, M. (2004). *Los Sistemas Inteligentes de Transporte y sus efectos en la movilidad urbana e interurbana*. Revista electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Universidad de Barcelona. Vol. VI, núm. 170 (60), 1 de agosto de 2004.

Seguridad Electrónica (2008). *Cámaras análogas vs cámaras digitales*. [en línea], consultado 2016, <http://blogdeseguridadelectronica.blogspot.mx/2008/09/vs-anlogas-los-sistemas-de-monitoreo.html>

SEMEX (2016). *Nuestros productos*. [en línea], consultado 2016, <http://www.semex.com.mx/index.php/empresa/filosofia/>

Seoul Solution (2016). *Establishment of support System for public transportation operation and improvement of facilities and vehicles*. [en línea], consultado 2016, <https://seoulsolution.kr/en/content/seoul-public-transportation-reform-0>

Servicios de Transportes Eléctricos del Distrito Federal (2015). *Servicios*. [en línea], consultado 2016, <http://www.ste.df.gob.mx/index.html?page=5>

- Servicios TIC, (2004). *Definición de TIC*. [en línea], consultado 2016, <http://www.serviciostic.com/las-tic/definicion-de-tic.html>
- Shenzhen Coban Electronics (2017). Perseguidor del GPS Vehicle/CAR. [en línea], consultado 2017, http://es.made-in-china.com/co_cncoban/product_2017-Newest-Tk105-RFID-Car-Vehicle-GPS-Tracker-Google-Map_essesyhg.html
- Siemens (2004). *Línea 9 del Metro de Barcelona*. [en línea], consultado 2017, http://w5.siemens.com/spain/web/es/ic/logistica/Pages/metro_L9.aspx
- Siemens (2015). *Los autobuses Volvo y Siemens firman un acuerdo global sobre Sistemas de autobuses eléctricos*. [en línea], consultado 2016, <http://www.siemens.com.mx/cms/mam/press/Documents/Boletines-Prensa-Siemens-2015/Volvo-Siemens-2015.pdf>
- Siemens (2016a). *SCOOT Adaptive Control Software*. [en línea], consultado 2016, <http://w3.usa.siemens.com/mobility/us/en/urban-mobility/road-solutions/adaptive-software/Pages/scoot.aspx>
- Siemens (2016b). *Siemens Mesoamérica, acerca de nosotros*. [en línea], consultado 2016, <http://www.siemens.com.mx/cms/mam/about/Pages/aboutus.aspx>
- Sigma (2016). *Thermal Kinetics*. [en línea], consultado 2016, <http://sigma-data.com/contador-de-personas-irisys-gazelle-dualview-gazelle-thermal/>
- Singh, S. y Sharma, U. (2012). *Application of Advanced Parking Management System Techniques - a case of study*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Volumen 3, p.p. 24-28.
- Sistema de Control de Tránsito (2017). *Características principales*. [en línea], consultado 2017, <http://www.sctvial.com/>
- Sistema de Transporte Colectivo Metro (2013). *Informes del STC*. [en línea], consultado 2016, <http://www.metro.df.gob.mx/imagenes/organismo/informes/2013/comparencia1.pdf>
- Sistema de Transporte Colectivo Metro (2014a). *Etapas de construcción*. [en línea], consultado 2016, <http://www.metro.cdmx.gob.mx/operacion/index.html>
- Sistema de Transporte Colectivo Metro (2014b). *Parque vehicular*. [en línea], consultado 2016, <http://www.metro.cdmx.gob.mx/operacion/index.html>
- Sistema de Transporte Colectivo Metro (2015a). *Comparación de afluencia total*. [en línea], consultado 2017, <http://www.metro.cdmx.gob.mx/operacion/compaflu.html>
- Sistema de Transporte Colectivo Metro (2015b). *Mapa de la red del Sistema de Transporte Colectivo*. [en línea], consultado 2016, <http://www.metro.df.gob.mx/red/index.html>
- Sistema de Transporte Interno Pumabús (2014). *Rutas*. [en línea], consultado 2017, <http://www.pumabus.unam.mx/rutas.html>
- Sistemas de Conteo de Personas (2015a). *División Transporte*. [en línea], consultado 2016, http://sisconper.com/productos_transporte.html

Sistemas de Conteo de Personas (2015b). *Eficiente la operación sobre el flujo de pasajeros transportados y recupere hasta un 30% en sus ingresos*. [en línea], consultado 2016, <http://sisconper.com/transporte.html>

Skynet Security Systems (2009). *CCTV y Control de acceso*. [en línea], consultado 2016, <http://cctvseguridad.com.mx/cctv.html>

Skyscrapercity (2016). *Tahrir Underground Car Park*. [en línea], consultado 2016, <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?p=122165128>

Smart Card Alliance (2015). *Consideraciones para el desarrollo de pagos abiertos en los Sistemas de Transporte Público en América Latina y el Caribe*. Ciudad de Panamá, República de Panamá.

Smash Media (2017). *¿Qué tipos de dispositivos móviles hay?* [en línea], consultado 2017, <http://smash-media.blogspot.mx/2012/04/que-tipos-de-dispositivos-moviles-hay.html>

Smith, L. (2016). *Rural ITS*. [en línea], consultado 2016, http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:AQhdf458qVoJ:fresno.ts.odu.edu/newitsd/ITS_Serv_Tech/rural_its/rural_its_summary_print.htm+&cd=4&hl=es&ct=clnk&gl=mx

Sociedad Ibérica de Construcciones Eléctricas, S.A. (2017). *Sistema de transporte del Campus en la Universidad de Ryhad*. [en línea], consultado 2017, <http://www.sice.com/proyectos-relevantes/sistema-de-transporte-del-campus-de-la-universidad-de-riyadh>

Solera, A. (2003). *El filtro de Kalman*. Banco Central de Costa Rica, División de Economía, Departamento de Investigaciones Económicas.

Sony (2016). *Contactless convenience with Sony's FeliCa*. [en línea], consultado 2016, <http://www.sony.net/Products/felica/about/>

Southwest Research Institute (2016). *Advanced Traffic Management Systems*. [en línea], consultado 2016, <http://www.swri.org/4org/d10/isd/atms/>

Spitzer (2000). *¿Qué es el infrarrojo?* [en línea], consultado 2016, <http://legacy.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/ir/infrared.html>

Starfinder Bus (2013). *GPS y Contador de pasajeros*. [en línea], consultado 2017, <http://www.autoprotegido.com/rastreo-gps/contador-conteo-pasajeros-autobuses-rastreo-satelital-gps.html>

Suárez, G. (2016). *En vigor, proceso de revisión de unidades de Uber*. [en línea], consultado 2016, <http://www.eluniversal.com.mx/articulo/metropoli/cdmx/2016/08/13/en-vigor-proceso-de-revision-de-unidades-de-uber>

Suárez, M. y Delgado, G. (2015). *Entre mi casa y mi destino. Movilidad y transporte en México*. Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 2015.

Sussman, J. M. (2002). *Transitions in the world of transportation: a systems view*. Transportation Quarterly, Vol. 56. Eno Transportation Foundation, Washington, DC.

Sussman, J. M. (2005). *Perspectives on Intelligent Transportation Systems*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.

Swarco (2016). *Pantallas de información de pasajeros*. [en línea], consultado 2016, <https://www.swarco.com/latinamerica/Productos/Transporte-p%C3%ABlico/Pantallas-de-informaci%C3%B3n-de-pasajeros/Pantallas-de-informaci%C3%B3n-de-pasajeros2>

Takeyama, M. y Sakamoto, K. (1996). *The Japan Road Traffic Information Center and its service system*. [en línea], consultado 2016, <https://trid.trb.org/view.aspx?id=462148>

Taniguchi, H. (2012). *ITS Radiocommunications in Japan*. Progress Report Ministry of Internal Affairs and Communications (MIC), Japón.

Tarrió, J. (2014). *Cómo funcionan las tarjetas de banda magnética*. [en línea], consultado 2016, <http://jacobotarrio.org/es/know/como-funcionan-las-tarjetas-de-banda-magnetica>

TECRO Consultores (2017). *Implementación Sistemas*. [en línea], consultado 2017, <http://www.tecro.cl/service3.aspx>

Tec Review (2016). *Galileo, el sistema de navegación que va contra el GPS*. [en línea], consultado 2017, <http://tecreview.itesm.mx/galileo-el-sistema-de-navegacion-que-va-contra-el-gps/>

Teltonika (2017). *Localizadores GPS para coche*. [en línea], consultado 2017, <http://www.espiamos.com/fmb-920-localizador-gps-con-antenas-internas-y-bateria-de-respaldo.html>

Temsa (2012). *Temsa Transporte*. [en línea], consultado 2016, <http://gerimx.wixsite.com/temsa/barras-contadoras>

The International Press & Media Group (2016). *Transport for London*. [en línea], consultado 2016, <http://archives.theinternational.org.uk/2015/12/29/london-bus-stops-embrace-e-paper/>

Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson Education, México.

TomTom (2012). *Tráfico histórico y en tiempo real*. [en línea], consultado 2016, http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:j5m3J9K_YdIJ:www.tomtom.com/lib/doc/licensing/RTTHT.SP.pdf+&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=mx

Toposervic (2016). *Como funciona el sistema GPS Diferencial*. [en línea], consultado 2017, <http://toposervic.com/gps-diferencial/>

Torres, L. (2008). *Redes neuronales*. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial. Universidad Nacional de Colombia.

Toyota (2013). *World Congress on Intelligent Transport Systems*. [en línea], consultado 2016, http://www.toyota-global.com/innovation/intelligent_transport_systems/world_congress/

Trafictec (2016). *Controlador de semáforos modelo GTC8*. [en línea], consultado 2016, http://www.trafictec.com/controlador_GTC8.php

Transit Cooperative Research Program (2008). *Use of electronic passenger information signage in transit*. Federal Transit Administration (TCRP Synthesis 104).

Transport for London (2006). *Bus priority at traffic signals keeps London's buses moving*. Bus Priority Team.

Transport for London (2016). *Oyster*. [en línea], consultado 2016, <https://tfl.gov.uk/fares-and-payments/oyster>

Transport Simulation System (2015). *TSS*. [en línea], consultado 2016, <https://www.aimsun.com/?lang=es>

Uber (2016). *¿Cómo funciona Uber?* [en línea], consultado 2016, <https://help.uber.com/es/h/738d1ff7-5fe0-4383-b34c-4a2480efd71e>

Unión Internacional de Telecomunicaciones (2000). *Sistemas de información y control para transportes-comunicaciones especializadas de corto alcance*. [en línea], consultado 2016, https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:LLCunZgh9BsJ:https://www.itu.int/dms_public/itu-r/rec/m/R-REC-M.1453-0-200005-S!!MSW-S.doc+&cd=6&hl=es-419&ct=clnk&gl=mx&client=firefox-b

Universidad Nacional Autónoma de México (2011). *Oferta académica. Licenciatura*. [en línea], consultado 2017, <http://oferta.unam.mx/carreras/69/ciencias-de-la-computacion>

University of Michigan Transportation Research Institute (2013). *Advanced Traffic Management Systems*. [en línea], consultado 2016, <http://www.umtri.umich.edu/our-focus/advanced-traffic-management-systems>

University of Missouri (1998). *Precision Agriculture: Global Positioning System (GPS)*. [en línea], consultado 2016, <http://extension.missouri.edu/p/wq452>

U.S. Department of Homeland Security (2017). *GPS Constellation status for 02/16/2017*. [en línea], consultado 2016, <https://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>

UTN (s.f.). *Red digital de servicios integrados*. [en línea], consultado 2016, <http://www1.frm.utn.edu.ar/comunicaciones/isdn.html>

V-Traffic (2016). *L'information traffic en temps réel*. [en línea], consultado 2016, <http://www.v-traffic.com/>

Valadez, D. (2015). *Estado de GNSS-Parte 1: Modernización de GPS*. [en línea], consultado 2016, <http://effigis.com/es/estado-de-gnss-parte-1-modernizacion-de-gps/>

Valverde, G. (2011). *Evolución de la tecnología móvil*. [en línea], consultado 2017, <http://linkea.do/evolucion-de-la-tecnologia-movil-1g-2g-3g-4g/>

Vargas, Y. (2013). *Cable coaxial, fibra óptica*. [en línea], consultado 2017, <https://es.slideshare.net/jaiva927/cable-coaxial-grueso-y-fino>

Vargas, J. (2016). *Características del cable coaxial grueso y fino*. [en línea], consultado 2017, <https://es.slideshare.net/jaiva927/cable-coaxial-grueso-y-fino>

Varinia.es (2009). *¿Qué es la frecuencia y longitud de onda sonora?* [en línea], consultado 2017, <http://varinia.es/blog/2009/07/26/%C2%BFque-es-la-frecuencia-y-la-longitud-de-onda-sonora/>

Vehicle Information and Communication System (2016). *How VICS works*. [en línea], consultado 2016, <http://www.vics.or.jp/en/vics/>

Velmurugan, S. (2008). *Application of Intelligent Transport System (ITS) for Parking Management*. Traffic and Transportation Planning Central Road Research Institute, Mathura Road, New Delhi.

- Villegas, J. (2012). *¿Qué es un detector de movimiento pasivo o PIR?* [en línea], consultado 2016, <https://www.tecnoseguro.com/faqs/alarma/que-es-un-detector-de-movimiento-pasivo-o-pir.html>
- Visual LED (2016). *¿Qué debe saber sobre pantallas LED?* [en línea], consultado 2016, <http://visualled.com/que-deberias-saber-sobre-pantallas-led>
- Vuchic, V. (2005). *Urban Transit: Operations, Planning and Economics*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey. USA.
- Wall, Z y Dailey, D. (1999). *An algorithm for predicting the arrival time of mass transit vehicle using automatic vehicle location data*. Transportation Research Board Paper No. 990870.
- Wang, L.; Yao, D.; Gong, X. y Zhang, Z. (2002). *A Research on Bus Information Service System using DSRC*. The IEEE 5th Conference on Intelligent Transportation Systems, Singapore.
- Wisconsin Department of Transportation (1998). *State of the art in automatic vehicle location systems*. [en línea], consultado 2016, <https://www4.uwm.edu/cuts/its/avlapa.pdf>
- World Road Association (1999). *ITS Handbook 2000*. Recommendations from the World Road Association (PIARC). PIARC Committee on Intelligent Transport. United States of America.
- Xataka México (2014). *¿Qué es y cómo funciona el 4G?* [en línea], consultado 2017, <https://www.xataka.com.mx/celulares-y-smartphones/que-es-y-como-funciona-el-4g>
- Xexun (2016). *TK 103-2*. [en línea], consultado 2017, https://es.aliexpress.com/store/product/cheap-gps-car-tracker-tk-103B-tk103-2-track-and-trace-device-gps-sms-micro-gps/801574_1164539264.html?detailNewVersion=&categoryId=200001496
- Yang, X. (2003). *Advanced Public Transport System in Singapore*. Proceeding IEEE Intelligent Transportation Systems, p.p. 1660-1663.
- Yang, X. y Zhou, X. (2003). *Conceptual study on evaluation of advanced public transportation systems*. Proceeding IEEE Intelligent Transportation Systems, Shanghai, p.p. 1683-1687.
- Yokota, T. y Weiland, R. (2004). *ITS System Architectures for Developing Countries*. ITS Technical Note for Developing Countries.
- Zahumenszky, C. (2010). *Analyzing the proposed Baltimore Link transit plan and its effect on area transit*. [en línea], consultado 2016, <http://marylandreporter.com/2015/11/11/analyzing-the-proposed-baltimorelink-transit-plan-and-its-affect-on-area-transit/>
- Zaiac, N. (2015). *Todo sobre los monitores II: Lo que hay que tener en cuenta*. [en línea], consultado 2016, <http://www.xataka.com/perifericos/todo-sobre-los-monitores-ii-lo-que-hay-que-tener-en-cuenta>
- Zamora, J. (2016). *Beidou, así es la tecnología china que sustituye al GPS en la otra punta del mundo*. [en línea], consultado 2017, <https://www.elandroidelibre.com/2016/08/beidou.html>

ANEXO A. REDES NEURONALES

Las metaheurísticas representan “estrategias inteligentes para alcanzar buenas soluciones a los problemas, utilizando una cantidad razonable de recursos” (Lozano, 2016). Proporcionan ciertas mejoras a los procedimientos heurísticos que les ayudan a resolver problemas con un buen rendimiento.

Una de estas técnicas metaheurísticas son las redes neuronales, cuyo funcionamiento se basa en las funciones de una neurona biológica, por lo tanto, son modelos matemáticos inspirados en sistemas biológicos.

Cabe señalar, que las redes neuronales no modelan fielmente las funciones cerebrales, pues es difícil debido a que el cerebro humano es extremadamente complicado, es por eso que solamente se modelan las características más importantes, aquellas que son necesarias para la interacción con toda la red (Izaurieta y Saavedra, 2000).

Pero debe quedar claro que a pesar de que el modelo del funcionamiento de una neurona se hace de manera simple, posee una gran capacidad para procesar fuertes cantidades de información de manera paralela (Izaurieta y Saavedra, 2000).

Sin embargo, de acuerdo con Matich (2001), las principales características que comparten las redes neuronales con el cerebro son:

- **Habilidad de aprendizaje:** tienen la capacidad de aprender a realizar ciertas tareas con base en una experiencia que han tenido previamente. Además, también se consideran dinámicas, ya que pueden cambiar constantemente para adaptarse a nuevas condiciones.
- **Generalización:** pueden generalizar a partir de ejemplos previos. Una vez que la red ha aprendido, se dice que ha sido entrenada, y entonces ésta es, hasta cierto grado, insensible a variaciones pequeñas en sus entradas.
- **Abstracción:** pueden abstraer características esenciales de entradas que contienen datos irrelevantes. Algunas redes de este tipo, al entrenarse son capaces de abstraer la esencia de una serie de entradas, dando como resultado que pueden abstraer patrones perfectos de modelos distorsionados.

Antes de explicar los componentes y funcionamiento de las redes neuronales, es importante mencionar que una neurona biológica está compuesta por tres partes principales: las dendritas, el soma y el axón, además las neuronas se acoplan a través de uniones que se denominan sinapsis, misma que permite identificar a las neuronas presinápticas, que son las que envían las señales, y a las neuronas postsinápticas, las que reciben dichas señales (Figura A.1).

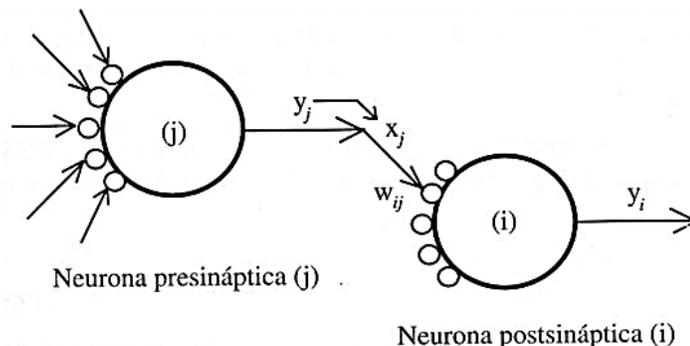


Figura A.1. Modelo de una neurona estándar
Fuente: (Aguilar, 1999)

En la Figura A.2, se aprecia el modelo de una neurona artificial estándar con su equivalente en la neurona biológica, cuenta con un conjunto de entradas (dendritas), unos pesos sinápticos asociados a dichas entradas (sinapsis), una función de activación (soma), además de una función de salida (axón).

Conviene recordar que el peso sináptico define la intensidad de interacción entre la neurona presináptica y la postsináptica, es decir, determina el efecto que tiene una sobre otra. Si se tiene una entrada positiva y el peso sináptico es positivo, tenderá a excitar a la neurona postsináptica, pero si el peso es negativo, la inhibirá. Por lo tanto, puede existir sinapsis excitadora (peso positivo) o inhibidora (peso negativo).

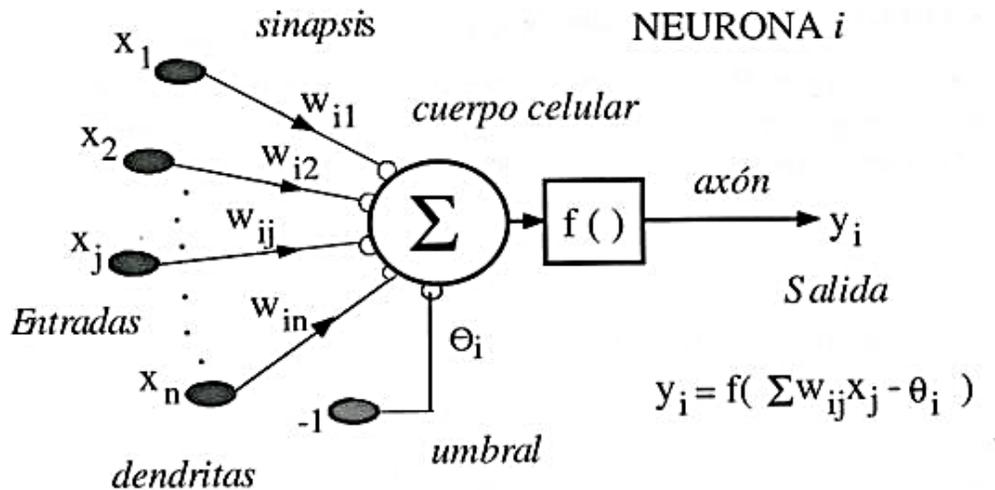


Figura A.2. Modelo de una neurona estándar
Fuente: (Aguilar, 1999)

Además, las neuronas se agrupan en unidades que se denominan capas, dentro de una capa éstas pueden agruparse y formar grupos neuronales, el conjunto de una o más capas constituye lo que se denomina red neuronal.

En la Figura A.3 se muestran las tres capas básicas de una red neuronal: se cuenta con la capa de entrada, que es donde se recibe aquella información que proviene de fuentes externas de la red, por otra parte, las capas ocultas, “son internas a la red, [...]”. El número de niveles ocultos puede estar entre cero y un número elevado” (Matich, 2001), por último, la capa de salida es la encargada de transferir la información de la red hacia el exterior.

Cabe señalar que la red debe estar completamente interconectada, esto quiere decir que cada una de las neuronas de la capa oculta o intermedia debe estar conectada con cada una de las neuronas de entrada, pero también con cada neurona de salida. Y no están permitidas las conexiones con neuronas de la misma capa (Lara, 1996).

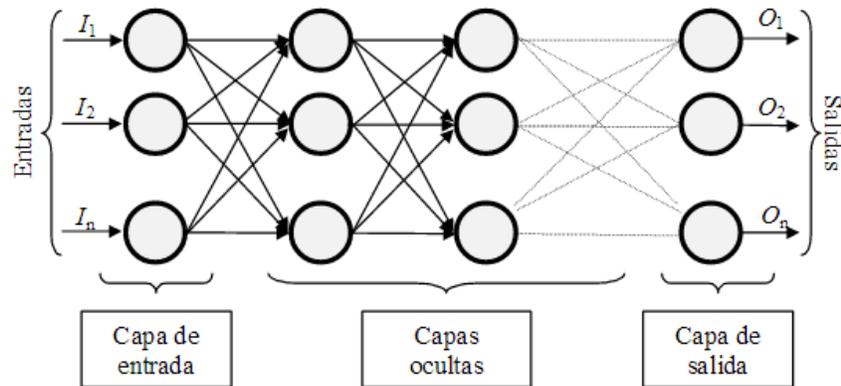


Figura A.3. Elementos de una red neuronal
Fuente: (Matich, 2001)

En los últimos años, las redes neuronales han recibido gran interés, ya que ofrecen medios para modelar de manera efectiva y eficiente problemas grandes y complejos (Salas, 2004).

De manera general, se puede decir que este tipo de modelos son capaces de encontrar relaciones “de forma inductiva por medio de los algoritmos de aprendizaje basado en los datos existentes más que requerir la ayuda de un modelador para especificar la forma funcional y sus interacciones” (Salas, 2004).

Sin embargo, de acuerdo con Torres (2008), dentro de las principales desventajas de las redes neuronales se encuentra el hecho de que es necesario conocer bien el problema a modelar para poder determinar la arquitectura adecuada, por ejemplo, se debe elegir el número de capas ocultas, el número de niveles ocultos, las interconexiones y la función de transformación, entre otros.

Además, las redes neuronales deben ser entrenadas para cada problema y generalmente, se requiere una elevada cantidad de datos para el entrenamiento, por lo que este proceso puede ser demasiado largo (Jiménez, 2012).

Finalmente, es difícil para un observador externo realizar cambios en una red neuronal, esto debido a que para “adicionar nuevo conocimiento, es necesario cambiar las interacciones entre muchas unidades para que su efecto unificado sintetice este conocimiento” (Torres, 2008).

ANEXO B. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE REDES NEURONALES PARA PREDICCIONES DE TIEMPOS DE LLEGADA DE AUTOBUSES A LAS PARADAS

Enseguida se presenta el trabajo desarrollado por Chien et al. (2002) sobre el uso de redes neuronales para la predicción de tiempos de llegada de autobuses a las paradas en un sistema de transporte público de Nueva Jersey en Estados Unidos (Figura B.1)

La ruta de estudio atraviesa 30 intersecciones, 26 de las cuales se encuentran semaforizadas. Además, cuenta con 14 paradas en cada dirección.

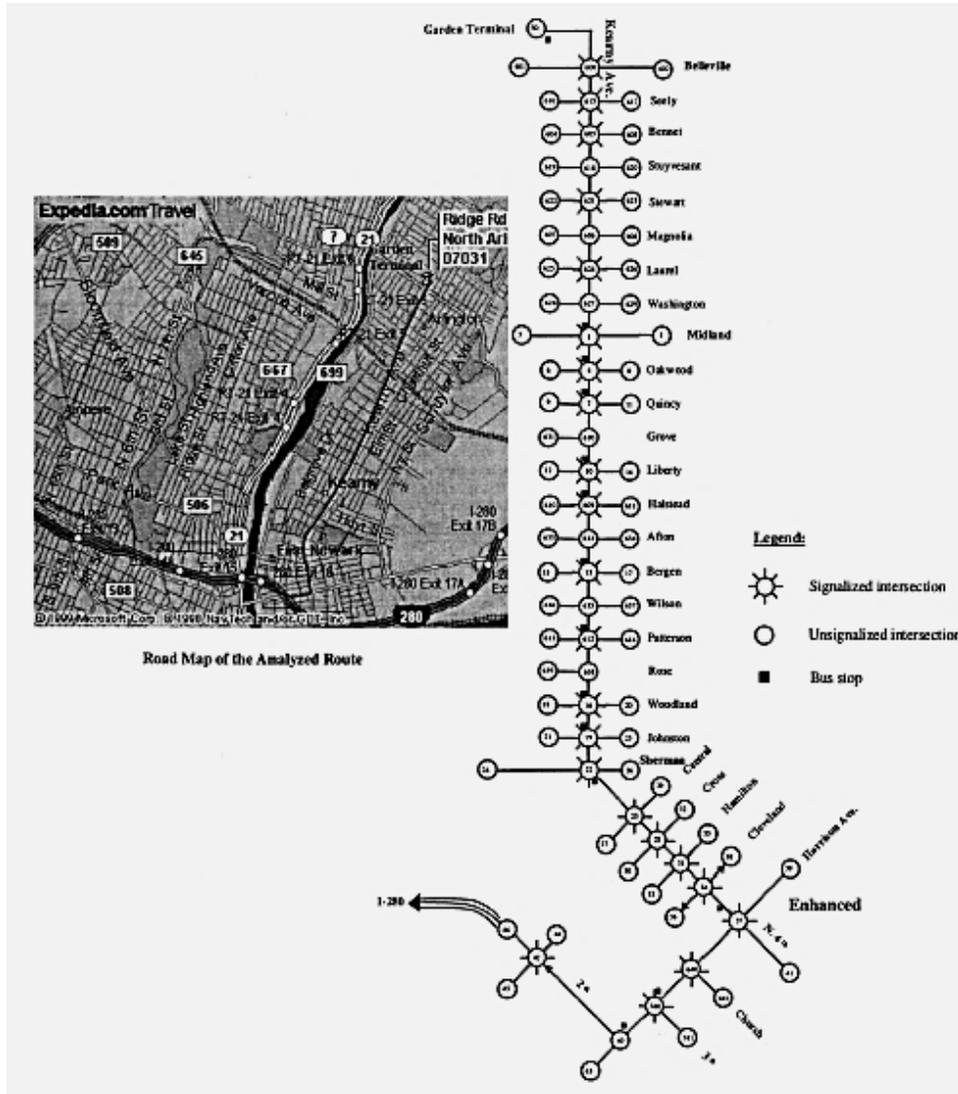


Figura B.1. Ruta analizada en Nueva Jersey, Estados Unidos
Fuente: (Chien, Ding y Wei, 2002)

Chien et al. (2002), proponen dos modelos de redes neuronales, en el primero de ellos predicen el tiempo de llegada de los autobuses a las paradas utilizando la acumulación de los tiempos de viaje en todos los arcos entre paradas anteriores. El segundo modelo lo desarrollan mediante la formación de datos agregados, como las medias y desviaciones estándar de los volúmenes, velocidades y retrasos en los arcos entre cada par de paradas.

Para el primer modelo asumen que se tienen arcos numerados desde 1 hasta m , y de la parada $i-1$ hasta la parada i . En la Figura B.2 se muestra que, utilizando como insumos la demanda de pasajeros en la estación $i-1$, el horario en el que llega el autobús k y el momento en el que sale el autobús $k-1$ de dicha estación, obtienen $d_{k, i-1}$, que es el tiempo de espera o de cola del autobús k en la estación $i-1$, y también $P_{k, i-1}$, que es el tiempo de salida del autobús k de la estación $i-1$.

Ahora bien, a dicho valor le suman los tiempos de viaje ($M_{k,1}^t \dots M_{k,m}^t$) de los diferentes arcos entre paradas, una vez hecho esto, pueden hacer la predicción del tiempo de llegada de autobús k a la estación i ($E_{k,i}$).

Por otra parte, el segundo modelo lo desarrollan mediante la formación de datos agregados, como las medias y desviaciones estándar de los volúmenes, velocidades y retrasos en los arcos entre cada par de paradas.

El método requerido para llevar a cabo este segundo modelo se muestra en la Figura B.3, donde se puede apreciar que la principal diferencia con el primer modelo es el uso de promedios y desviaciones estándar (DS).

Los autores mencionan que el entrenamiento de los modelos de redes neuronales requiere de mucha de información, en su caso, volúmenes de tránsito, velocidades, tiempos de llegada y salida de los autobuses recolectados bajo diferentes condiciones de tránsito y de demanda de pasajeros, entre otros.

Para hacer el entrenamiento de su ejemplo, utilizaron la información de la hora pico de la mañana, de las 7:30 a las 9:30 horas, tomada de 24 autobuses, así obtuvieron: los volúmenes de tránsito, tiempos de cola, velocidades, y también tiempos de llegada y salida de los autobuses, tiempos de recorrido y demanda de pasajeros subiendo y bajando de las unidades.

Además de lo anterior, tomaron en cuenta algunos factores que afectan las llegadas de los autobuses a las paradas como: dispositivos de control (semáforos), espaciamiento entre paradas, velocidades permitidas, entre otras.

De manera general, en la Tabla B.1 se muestra la información que utilizaron como insumo para las dos propuestas de modelos, cabe señalar que para hacer el entrenamiento de la red neuronal probaron diferentes combinaciones de insumos, tal como se muestra en la Tabla B.2.

También utilizaron diferentes valores para otros parámetros como: el número de neuronas y η que indica la tasa de aprendizaje.

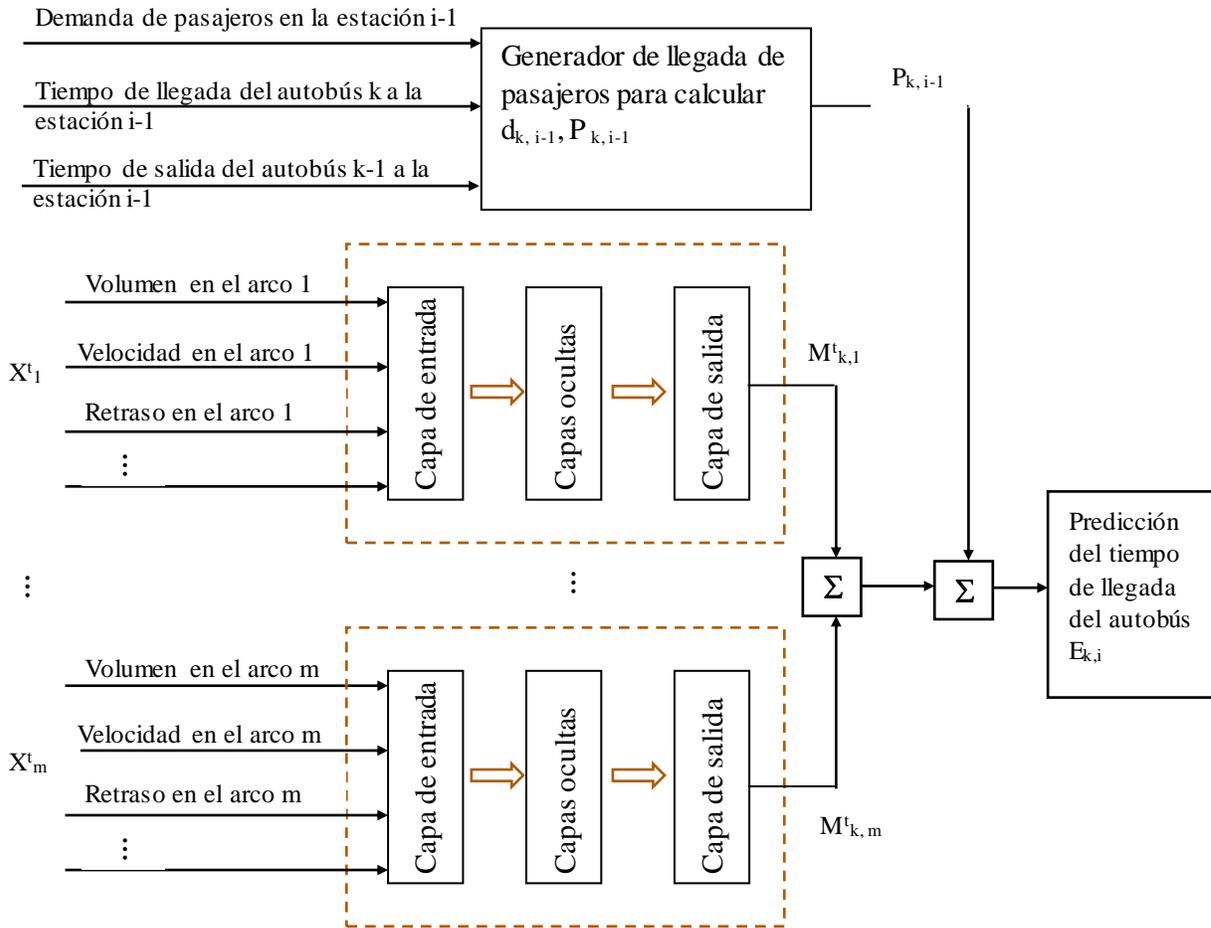
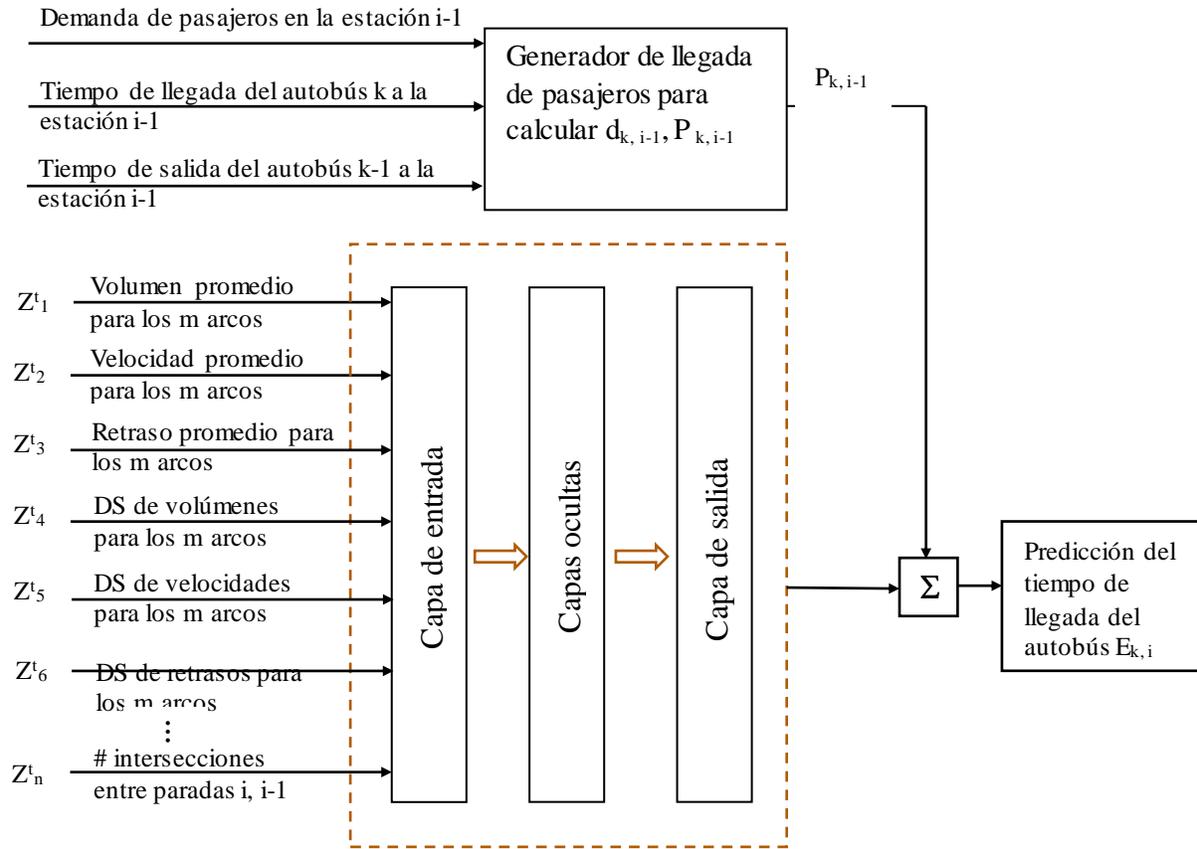


Figura B.2. Modelo de redes neuronales basado en arcos
Fuente: (Chien, Ding y Wei, 2002)



DS=Desviación estándar

Figura B.3. Modelo de redes neuronales basado en paradas
Fuente: (Chien, Ding y Wei, 2002)

Tabla B.1. Conjunto de insumos utilizados

Insumo	Descripción
LDIS (ft)	Distancia de viaje del autobús en un arco
LVOL (veh/h)	Volumen de tránsito promedio en un arco
LSPD (mph)	Velocidad promedio en un arco
LDLY (s/vehículo)	Retraso promedio en un arco
LQUE (s/vehículo)	Tiempo en cola promedio en un arco
SDIS (ft)	Distancia entre paradas
SVOL (vehículos/h)	Media de los LVOL de todos los arcos entre las paradas
DVOL (vehículos/h)	Desviación estándar de los LVOL de todos los arcos entre las paradas
SSPD (mph)	Media de las LSPD en todos los arcos entre paradas
DSPD (mph)	Desviación estándar de las LSPD en todos los arcos entre paradas
SDLY (s/vehículo)	Media del LDLY de todos los arcos entre las paradas
DDLY (s/vehículo)	Desviación estándar del LDLY de todos los arcos entre las paradas
SINTE (-)	Número de intersecciones
PASS (-)	Demanda de pasajeros en las paradas

Fuente: (Chien, Ding y Wei, 2002)

Tabla B.2. Diferentes propuestas de modelos con cambio en las variables de insumo

Modelo	VARIABLES INSUMO	Número neuronas	Número ejemplos entre namiento	SSE (S²)
Red neuronal para arcos				
1	LDIS, LVOL, LSPD, LDLY, PASS	6	380	0.0965
2	LDIS, LVOL, LSPD, LQUE, PASS	6	380	0.1108
3	LDIS, LVOL, LSPD, PASS	5	380	0.1108
4	LDIS, LVOL, LDLY, PASS	5	380	0.1104
5	LDIS, LVOL, LQUE, PASS	5	380	0.1108
Red neuronal para paradas				
6	SDIS, SVOL, SSPD, DVOL, DSPD, PASS	7	340	0.0694
7	SDIS, SVOL, SDLY, DVOL, DDLY, PASS	7	340	0.0758
8	SDIS, SVOL, SSPD, SDLY, SINTE, PASS	7	340	0.0410
9	SDIS, SVOL, SSPD, SINTE, PASS	6	340	0.1103
10	SDIS, SVOL, SDLY, SINTE, PASS	6	340	0.0504

Fuente: (Chien, Ding y Wei, 2002)

En la misma Tabla B.2, se puede apreciar que para cada uno de los diferentes modelos obtuvieron un valor de SSE, que es Sum of Squares Error o suma de los cuadrados del error residual, para ello primero calcularon las diferencias entre los valores esperados y los pronosticados, estas diferencias son los errores residuales, después solamente suman los cuadrados de estos errores y obtienen el SSE.

Para el primer modelo de redes neuronales, el menor valor de SSE lo obtuvieron con la combinación número 1, mientras para el segundo modelo, fue la combinación número 8 la que les brindó mejores resultados.

Por lo tanto, los insumos requeridos para el primero modelo fueron: la distancia de viaje del autobús en un arco, el volumen de tránsito en dicho arco, así como la velocidad y retraso promedio, además de la demanda de pasajeros.

Mientras para el segundo modelo los insumos fueron: la distancia entre paradas, la media de los volúmenes de tránsito promedio en los arcos, la media de las velocidades promedio, la media del retraso promedio en los arcos, el número de intersecciones y la demanda de pasajeros.

Finalmente, los resultados que obtuvieron aplicando ambos modelos muestran que el segundo modelo de redes neuronales que propusieron brinda mejores resultados, es decir, predice los tiempos de llegada de los autobuses a las estaciones de una manera más exacta, especialmente en el caso de las predicciones de tiempos de viaje entre pares de paradas con múltiples intersecciones.

