



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Apuntes de Ingeniería de
Transporte II: Sistemas
Inteligentes de Transporte
(SIT)**

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Jonathan Isai Domínguez Ramírez

ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO

Dr. David López Flores



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado APUNTES DE INGENIERIA DE TRANSPORTE II: SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE (SIT) que presenté para obtener el título de INGENIERO CIVIL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

JONATHAN ISAI DOMINGUEZ RAMIREZ
Número de cuenta: 316048985

Agradecimientos

A mi madre Araceli Ramírez, que me brindo todo su apoyo y amor desde niño, sacrificando su tiempo para que no me faltará nada para seguir adelante. Mis estudios son la base del cariño que una madre le puede dar a su hijo. Siempre te amaré mamá y lucharé por mis sueños, así como tú me los has hecho creer.

A mi abuela Eufemia Salamanca, que siempre me brindo consejos y me ayudo en toda mi vida estudiantil para que no me faltará nada, siendo como una madre para mí que actualmente descansa en paz y siempre la llevaré conmigo en el corazón.

A mi tutor, David López, por brindarme su tiempo en la enseñanza y conocimiento en el área de transporte. Su sabiduría y su forma apasionada en enseñar marco el rumbo para dedicarme al área que más me gusta, el transporte.

A mi tío Rubén Ramírez que fue un modelo de inspiración para crecer cada día más a partir de los estudios y la enseñanza.

A mi novia Rosa Barajas, por ser mi acompañante de vida desde los 15 años, estar junto a ti me ha brindado momentos maravillosos y han sido mi fuente de energía por que tu amor es lo más bonito que me pudo pasar.

A la UNAM por brindarme un nivel de enseñanza de alto rendimiento. Estudiar en el Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Naucalpan y posteriormente en la Facultad de Ingeniería lograron forjarme como un gran profesionista y un gran ser humano.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PRELIMINARES	4
2.1. OBJETIVOS DE LOS SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE	4
2.2. TECNOLOGÍAS APLICADAS A LOS SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE	6
2.3. BENEFICIOS DE LOS SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE	8
3. CATEGORÍAS	12
3.1. SISTEMAS DE GESTIÓN DE VÍAS CONTROLADAS E INCIDENTES.....	12
3.1.1. Componentes de los Sistemas de Gestión de Vías Controladas e Incidentes	12
3.2. SISTEMAS AVANZADOS DE CONTROL DE TRÁFICO	27
3.3. SISTEMAS AVANZADOS DE TRANSPORTE PÚBLICO.....	38
3.3.1. Sistemas de Ubicación Automática de Vehículos.....	39
3.3.2. Software de operaciones.....	40
3.3.3. Información de tráfico	40
3.3.4. Sistemas de pago electrónico.....	41
3.4. SISTEMAS AVANZADOS DE INFORMACIÓN AL VIAJERO.....	41
3.5. EL FUTURO DE LOS SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE.....	42
4. SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE EN EL MUNDO	49
5. SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE PARA CIUDADES MEXICANAS .	55
5.1. RETOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE EN MÉXICO.....	63
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
7. RESUMEN	71
REFERENCIAS	73
BIBLIOGRAFÍA DE IMAGENES	76

Índice de figuras

Figura 1 Línea de tiempo de evolución de los SIT.....	2
Figura 2 Radar de Bosch.....	6
Figura 3 Radar envolvente.....	7
Figura 4 Configuración de un Sistema de un DBI.....	14
Figura 5 Instalación y Operación del DBI.....	14
Figura 6 Radar en modo prospectivo y modo de disparo lateral.....	15
Figura 7 Detector pasivo de infrarrojo.....	16
Figura 8 Detector activo de infrarrojo.....	16
Figura 9 Radar ultrasónico.....	17
Figura 10 Tecnologías acústicas.....	17
Figura 11. Esquema del Autoscopio.....	18
Figura 12 Imagen del análisis del procesamiento de la imagen.....	19
Figura 13 Funcionamiento de un Vehículo Sonda.....	19
Figura 14 Sistema de funcionamiento de la Identificación Automática de Vehículos.....	20
Figura 15 Sistema de funcionamiento de la Información vial por medio de teléfonos celulares.....	22
Figura 16 Cambios de ocupación como resultado de un incidente.....	25
Figura 17 Configuración que definen la duración de una fase del vehículo.....	28
Figura 18 Aplicación del tiempo de paso.....	29
Figura 19. Intersección semafórica.....	29
Figura 20 Ola verde.....	34
Figura 21 Diagrama Espacio - Tiempo.....	34
Figura 22 Corredor de semáforos.....	35
Figura 23 Corredor de estudio.....	37
Figura 24 Sistema de funcionamiento de los AVL.....	39
Figura 25 Sistema de información al vehículo.....	40
Figura 26 Sistema Avanzados de Información al Viajero.....	42
Figura 27 Estructura de los SIT desde la perspectiva de datos.....	46
Figura 28 Sistema de información al viajero en Dublin.....	50
Figura 29 Sistema ITS de gestión de vías controladas e incidentes.....	51
Figura 30 Límites de velocidad variables en carreteras.....	52
Figura 31 Balizas híbridas para carreteras.....	53
Figura 32 Sistema de Telepeaje en Plaza de Cobro Cantona en la Autopista Amozoc – Perote.....	57
Figura 33 Manguera neumática y su dispositivo de conteo sobre el Macro libramiento de Querétaro.....	58
Figura 34 Sistema de cámaras y radares de las fotos cívicas y foto multas de la Ciudad de México.....	59
Figura 35 Pantalla con tiempos de espera de autobuses de la línea 5 del Metrobús.....	61
Figura 36 Situación vial en Naucalpan en hora pico.....	61
Figura 37 Número de víctimas muertas por entidad federativa.....	66

Índice de tablas

Tabla 1 Resultados del algoritmo DAI	24
Tabla 2 Lectura de ocupación por dos estaciones DAI	26
Tabla 3 Determinación de incidentes por medio del sistema DAI	26
Tabla 4 Desplazamiento ideal entre semáforos	36
Tabla 5 Datos de información de las tres señales	36

1. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) han experimentado una evolución significativa desde sus inicios, adaptándose a las necesidades y aprovechando las herramientas disponibles en cada época. A lo largo de los años, se han implementado diversas tecnologías en la operación y logística del transporte para mejorar la movilidad de las personas y de las mercancías. Sin embargo, es en los últimos 50 años es cuando más se han desarrollado múltiples herramientas tecnológicas que han tenido un impacto positivo en el sector transporte.

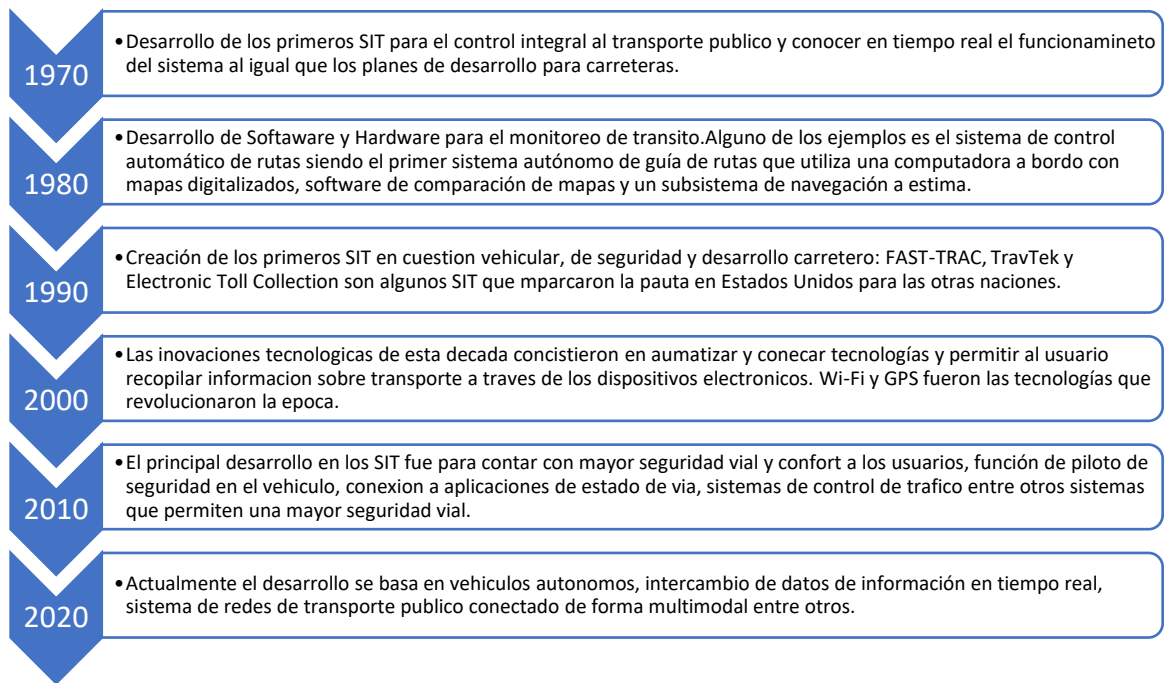
Los SIT, en su forma actual, tiene su origen en la década de los 70's y principalmente se desarrollaron en Estados Unidos y Japón. En la década de 1980 surgen los primeros cambios en la movilidad como los sistemas de control de tráfico, tecnologías de peaje electrónico, primeros sistemas de automatización ferroviaria entre otros. Estos cambios en los sistemas de transporte permitieron lograr una optimización en el movimiento de personas y mercancías. Además, durante los 80s se realizaron las primeras medidas a favor del cuidado del medio ambiente. Las tecnologías aplicadas en las primeras iteraciones de los SIT fueron basadas en infraestructura vial, como la implementación de los Paneles de Mensaje Variable que son paneles electrónicos en carreteras que proporcionan actualizaciones en tiempo real sobre el tráfico, condiciones climáticas y alertas de seguridad (Sussman, 2005).

El boom tecnológico en Estados Unidos en la década de los 90's marcó la pauta para mejorar diferentes actividades relacionadas con el transporte. Para ese año fue primordial contar con vehículos con mejores estándares de seguridad, así como nuevas tecnologías de asistencia a la conducción y seguridad, como sistemas de frenos antibloqueo (ABS), sistemas de frenado asistido (BAS), y sistemas de alarma antirrobo que funcionan a partir de controles remotos y sensores de intrusión. Para la década del 2000, las nuevas tecnologías que permitieron recopilar datos e información sobre el transporte fueron las redes celulares y el almacenamiento en la nube. Dichas tecnologías permitieron al ser humano tener a un mayor control de la información y acceso a los datos (Sussman, 2005).

La época de 2010 permitió a las personas aprovechar al máximo los SIT ya que la mayoría de los usuarios contaban con un teléfono inteligente. Durante la década de 2010, el uso de teléfonos móviles experimentó un crecimiento significativo. En 2010, la venta de teléfonos inteligentes subió un 74% desde 2009, llegando a los 300 millones (U.S. Department of Transportation, 2023). Durante este periodo los automovilistas que contaban con teléfonos inteligentes podían utilizar SITs que permitían conocer el estado actual de las diferentes vialidades.

Posteriormente, del año 2010 a la actualidad el GPS (Sistema de Posicionamiento Global) ha permitido que los dispositivos móviles puedan determinar su ubicación geográfica en tiempo real. Esto permite que los teléfonos móviles modernos puedan utilizar una combinación de GPS, A-GPS (GPS asistido) y GLONASS (Sistema Global de Navegación por Satélite) para mejorar la precisión de la ubicación. A continuación, en la Figura 1 se muestra la línea de tiempo de los SIT alrededor del mundo y de los años de acuerdo con U.S. Department of Transportation (2023).

Figura 1 Línea de tiempo de evolución de los SIT



Durante los últimos años, los SIT han contribuido significativamente al mejor control de la movilidad. Entre las aplicaciones más destacadas se encuentran aquellas que facilitan la gestión de vialidades mediante cierres o zonas de trabajo, el telepeaje que permite un acceso directo a vías de acceso controlado, y alertas del transporte público que informan sobre retrasos o las próximas unidades a llegar a una estación. Estos son solo algunos ejemplos de los SIT que están actualmente disponibles.

La evolución de los sistemas de transporte se ha centrado en la seguridad y la eficiencia, por lo que, la disponibilidad de nuevas herramientas, mayor poder de cómputo y acceso a la información de los sistemas de transporte ha permitido mejorar la forma en cómo las personas se desplazan. Los SIT han facilitado que varios países optimicen en gran medida sus sistemas de transporte.

Los SIT aplicados a la gestión de vías controladas e incidentes han logrado monitorear el flujo de tránsito para permitir una reducción en la congestión vial. También, han ayudado a reducir el número de accidentes viales mediante la asistencia al conductor. De igual forma, estos sistemas, permiten ahorros en tiempo y dinero haciendo más eficiente la movilidad, y por consiguiente reduciendo la huella de carbono de los sistemas de transporte.

De acuerdo con Narayanaswami (2023) las principales funciones de los SIT son combatir con los problemas de congestión vial, aumentar la seguridad de los usuarios, optimizar los sistemas de transporte público, mejorar servicios deficientes, administrar espacios de estacionamiento y reducir la contaminación ambiental. De igual forma, Narayanaswami (2023) comenta que los SIT combinan varias Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) para optimizar la movilidad urbana al reducir la necesidad de inversiones de infraestructura física, aumentar la seguridad de los usuarios, permitir un flujo controlado de movimiento vehicular, mitigar escenarios de congestión y disminuir la demanda de vehículos privados en las ciudades.

Los SIT son sinónimo de movilidad y sistemas de transporte sostenible, ya que eliminan los desafíos clave en la información, la gestión y los servicios en el sector del transporte, al proporcionar soluciones seguras, más rápidas, convenientes, eficientes y respetuosas con el

ambiente. A continuación, se muestran aplicaciones de los SIT en diferentes puntos clave del transporte de acuerdo con Narayanaswami (2023):

- **Sistema de transporte confiable:** proporcionan información en tiempo real sobre el estado de las vías lo que ayuda a los usuarios a optimizar sus rutas, planear sus viajes y tener información actualizada sobre situaciones extemporáneas en las vías
- **Reducción de la tasa de ocurrencia de accidentes:** emiten advertencias de colisión cooperativa, señalan la presencia de vehículos más lentos, mejoran la visibilidad y la operación del vehículo, emiten mensajes para cambios de carril, proporcionan control de velocidad, asistencia en el estacionamiento y facilitan la aplicación de las leyes de tránsito.
- **Aumento en la eficiencia de la gestión del tráfico:** operan mediante centros de operación de tráfico y control de tráfico, gestionando señales de tráfico dinámicas, coordinando respuestas ante incidentes y aplicando las disposiciones legales relacionadas con las leyes de tránsito.
- **Sistema de transporte público económico con reducción y seguimiento eficiente de ingresos:** facilitan la implementación de un sistema de cobro de peaje electrónico, así como la adopción de sistemas de tarifas basadas en el uso, tales como el cobro por kilómetros recorridos, sistemas de tarifas para mitigar la congestión y carriles sujetos a tarifas.
- **Mejora de la coordinación y operación del servicio del transporte público:** su finalidad radica en la localización automática de vehículos, la administración de un sistema de transporte sostenible según la demanda, y la gestión de servicios de transporte compartido. Además, proporciona información al viajero y facilita la reserva de viajes.
- **Reducción de accidentes vehiculares y fatalidad:** Constituyen sistemas de monitoreo de fatiga, así como sistemas de advertencia de exceso de velocidad. Además, incorporan una alerta automática de respuesta a crisis dirigida a las autoridades, conocida como eCall.

El objetivo principal de este trabajo es apoyar a la asignatura de Ingeniería del Transporte II en el tema de “Sistemas Inteligentes de Transporte”, impartido en la Facultad de Ingeniería en la carrera de Ingeniería Civil de los planes de estudio 2016 y 2023 de la Universidad Nacional Autónoma de México. Mediante la consulta de estos apuntes el alumno conocerá que los SIT son un medio para aumentar la eficiencia de operación del transporte, aprenderá las últimas tecnologías aplicadas al transporte y podrá tomar decisiones en proyectos de ingeniería en la elección de los SIT para proyectos como vialidades y carreteras.

El presente trabajo está dirigido a alumnos, profesores y personas interesadas en los Sistemas Inteligentes de Transporte. Con estos apuntes, el alumno podrá reforzar y complementar los conocimientos adquiridos en la asignatura Ingeniería del Transporte II. Los profesores podrán contar con material didáctico que puede auxiliar a la información dada en clase. De igual forma, los apuntes pueden ayudar al público en general a conocer a fondo los Sistemas Inteligentes de Transporte.

2. PRELIMINARES

Antes de adentrarse en las categorías, tecnologías y aplicaciones de los Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT), es necesario establecer ciertos conceptos básicos que permitirán comprender el alcance y la función de estos sistemas dentro del contexto de la ingeniería del transporte. En esta sección se definen los objetivos generales de los SIT, así como los principios tecnológicos que los sustentan y los beneficios que aportan a la movilidad moderna.

2.1. OBJETIVOS DE LOS SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE

El transporte es una parte esencial de todos los seres humanos. Pues es parte del desarrollo de una sociedad, influyendo en la calidad de vida de las personas al igual que el desarrollo económico de las urbes. De acuerdo con Hay (1997) la principal función del transporte es el movimiento de personas y mercancías desde un punto a otro para un propósito específico.

En la ingeniería de transporte, los problemas principales incluyen aspectos tecnológicos. En el transporte urbano e interurbano se busca contar con vehículos más seguros, más rápidos y con mayor capacidad. Por parte del sistema de carreteras, se requiere de un sistema funcional que permita contar con velocidades de operación adecuadas y evitar altos tiempos de traslado. Estos múltiples problemas se han estudiado para encontrar una solución eficiente, a lo cual ha llevado a la implementación de nuevas tecnologías.

De acuerdo con Hay (1997) los SIT están compuestos por varios elementos clave como vehículos, fuerza motriz, carreteras, terminales y sistemas de control. Estos elementos se combinan para que los SIT funcionen y logren los objetivos establecidos para ellos. En general, los objetivos de cualquier tecnología aplicada, incluyendo los SIT, deben resolver problemas al mismo tiempo que se consideran los valores de la comunidad. Esto implica mejorar el estado económico local, ofrecer más oportunidades laborales y elevar la calidad de vida de los ciudadanos.

Específicamente en el ámbito de la ingeniería, los objetivos se centran en resolver la demanda de transporte mediante la selección del modo adecuado, todo ello sin causar impactos negativos significativos en el medio ambiente.

La Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transporte (SICT) establece una definición de los SIT, así como el objetivo que cumplen. De acuerdo con el Manual Para Proyectos de Sistemas Inteligentes de Transporte SICT (2019) los SIT consisten en la aplicación de tecnologías de la información y telecomunicaciones en las diversas modalidades de transporte, para mejorar sus servicios, así como su operación y seguridad. La aplicación de los SIT abarca la gestión del tránsito, el manejo de emergencias, la información a los usuarios, la seguridad y la operación en la infraestructura.

Novack et al. (2018) menciona que la obtención de información de los SIT debe de llevar un proceso de filtración de datos. El manejo de la calidad de la información es una característica crítica debido a las grandes cantidades de datos que fluyen a través de redes de transporte. Para que la información de datos pueda ser correcta se requiere de los siguientes criterios:

- **Precisión:** La información sobre el transporte debe reflejar la realidad. Una imagen real del estado de la carga y una ubicación libre de errores facilita la toma de decisiones. En cambio, las decisiones basadas en información inexacta pueden provocar retrasos en las entregas, escases de inventario en rutas de transporte y resultados insatisfechos.
- **Accesibilidad:** La información precisa sobre transporte debe estar disponible para las empresas y usuarios que requieran de datos viales, independientemente de la función, ubicación o empleador. Por ejemplo, una empresa de paquetería necesita conocer el volumen de pedidos

diarios de Amazon para organizar un número adecuado de remolques en los muelles de envío. La accesibilidad a la información es difícil porque los datos de transporte a menudo están dispersos entre varias empresas, ubicaciones y sistemas de información. Es necesario superar barreras técnicas para garantizar buenos sistemas conexión y flujos de información.

- **Relevancia:** Los profesionales de transporte o usuarios en general, deben tener acceso a información pertinente para el análisis y toma de decisiones. Deben evitarse datos irrelevantes y detalles innecesarios, ya que ocultar detalles importantes, perder tiempo y distraer a los tomadores de decisiones perjudica la eficiencia del SIT en uso.
- **Actualidad:** Para ser relevante, la información sobre transporte debe estar actualizada y disponible en un plazo razonable. Los datos oportunos permiten monitorear las condiciones de la red y responder rápidamente con acciones correctivas para evitar problemas adicionales. Por ejemplo, la detección rápida de un accidente en una carretera permite a los usuarios tomar rutas alternas para evitar el cuello de botella sobre la vialidad y así evitar una mayor congestión vehicular. La detección temprana evita que los usuarios realicen tiempos de traslado prolongados y que el transporte de carga tenga retrasos en entregas.
- **Transferibilidad:** La información debe enviarse rápidamente entre ubicaciones y sistemas de la red de transporte para facilitar la accesibilidad y la puntualidad. La información debe residir en formatos electrónicos que puedan transmitirse y convertirse fácilmente. La digitalización de la información sobre el transporte hace que las transferencias electrónicas sean relativamente fáciles, económicas y seguras, aunque las organizaciones deben protegerse contra violaciones de seguridad y problemas de ciberseguridad.
- **Usabilidad:** La información sólo es útil si se puede impulsar una toma de decisiones eficaz. Se deben hacer esfuerzos para definir los requisitos de información y captura de los datos apropiados. Es necesario evitar el tiempo y los costos de captura de datos que no sean relevantes. Además, la información solo es utilizable si se puede compartir y traducir sin problemas de un formato a otro sin pérdida de datos.
- **Confiable:** La información contenida en los informes de transporte y los conjuntos de datos de transacciones debe provenir de fuentes internas y externas confiables. Los datos deben ser precisos, inalterados y razonablemente completos para respaldar los usos previstos.
- **Valor:** Lograr los estándares de calidad no es una propuesta fácil ni gratuita, el hardware y software necesarios para captura y difusión de datos de transporte puede resultar costoso. En la actualidad se han reducido los costos de almacenamiento mediante el almacenamiento en la nube. Para contar con un sistema adecuado se debe de aprovechar la tecnología actual y futura de forma eficaz para evitar costos altos de operación.

Al cumplir los puntos mencionados anteriormente, los SIT pueden procesar múltiples datos para todo tipo de modos. Estos datos son de importancia para que los operadores puedan conocer el estado, operación y mantenimiento de las instalaciones, mientras que los datos son de importancia para los usuarios que requieren tomar decisiones. A continuación, se muestran algunos tipos de información que recolectan los SIT (SICE ,2024):

- Imágenes de las condiciones físicas de la carretera
- El clima en la carretera. Registros de variaciones en las condiciones climáticas
- Registro de identificación de las placas en los vehículos
- Medición automática de peso en los vehículos
- Medición automática de las dimensiones de los vehículos
- Registro de velocidades
- Aforos vehiculares en secciones viales y plazas de cobro
- Registro de transacciones económicas en plazas de cobro
- Imágenes de incidentes en la operación cotidiana
- Alarmas por identificaciones de riesgos o eventos en operación

- Mensajes vía señales de mensaje cambiante para los usuarios
- Acceso a comunicación telefónica en ares remotas para usuarios.

Por otra parte, los SIT generan información que ayuda a la toma de decisiones relacionadas con la operación de las vías y la operación de los diversos modos de transporte. Principalmente los SIT ayudan a (PIARC, 2024):

- Conservar la infraestructura
- Brindar información a los usuarios sobre el estado del sistema
- Otorgar seguridad a viajeros, transportistas, carga y vehículos
- Gestionar la demanda de la infraestructura
- Garantizar la logística planeada
- Regular el tránsito de viajeros y transportistas
- Dar soluciones a los incidentes en la ruta
- Promover el desarrollo económico
- Proteger el medio ambiente

2.2. TECNOLOGÍAS APLICADAS A LOS SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE

La tecnología es una herramienta para diferentes disciplinas de la ingeniería civil, una de ellas son los sistemas de transporte. Como se mencionó en los capítulos en anteriores, la evolución de las herramientas tecnológicas ha ido aumentando con el tiempo. Existen diferentes tipos de tecnologías que se han aplicado al transporte. Sussman (2005) menciona que la inclusión de sistemas de información, las comunicaciones, los sensores y los métodos matemáticos avanzados son herramientas para el desarrollo del sistema de movilidad.

Los SIT se rigen por sistemas tecnológicos que permiten la optimización de funciones o decisiones. A continuación, se muestra las tecnologías que según Sussman (2005) han permitido desarrollar SIT:

1. **Sensores:** Los sensores permiten una disminución en los accidentes viales y contar con mayor seguridad vial. Los sensores permiten controles de cruceo adaptativo al vehículo, detección de puntos ciegos, advertencia de coalición frontal, frenado automático de emergencia, entre otros. Esta tecnología funciona con ayuda de cámaras 2D, sin embargo, en los últimos años se han empleado cada vez más sensores RADAR y LIDAR para aumentar la fiabilidad.
2. **RADAR:** Los sensores de RADAR de última generación proporcionan varios haces fijos alineados y parcialmente superpuestos o estructuras de rígidas de antenas en la fase de recepción. En la Figura 2 (radar de largo alcance y radar de medio alcance) se muestran los módulos de radar individuales típicos de Bosch, que son bastantes voluminosos.

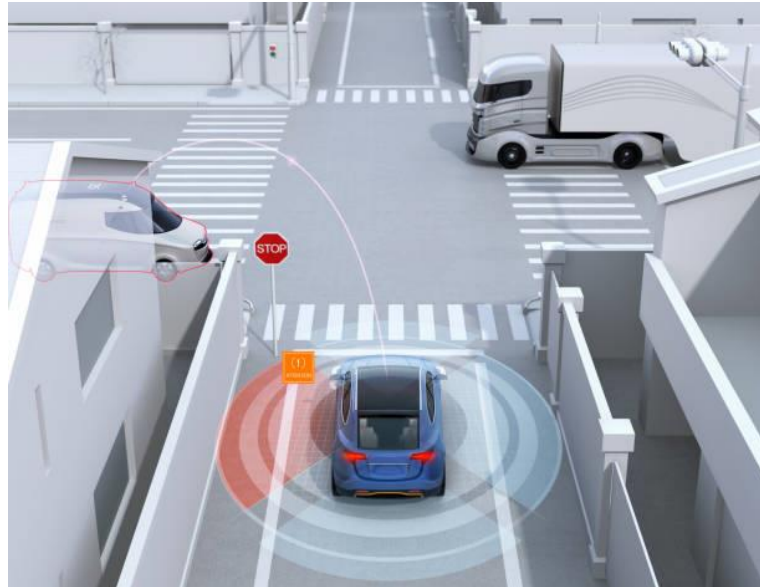
Figura 2 Radar de Bosch



Fuente: Sussman (2005)

Para los casos de asistencia a la conducción en entornos urbanos, es necesaria una formación de sensores inteligentes con una alta direccionalidad para capturar adecuadamente el movimiento de otros usuarios de la vía y de los participantes externos al tránsito a las inmediaciones. Por este motivo deben desarrollarse soluciones para la conformación electrónica de captura de vehículos con una visión envolvente basada en el RADAR como se muestra en la Figura 3.

Figura 3 Radar envolvente



Fuente: MO Drive (2024)

3. **Comunicación inalámbrica:** La comunicación de corto alcance se ha utilizado de diferentes maneras para el seguimiento de vehículos y la intercomunicación. Se ha desarrollado la aplicación de comunicaciones de largo alcance como el uso de redes 5G y GSM para actividades relacionadas con el transporte.
4. **Comunicaciones intra-vehiculares y electrónica de vehículos:** Las técnicas de control de procesos, inteligencia artificial y computación se utilizan en combinación con otros desarrollos tecnológicos para mejorar la movilidad de los usuarios de la carretera, como la navegación.
5. **Datos Flotantes del coche:** Los teléfonos inteligentes transmiten sus datos de ubicación de forma continua. Esta característica tecnológica y el hecho de que en la actualidad la mayoría de los conductores suelen llevar su teléfono, permite localizar automóviles y, en consecuencia, estimar las condiciones de flujo de tráfico y velocidades de viaje.
6. **Tecnologías de detección:** La tecnología de detección basada en inteligencia se está aplicando de diferentes maneras para las actividades de seguridad y gestión de sistemas. Los sensores de vehículos y de la infraestructura se pueden utilizar para controlar la velocidad del vehículo. Las balizas electrónicas que comunican el vehículo con infraestructura (usualmente conocidos como sistemas Vehicle – to – Infrastructure¹ (V2I)) se pueden utilizar para la identificación y la intercomunicación. De forma sencilla, la tecnología V2I se puede utilizar para detectar vehículos en exceso de velocidad, y tomar medidas como el flujo, la

¹ Vehicle – to – Infrastructure: Es la comunicación bidireccional entre los vehículos y los elementos de la infraestructura vial.

densidad y la velocidad. Esta tecnología en combinación con sistemas de pago electrónico se utiliza para el cobro de tarifas.

7. **Tecnología de detector de bucle inductivo:** Se pueden instalar bucles inductivos o sensores magnéticos en las aceras de lugares específicos para la detección y el recuento de vehículos, así como para controlar el peso de los vehículos en movimiento. Hay una serie de variantes disponibles en el mercado que utilizan esta tecnología.
8. **Detección de vehículos por video:** Las cámaras de video instaladas en diferentes lugares de la vía se utilizan para una serie de aplicaciones en funciones de control y gestión del tránsito, como el cobro automático de peajes, este sistema funciona para autopistas con dos tarifas diferentes, como en hora de máxima demanda y hora valle, además de que organismos encargados de la seguridad pública puedan atender incidentes de tránsito.
9. **Sistema de Posicionamiento Global (GPS):** El GPS concebido originalmente como una herramienta para la topografía y ubicación, ha encontrado una amplia aceptación y hoy se emplea en diversas aplicaciones de transporte. El GPS proporciona al usuario de las vías diferentes parámetros de navegación, como la distancia relativa, las coordenadas de diferentes ubicaciones, entre otros.
10. Además, Dimitrakopoulos (2020) hace mención que los sistemas de conducción autónoma funcionan con un conjunto de tecnologías como GPS y radares. Una tecnología que está tomando énfasis en los SIT son los sistemas de nube del Big Data, encargados del almacenamiento y procesamiento de datos de la red vial.

Todas las tecnologías mencionadas en los 10 puntos anteriores son fundamentales para el desarrollo de los SIT existentes y en su mejoramiento. La aplicación de tecnologías en los sistemas de transporte permite el desarrollo de nuevo software y hardware contando con las actualizaciones más recientes. La evolución de la tecnología es directamente proporcional a la evolución de los SIT, con el fin de mejorar el sistema de movilidad.

2.3. BENEFICIOS DE LOS SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE

Las inversiones para desarrollar diferentes SIT tienden a ser muy costosas. Por ello, es de suma importancia que el beneficio de la inversión sea mayor o logre resolver problemas de movilidad que se presentan en cada sistema de transporte. Los SIT ofrecen un enfoque moderno para hacer frente a los desafíos de la creciente demanda de viajes que reemplaza la construcción física de capacidad adicional con la optimización de la capacidad existente.

De acuerdo con Hoel et al. (2011) los beneficios de los SIT incluyen mejorar el flujo de tráfico, reducir los retrasos y minimizar la congestión, de igual forma, mejora el nivel de servicio y seguridad al proporcionar información oportuna, advertencias anticipadas y operaciones eficientes de vehículos comerciales.

Dimitrakipoulos et al. (2020) indica que los principales usuarios beneficiados por el desarrollo de los SIT son:

1. Conductores
2. Usuarios y viajeros de la vía pública
3. Profesionales de transporte
4. Empresas regionales
5. Usuarios vulnerables de la vía pública

Algunos de los beneficios que tienen los ITS para los conductores es poder interconectarse con el conductor de tres maneras; sistemas de información, sistemas de alerta y sistemas de intervención. Dimitrakipoulos et al. (2020) menciona que cuanto mayor es el grado de intervención

del sistema, más eficaz es en cuanto su funcionamiento dirigido. Sin embargo, las diferentes formas de interactuar con los SIT también dan lugar a diferentes efectos indirectos, como la distracción, la frustración o problemas de entendimiento con las señales viales. El tipo de señales transmitidas puede afectar el comportamiento de conducción.

Por ejemplo, se cree que las señales acústicas irritan más a los conductores, pero al mismo tiempo son más efectivas que las ópticas y táctiles. Por otra parte, los sistemas de información incluyen mensajes para que el conductor tome acciones mientras conduce, este punto está relacionado con los sistemas de alerta que abarcan tecnologías de detección de objeto o situaciones de peligro; como los usuarios que se quedan dormidos mientras manejan. Por último, los sistemas de intervención que, en conjunto con los sistemas mencionados anteriormente, ejecuta acciones para brindar la seguridad y evitar percances como lo son los frenados de emergencia. En resumen, los principales beneficios para el conductor es mantenerse alerta a las condiciones del camino para asegurar la seguridad del conductor, de los pasajeros y de los peatones.

Dimitrakipoulos et al. (2020) menciona que los principales beneficiarios de los SIT son los viajeros (también llamados usuarios finales) y los conductores (o usuarios de la carretera). Un SIT proporciona a los conductores y viajeros una mayor seguridad, información valiosa sobre sus viajes, rutas y tiempos de transporte más cortos, un acceso más fácil al estacionamiento, entre otros. Los SIT ayuda a que los peatones y otros grupos vulnerables están más seguros y se convierten en una prioridad del sistema de transporte. En el caso de transporte público, los usuarios tienen más opciones de viaje y una información más robusta durante sus viajes. Por último, los SIT ayudan a que la infraestructura de transporte esta mejor vigilada y mantenida, reduciendo así los daños y proporcionando una recuperación más rápida en caso de emergencia (condiciones meteorológicas extremas o accidentales graves, entre otros).

Otro grupo que se beneficia de los SIT son las personas que trabajan en los servicios de transporte, incluidos los administradores. El uso de SIT puede apoyar significativamente su trabajo y mejorar el resultado final. Puede contribuir al diseño de rutas y modos de transporte más seguros y fiables, a la reducción del impacto ambiental derivado del uso del vehículo privado, así como a la priorización del transporte de mercancías, el transporte urbano, los peatones u otros colectivos de usuarios en un momento determinado (Dimitrakipoulos et al., 2020).

Los SIT permiten gestionar y supervisar la red de carreteras y mantener un equilibrio entre los distintos actores. Los profesionales y diseñadores de SIT pueden satisfacer las necesidades competitivas de los residentes, visitantes o propietarios de tiendas de un área y, al mismo tiempo, proteger el medio ambiente y proporcionar medios de transporte seguros y cómodos para cualquiera persona (IMT,1999).

El funcionamiento inteligente de los vehículos privados y comerciales y la eficiencia de los servicios de transporte masivo afectan a la calidad de vida, al trabajo, a los desplazamientos a pie o al juego y a la socialización. Los efectos del uso de los servicios SIT son positivos para las personas, los vehículos y la red de vialidades e infraestructuras. Las vías de acceso controlado en las zonas residenciales son más silenciosas y seguras para los usuarios. La fluidez del tráfico se traduce en una reducción de los niveles de ruido y de las emisiones de gases de escape (Gobierno de la Ciudad de México, 2020).

Por último, los SIT tienen un impacto positivo sobre los usuarios vulnerables de la vía pública. Las personas con problemas de movilidad pueden recibir apoyo de servicios de movilidad avanzada y un diseño de movilidad fácil de usar. Los niños y ancianos pueden estar más seguros cuando caminan por la ciudad y los ciclistas pueden disfrutar de una mayor seguridad con carriles exclusivos o sistemas de advertencia UVVP (Usuarios Vulnerables en la Vía Pública) para conductores de automóviles. Los UVVP siguen siendo un tema abierto para los SIT, ya que el

número de víctimas está disminuyendo, pero mucho más lento que el número total de accidentes graves y mortales. A parte de los sistemas de seguridad pasiva que ya existen en la mayoría de los vehículos, la protección de los usuarios vulnerables necesita un cambio de comportamiento adicional por parte de los conductores, y además de un diseño de carreteras y transporte orientado a estos usuarios que les dé prioridad (Dimitrakipoulos et al. 2020).

A continuación, se muestra un diagrama resumen de los puntos principales de cada grupo de beneficiarios en la aplicación de los SIT:

Conductores:

1. Beneficios para conductores: interconexión en 3 formas
2. Sistemas de información
3. Sistemas de alerta
4. Sistemas de intervención
5. Mayor intervención = mayor eficacia
6. Efectos indirectos: distracción, frustración, compensación
7. Tipo de señales afecta comportamiento
8. Señales acústicas irritan, pero son efectivas
9. Mantenerse alerta a condiciones del camino
10. Seguridad del conductor

Usuarios y viajeros de la vía pública:

1. Mayor seguridad
2. Información valiosa sobre viajes, rutas y tiempos de transporte
3. Acceso más fácil al estacionamiento
4. Peatones y grupos vulnerables más seguros
5. Prioridad del sistema de transporte para ellos
6. Usuarios del transporte público con más opciones y mejor información
7. Infraestructura de transporte mejor vigilada y mantenida
8. Reducción de daños y recuperación más rápida en emergencias

Profesionales de transporte:

1. Apoyo significativo en el trabajo
2. Mejora del resultado final
3. Diseño de rutas y medios de transporte seguros y fiables
4. Reducción del impacto ambiental del vehículo privado
5. Priorización del transporte de mercancías, urbano, peatones, u otros grupos
6. Gestión y supervisión de la red de carreteras
7. Equilibrio entre diferentes actores del transporte
8. Satisfacción de necesidades competitivas de residentes, visitantes, propietarios de tiendas
9. Protección del medio ambiente
10. Proporcionar medios de transporte seguros y cómodos

Empresas regionales:

1. Mejora para personas, vehículos, red de carreteras e infraestructuras
2. Carreteras de acceso controlado en zonas residenciales: más silenciosas y seguras
3. Fluidez del tráfico: reduce ruido y emisiones de gases
4. Funcionamiento inteligente de vehículos privados y comerciales
5. Eficiencia de servicios de transporte masivo
6. Afecta calidad de vida, trabajo, desplazamientos a pie, juego y socialización

Usuarios Vulnerables De La Vía Pública:

1. Personas con discapacidad:
 - a. Apoyo de servicios de movilidad avanzada
 - b. Diseño de movilidad fácil de usar
2. Niños y ancianos:
 - a. Mayor seguridad al caminar por la ciudad
3. Ciclistas:
 - a. Mayor seguridad con carriles exclusivos o sistemas de advertencia UVVP
4. Desafíos y mejoras necesarias:
 - a. Reducción de víctimas de usuarios vulnerables aún es lenta
 - b. Necesidad de cambio de comportamiento de conductores
 - c. Diseño de carreteras y transporte orientado a usuarios vulnerables
 - d. Sistemas de alerta y autónomos para minimizar impacto de accidentes

Bibliografía recomendada del capítulo

1. Dimitrakopoulos George, Uden Lorna, Varlamis Iraklis. The future of intelligent transport systems. 1st edition. Amsterdam. Elsevier. 2020.
2. Hay., W. W. An Introduction to Transportation Engineering. 2nd edition. New York: John & Wiley & Sons, 1997.
3. Hoel, Lester A., Nicholas, J. Garber. Transportation Infrastructure Engineering. A Multimodal Integration. 2nd edition. Stamford, C. T. Cengage Learning, 2011.
4. Novack et. al. Transportation a Global Supply Chain Perspective. 9th edition. Boston. Cengage, 2018.
5. Sussman Joseph M. Perspectives On Intelligent Transportation Systems (ITS). 1st edition. New York: Springer, 2005.

3. CATEGORÍAS

Las categorías que se muestran en este capítulo se clasifican de acuerdo con el funcionamiento y propósito de brindar un servicio para el mejoramiento de las vialidades. Cada categoría fue desarrollada con múltiples fases para la resolución de un problema, tomando la tecnología vigente y los desarrollos tecnológicos que se han producido. Los diferentes SIT se han desarrollado para los vehículos motorizados, para el sistema vial y para el peatón. Actualmente, hay una gran variedad de SIT que se dividen en cuatro categorías principales (IMT, 1999):

1. Sistemas de gestión de vías controladas e incidentes
2. Sistemas avanzados de control de tráfico
3. Sistemas avanzados de transporte público
4. Sistemas avanzados de información al viajero

Es importante recalcar que, en los últimos años, como se mencionó en la Introducción, los SIT han evolucionado de acuerdo con las herramientas tecnológicas del momento, para ello en este capítulo se describirá también el futuro de los SIT a corto y mediano plazo.

3.1. SISTEMAS DE GESTIÓN DE VÍAS CONTROLADAS E INCIDENTES

Los Sistemas de Gestión de Vías Controladas e Incidentes (SGVCI) son herramientas tecnológicas diseñadas para gestionar y optimizar el uso de infraestructura de transporte, así como coordinar y responder eficientemente a incidentes y emergencias en carreteras y vías urbanas. Los SGVCI son de suma importancia para el mejoramiento de seguridad vial, reducción en la congestión de tráfico y en la minimización de los tiempos de respuesta en accidentes e imprevistos (Hoel et al., 2011).

3.1.1. Componentes de los Sistemas de Gestión de Vías Controladas e Incidentes

Según Hoel et al. (2011), los SIT se componen de cuatro componentes principales:

1. Detectores
2. Software
3. Hardware
4. Red Comunicaciones

Los SGVCI se dividen en cuatro componentes:

A. Monitoreo y Detección de incidentes:

- Cámaras de Vigilancia: Instaladas a lo largo de las vías para proporcionar imágenes en tiempo real del tráfico y posibles incidentes.
- Sensores de Tráfico: Dispositivos que miden el flujo y la velocidad del tráfico, detectando anomalías que pueden indicar un accidente o congestión.
- Sistemas de Detección Automática de Incidentes (DAI): Utilizan algoritmos para analizar los datos de sensores y cámaras para así detectar automáticamente incidentes.

B. Gestión del Tráfico:

- Central de Control de Tráfico: Centro de recopilación y análisis de datos de tráfico en tiempo real, y donde se coordinan las respuestas
- Sistemas de Control de Señalización: Ajustan semáforos y otras señales de tráfico en tiempo real para gestionar el flujo vehicular de manera óptima.
- Paneles de Mensajes Variables (PMV): Informan a los conductores sobre el estado del tráfico, condiciones meteorológicas, y otros avisos importantes.

C. Comunicación y Coordinación:

- **Sistemas de Comunicación:** Enlazan a los equipos de emergencia, operada de carreteras y otros actores relevantes para coordinar respuestas rápidas y efectivas.
- **Protocolos de Respuesta:** Procedimientos estandarizados para manejar diferentes tipos de incidentes, desde pequeños accidentes hasta desastres mayores.

D. Información al Usuario:

- **Aplicaciones y servicios en Línea:** Proporcionan información en tiempo real a los usuarios sobre el estado del tráfico, rutas alternativas y tiempos estimados de viaje.
- **Sistemas de Navegación:** Integrados en vehículos, estos sistemas ofrecen rutas optimizadas basadas en datos de tráfico en tiempo real.

De acuerdo con Hoel et al. (2011) los objetivos y beneficios de los SGVCI son los siguientes:

- **Reducción de Tiempos de Respuesta:** Permiten una detección rápida y una respuesta eficiente a los incidentes, minimizando el impacto en el tráfico.
- **Mejora de la Seguridad Vial:** Reducen la posibilidad de accidentes secundarios y mejoran la seguridad general en las vías.
- **Optimización del Flujo Vehicular:** Ajustan la señalización y gestionan el tráfico para reducir congestiones y tiempos de viajes.
- **Información en Tiempo Real:** Proveen a los conductores con información actualizada, permitiéndoles tomar decisiones informadas sobre sus rutas.

Detector de bucle de inducción (DBI)

La tecnología de detector de bucle de inducción (DBI) se utiliza con mayor frecuencia cuando se realizan mediciones en un punto específico de una vía. Esta tecnología comenzó a utilizarse para detectar tráfico en la década de 1960. De acuerdo con Fricker Jon y Whitford Robert (2018) los detectores de bucle funcionan con él envió de una corriente alterna a través de un bucle y creando un campo magnético. Cualquier vehículo que circule sobre el bucle provocará un cambio en el campo magnético y un cambio detectable en la corriente. Cuando la inductancia o frecuencia del bucle supera un umbral preestablecido manda una señal de detección de vehículo.

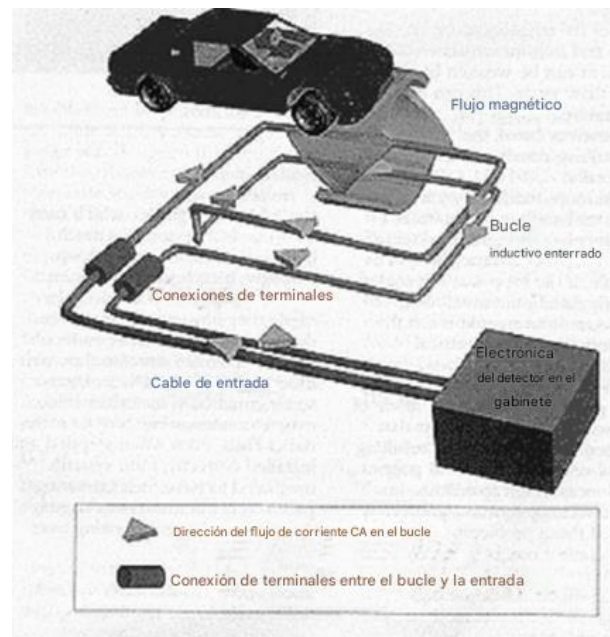
Los componentes principales de los detectores de bucle incluyen (Bronzini, 2004):

- Una o más vueltas de cable aislado enterradas en un corte de sierra estrecho y poco profundo en la calzada.
- Cable de entrada que conecta el bucle al detector a través de una caja extraíble al borde de la carretera.
- Unidad detectora (o amplificador) que interpreta los cambios en las propiedades eléctricas del bucle cuando un vehículo pasa por encima de él.

Los datos que se pueden determinar a partir de los DBI incluyen la ocupación del carril, las densidades de tráfico, la composición del tráfico, las velocidades medias e instantáneas de los vehículos, la presencia de congestión y la duración de los congestionamientos. Dependiendo de la tecnología utilizada, estos datos pueden ser determinados directa o indirectamente por los DBI. Los datos que generen los DBI, en combinación con otros datos como las condiciones meteorológicas, también se pueden utilizar para construir modelos de tráfico y calibrar modelos de estimación de tránsito. En la Figura 4 se muestra la configuración del detector de bucle, posteriormente en la Figura 5 se muestra la instalación y la puesta en operación del DBI. Hoel et al. (2011) menciona que los DBI no siempre son confiables, ya que puede fallar cuando se dañan por el tráfico pesado.

Además, la instalación y el mantenimiento de los DBI requieren el cierre de carriles y modificaciones al pavimento.

Figura 4 Configuración de un Sistema de un DBI



Fuente: Bronzini (2004).

Figura 5 Instalación y Operación del DBI



Fuente: Crossroads (2020) y ECM (2024)

Radars de Microondas

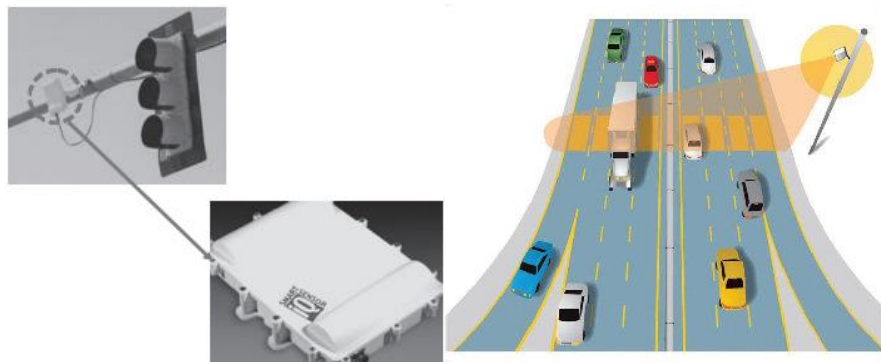
Los radares de microondas son un SIT que permiten detectar objetos y proporcionar información precisa sobre su posición y movimiento, de acuerdo con Garber y Hoel (2018), los sensores de tráfico basados en radar de microondas funcionan con el principio de Doppler, esto es, cuando una señal transmitida se refleja desde un vehículo en movimiento, el cambio de frecuencia entre la señal transmitida y reflejada es proporcional a la velocidad del vehículo en movimiento.

La diferencia entre la frecuencia de la señal transmitida y la de la señal reflejada es medida por el radar y luego convertida en velocidad. Los estudios de velocidad basados en radar se pueden realizar de dos maneras: En primer lugar, un operador puede recopilar manualmente las velocidades utilizando un dispositivo de radar similar a los utilizados por la policía. En segundo lugar, los radares se pueden instalar al lado o por encima de la vía para recopilar datos de manera automatizada y constante (Hoel et al., 2011).

Cuando los radares se colocan por encima de la vía, pueden medir las velocidades de los vehículos que se acercan o se alejan del equipo en un solo carril. Cuando una unidad de radar se coloca al costado de la carretera, captura datos de una dirección paralela a la dirección del viaje. Se debe tener cuidado de reducir el ángulo entre la dirección del vehículo en movimiento y la línea de visión del radar ya que el valor de la velocidad registrada depende de este ángulo. Si el ángulo no es cero, se induce un error relacionado con el coseno de ese ángulo, lo que resulta en una velocidad menor que la que se habría registrado si el ángulo hubiera sido cero. Sin embargo, este error no es muy grande porque los cosenos de ángulos pequeños no son mucho menores que uno (Hoel et al., 2011).

Una ventaja de utilizar radares es que son discretos y es poco probable que influya en la velocidad de la mayoría de los conductores. Al recopilar datos utilizando una unidad de radar portátil, los operadores deben asegurarse de que pasen desapercibidos para que no influyan en la velocidad del tráfico, en la Figura 6 se muestra del posicionamiento de los radares de microondas.

Figura 6 Radar en modo prospectivo y modo de disparo lateral

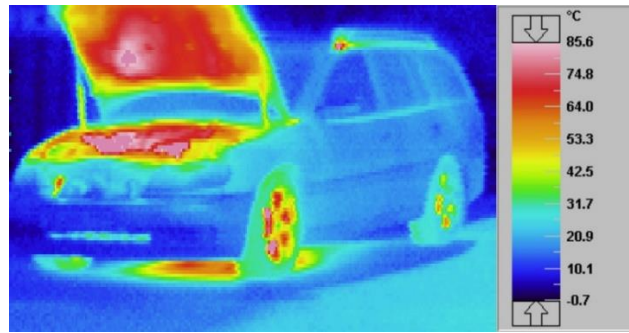


Fuente: Wazir (2024)

Radar infrarrojo

Hoel et al. (2011) menciona que los sensores infrarrojos son detectores no intrusivos que pueden ser pasivos o activos. Los sensores pasivos no transmiten energía, sino que detectan la energía que emiten o reflejan los vehículos, las superficies de las carreteras y otros objetos. La cantidad de energía transmitida es una función de la temperatura, el tamaño y la estructura de la superficie. Cuando un vehículo entra en la zona de detección, crea un aumento en la energía transmitida en comparación con una superficie estática de la carretera. Los detectores infrarrojos pasivos pueden medir la velocidad, la longitud del vehículo, el volumen del vehículo y la ocupación. Dado que su precisión se ve afectada por las condiciones climáticas adversas, no siempre confiables. En la Figura 7 se muestra el ejemplo de la visión de un radar infrarrojo.

Figura 7 Detector pasivo de infrarrojo

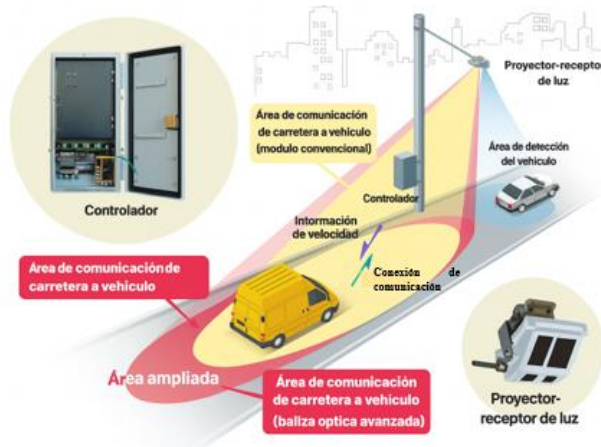


Fuente: Henning (2006)

Los detectores de infrarrojos activos son similares a los detectores de radar de microondas, ya que dirigen un haz estrecho de energía hacia la superficie de la carretera. El haz se dirige de vuelta a los sensores y los vehículos se detectan observando los cambios en el tiempo de prolongación de ida y vuelta del haz infrarrojo.

Los detectores infrarrojos activos miden el paso, la presencia y la velocidad del vehículo. La velocidad se mide contando el tiempo que tarda un vehículo en cruzar el rayo infrarrojo. Algunos detectores activos tienen la capacidad de clasificar vehículos midiendo e identificando sus perfiles. La precisión puede verse afectada por condiciones climáticas como niebla y precipitación. En la Figura 8 se observa el funcionamiento de los radares activos.

Figura 8 Detector activo de infrarrojo



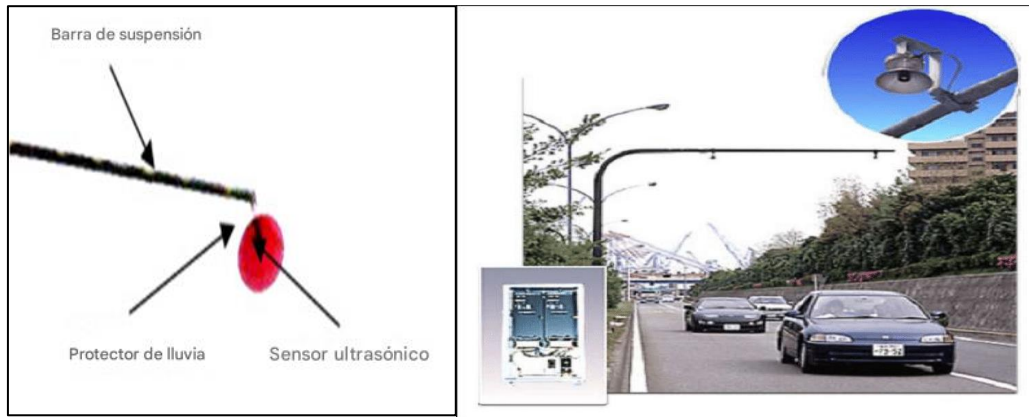
Fuente: Hoel et. al. (2011)

Radar ultrasónico

Los radares ultrasónicos son algo similares a los dispositivos de radar de microondas en el sentido de que funcionan según el principio de Doppler. Sin embargo, utilizan energía sonora ultrasónica y no de microondas. Estos dispositivos generalmente se colocan sobre el carril o carriles de tráfico donde se recopilarán los datos. Los puntos de energía sonora ultrasónica se emiten desde el dispositivo al vehículo que pasa y se reflejan de nuevo al dispositivo. Un vehículo se detecta cuando el tiempo que tarda la energía sonora en volver al dispositivo es menor que el del fondo normal de la superficie de la carretera como se muestra en la

Figura 9 (Hoel et al. ,2011).

Figura 9 Radar ultrasónico

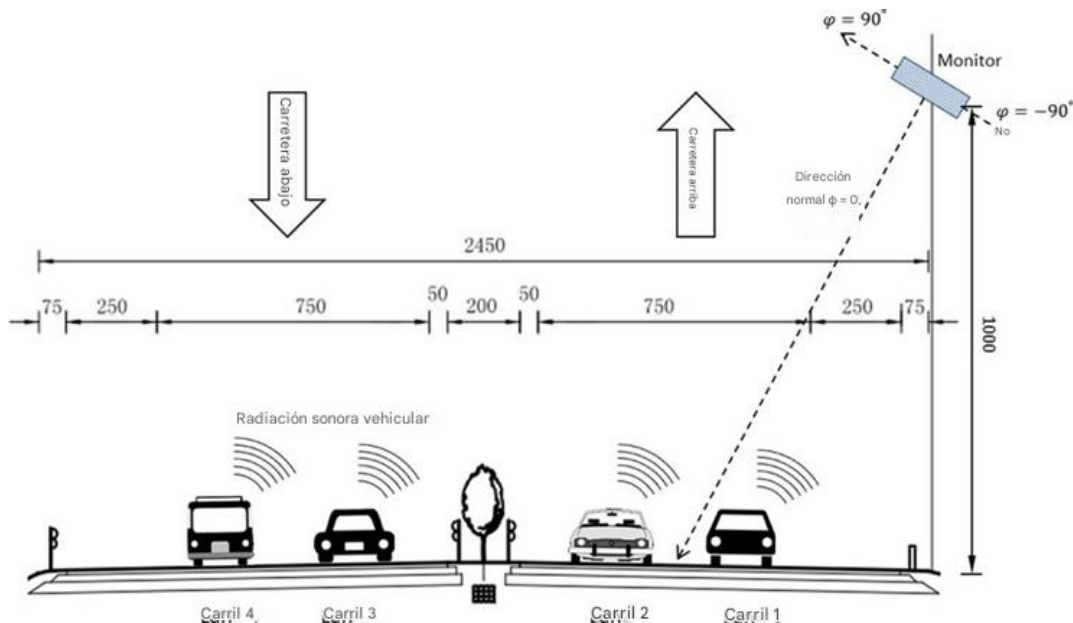


Fuente: Appiah et. al. (2020) y Wahhab (2018)

Tecnologías acústicas pasivas

Las tecnologías acústicas pasivas incorporan una serie de micrófonos apuntando hacia el flujo de tráfico; los micrófonos detectan el sonido de un vehículo a medida que pasa por la zona de detección. Los detectores acústicos utilizan una serie de micrófonos acústicos para detectar los sonidos de los vehículos en un solo carril de la vía. Cuando un vehículo pasa por la zona de detección, un algoritmo de procesamiento de señales detecta un aumento de la energía sonora y se genera una señal de presencia del vehículo. Cuando el vehículo sale de la zona de detección, la energía sonora disminuye por debajo del umbral de detección y la señal de presencia del vehículo se termina como se muestra en la Figura 10 (Hoel et al. ,2011).

Figura 10 Tecnologías acústicas



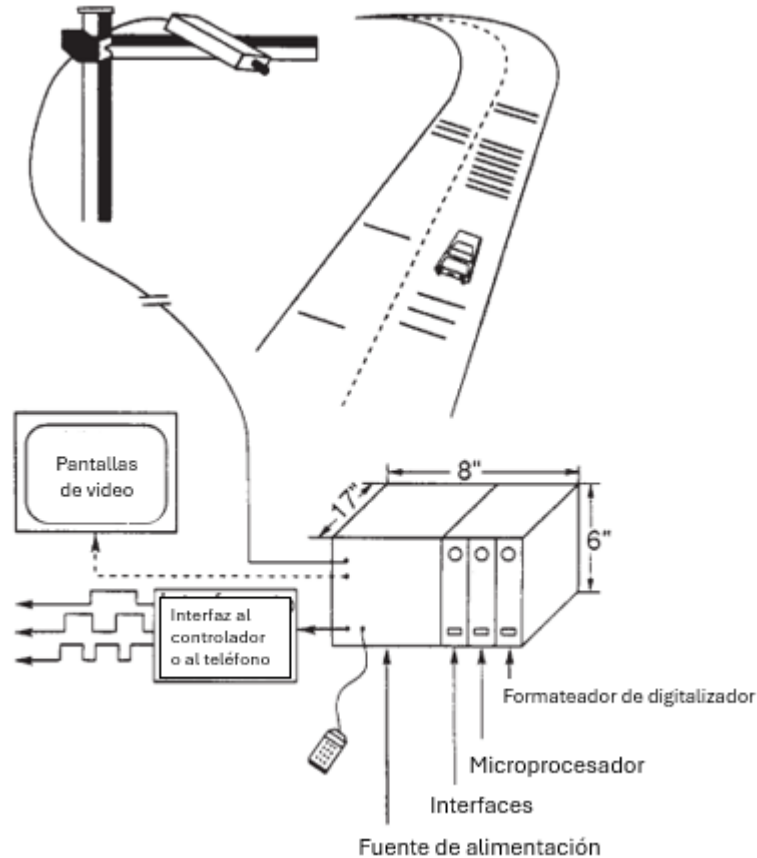
Fuente: Yueyue (2016)

Procesamiento de imágenes de video

El procesamiento de imágenes de video, también denominado sistema de visión artificial o de detección, se compone de uno o más dispositivos de captura (cámaras), una computadora capaz de

digitalizar y procesar las imágenes, y un paquete de software que convierte dichas imágenes en información útil, como velocidad, volumen, colas y evolución del flujo de tráfico en tiempo real. Un autoscopio es un ejemplo de equipo que utiliza el procesamiento de imágenes de video, consiste en una o más cámaras en una sección de la vía y un microprocesador. La cámara captura las imágenes de la carretera; el microprocesador determina la presencia o el paso del vehículo y toma su registro en una base de datos. Esta información se utiliza para determinar las características del tráfico en tiempo real. En la Figura 11 se ilustra esquemáticamente la configuración del autoscopio (Hoel et al. ,2011).

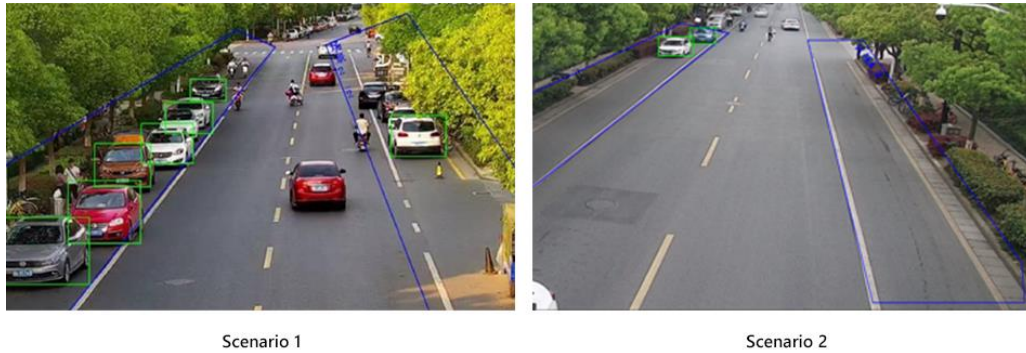
Figura 11. Esquema del Autoscopio



Fuente: Hoel et. al. (2011)

Las cámaras se pueden instalar sin interrumpir las operaciones del tránsito, como ocurre a menudo con la los DBI, y la configuración de detección se puede cambiar manualmente o mediante una rutina de software. El dispositivo también es capaz de extraer parámetros de tráfico como el volumen y las longitudes de las filas. En la Figura 12 se muestra una fotografía de un autoscopio desplegado en sitio. A la hora de desplegar sistemas de video detección, hay que tener en cuenta varias consideraciones. Por ejemplo, las cámaras deben colocarse de manera que los camiones grandes no bloqueen la vista de los carriles de tráfico adyacentes. De lo contrario, se podría perder la detección de vehículos, ya que el camión los bloquearía del campo de visión de la cámara. La niebla también puede crear problemas con la detección de video, por lo que se debe tener cuidado cuando se usa en áreas propensas a la niebla.

Figura 12 Imagen del análisis del procesamiento de la imagen



Fuente: Dahua (2022)

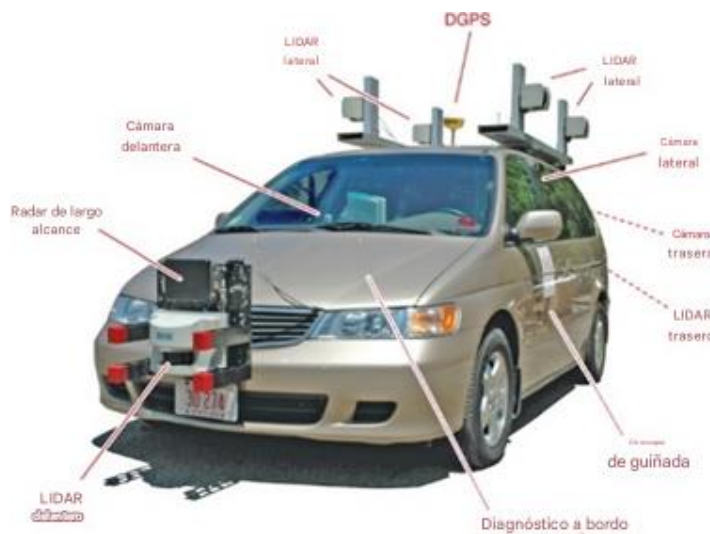
Vehículo Sonda

Los vehículos sonda, como el que se muestra en la Figura 13, son vehículos equipados con diversos sensores que permiten su seguimiento mediante tecnologías de posicionamiento y comunicación. Estos vehículos transmiten su ubicación a una computadora central, donde se combinan datos provenientes de diferentes fuentes para determinar el estado del flujo de tráfico en el sistema de transporte analizado.

Los vehículos sonda pueden proporcionar información valiosa que no está disponible a través de otras técnicas de detección. Entre los datos que pueden ofrecer se encuentran los tiempos de viaje por tramo, las velocidades promedio y la información de origen–destino. Existen tres tecnologías distintas que emplean vehículos sonda, según Garber y Hoel (2018).

1. Identificación Automática de Vehículos (IAV)
2. Ubicación Automática de Vehículos (UAV)
3. Muestreo Anónimo de Llamadas a Móviles (MAM)

Figura 13 Funcionamiento de un Vehículo Sonda



Fuente: Coifman et. al. (2016)

Identificación Automática de Vehículos (IAV)

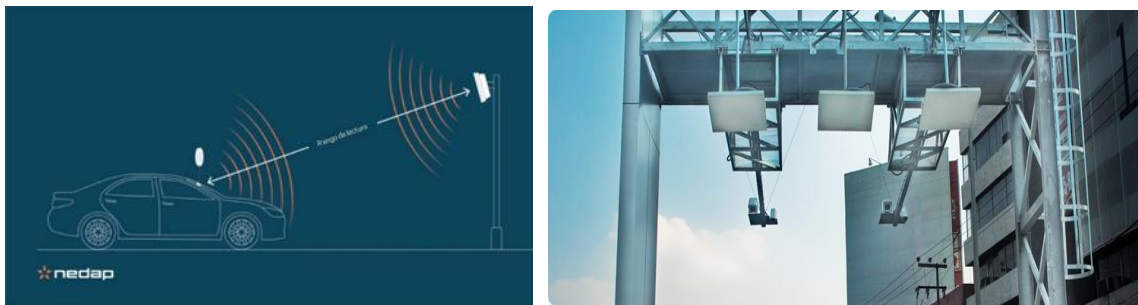
En la actualidad, la Identificación Automática de Vehículos (IAV) mediante zonas de detección se ha consolidado como una fusión estándar de los SIT en las redes de autopistas. Según William (1977), la IAV emplea escáneres electrónicos instalados en pórticos carreteros para leer las placas vehiculares, las cuales presentan combinaciones alfanuméricas impresas sobre tiras, etiquetas reflejantes, pero en la actualidad también funcionan con dispositivos de corto alcance, como la tecnología NFC. Asimismo, estos sistemas pueden comparar los identificadores únicos leídos en distintos puntos de la vía, para calcular el tiempo de recorrido entre secciones y generar información operativa en tiempo real.

Los vehículos deben contar con un transpondedor el cual es un transmisor y respondedor. Los IAV se distinguen por tres sistemas de tecnología en transpondedor:

- Solo lectura: El transpondedor en el vehículo transmite información a la unidad de la carretera; todos los registros permanecen en las bases de datos de los operadores.
- Lectura y escritura: El transpondedor del vehículo transmite información a la carretera y puede almacenar información de la carretera; tanto el usuario como los operadores conservan un registro del registro.
- Tarjeta inteligente: Integra lo anterior con otros servicios de usuario (es decir, pago de transporte público y estacionamiento, tarjeta de crédito y bancaria) y ofrece una opción de cifrado avanzada.

El equipo vial necesario para la IAV consiste en antenas instaladas en un paso elevado existente o en una estructura metálica ligera llamada pórtico. Algunos sistemas también incluyen detectores para la llegada y salida de vehículos en el área de detección. La comunicación entre las antenas de la carretera y el transportador del vehículo se realiza varias veces por segundo en el área de detección. Después de realizar la identificación, se puede realizar y confirmar una tarifa. El pago de la tarifa se puede realizar a través de facturas periódicas enviadas a los usuarios, o se puede descontar de un sistema de prepago o tarjeta de crédito. Estos sistemas son comúnmente utilizados en los sistemas de peaje, sin embargo, también puede determinar tiempo medio de viaje (Papacostas, 2007) La Figura 14 muestra un ejemplo de los identificadores automáticos de vehículos.

Figura 14 Sistema de funcionamiento de la Identificación Automática de Vehículos



Fuente: NEDAP (2024) y INDRA (2019)

Ubicación Automática de Vehículos (UAV)

Al igual que los IAV, otro SIT que ha predominado en la actualidad son los sistemas de Ubicación Automática de Vehículos (UAV). De acuerdo con Hoel et. al. (2011) la UAV determina la ubicación de los vehículos a medida que viajan por la red. Estos sistemas pueden localizar y despachar vehículos de emergencia, localizar vehículos de transporte público en tiempo real y determinar su hora prevista de llegada a las paradas. Los UAV utilizan varias tecnologías para su

funcionamiento como; la estimación directa, radio terrestre, la señalización y el odómetro. Actualmente, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), es la tecnología más utilizada para las ubicaciones de vehículos.

El GPS es un sistema basado en satélites que utiliza una constelación de 31 satélites para dar al usuario una posición precisa (A21, 2025). El GPS es una tecnología que fue diseñada originalmente para uso militar en cualquier momento y en cualquier lugar de la superficie de la tierra. Las dos primeras aplicaciones civiles importantes que surgieron fueron la navegación marítima y la topográfica. Hoy en día las aplicaciones incluyen la navegación en el automóvil, la gestión de flotas de camiones, y la automatización de maquinaria de construcción. La precisión de los GPS va desde menos de un centímetro con levantamientos estáticos, hasta aproximadamente 2 mts. utilizando métodos cinemáticos en tiempo real (Garber ,2018).

Hay que mencionar que el GPS es una tecnología estadounidense operado por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Sin embargo, otras naciones han implementado sistemas de posicionamiento global como lo es el sistema GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) en Rusia (GLONASS ,2025). China utiliza el sistema BeiDou BDS (BeiDou Navigation Satellite System) el cual fue construido y esta operado totalmente por el gobierno chino, con el propósito de priorizar la seguridad nacional y su desarrollo de capital. El BDS cuenta con 45 satélites operativos permitiendo tener una ventaja competitiva con el sistema GPS de Estados Unidos (BeiDou, 2025).

Por último, la unión europea cuenta con Galileo que es un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) creado por la Unión Europea que proporciona información de posicionamiento y tiempo. Este sistema cuenta con una constelación de 30 satélites, donde 24 se encuentran en operación y 6 de sistemas de reserva. Este sistema brinda información para el público en general, además de tener sistemas para empresas de desarrollo y logística (INTA, 2025).

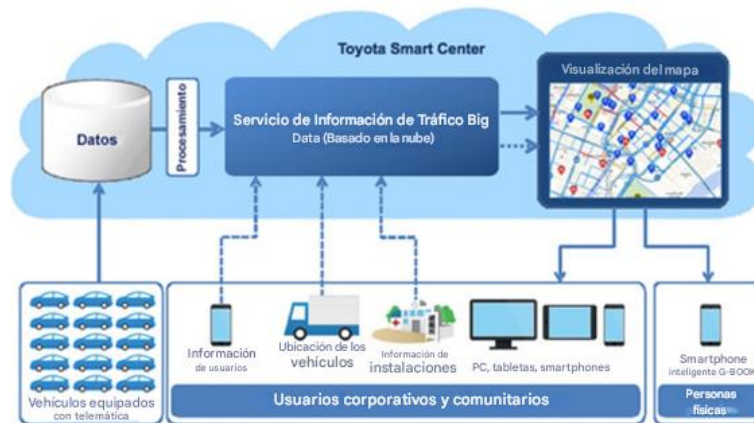
Información vial por medio de teléfonos celulares

La difusión de información vial mediante los teléfonos celulares se ha convertido en uno de los componentes de SIT con mayor alcance entre la población. Gracias a estos dispositivos, es posible aprovechar su conectividad para detectar incidentes y enviar alertas en tiempo real sin necesidad de desplegar infraestructura de alto costo (Garber, 2018). Un ejemplo complementario es la patrulla de servicio en autopistas, que pueden recibir avisos a través de sus dispositivos móviles y mediante un mapa pueden llegar al punto donde se encuentre un accidente vial o suceso que afecte el flujo vial.

Este tipo de difusión requiere de una plataforma de comunicación digital que combine paquetes de datos, protocolos de internet y servicios de la nube, bajo el esquema conocido como sistemas de información al viajero donde los servidores recopilan, procesan y distribuyen el estado de la vía a todo tipo de dispositivos (paneles, aplicaciones móviles o centros de control), lo que se traduce en mayor seguridad y reducción de retrasos (Sussman, 2005)

Los teléfonos celulares que cuentan con aplicaciones basadas en geolocalización llevan a cabo un proceso de recolección de datos generados por los usuarios, estos datos sirven para optimizar rutas o tiempos de espera y forman parte de la tendencia de la movilidad compartida. De manera análoga, el Toyota Smart Center ilustrado en la Figura 15, funciona con una plataforma en la nube que conecta todos los vehículos de la marca, recopila información en tiempo real y, mediante técnicas de big data, construye un mapa dinámico de la red vial que se visualiza en dispositivos electrónicos de los conductores. Este ecosistema demuestra cómo la integración de datos vehiculares y telefónicos está redefiniendo la operación de los SIT y facilitando las decisiones para los conductores en su planificación de rutas.

Figura 15 Sistema de funcionamiento de la Información vial por medio de teléfonos celulares



Fuente: Infonegocios (2013)

Centros de Control

Los centros de control son componentes presentes en la mayoría de los sistemas de transporte. Según Hoel et al. (2011), los centros de control de tráfico para los modos aéreo, ferroviario o carretero requieren instalaciones capaces de monitorear los patrones de tránsito cuando las condiciones lo justifican. El control comprende los elementos necesarios para asignar el derecho de vía; en consecuencia, dicha asignación depende directamente de estos centros. Los primeros centros de control se establecieron en los ámbitos marítimo y aéreo a fin de determinar el tráfico en la zona y realizar el monitoreo permanente de las unidades.

Hoy en día, los centros de control pueden monitorear la ubicación de una gran cantidad de vehículos. Lo que permite informar en tiempo real las condiciones de las vías a los usuarios. Actualmente, los centros de control manejan el control de las vías principales en ciudades al contar con un monitoreo de incidentes de tránsito o percances externos que pueden llegar afectar a los usuarios.

Los centros de control permiten monitorear y gestionar accidentes, lo que facilita que los cuerpos de emergencia (patrullas, ambulancias, bomberos, entre otros) lleguen oportunamente al lugar del percance. Al mantenerse conectados los diversos servicios de emergencia, las maniobras de control se ejecutan de forma óptima, pues la gravedad del incidente sirve de base para generar soluciones adecuadas y restablecer el flujo vehicular.

Cuando ocurre un siniestro en una autopista de cuatro carriles por sentido, el centro de control recibe la alerta y evalúa la magnitud del suceso; a continuación, despacha los vehículos de emergencia necesarios y una brigada de tránsito para habilitar un paso controlado hasta que la zona quede despejada. En la actualidad, la detección de accidentes suele realizarse mediante personal que monitorea por turnos las 24 horas; sin embargo, se han desarrollado tecnologías que permiten a sistemas autónomos procesar reportes generados desde distintos puntos de acceso de las vialidades primarias y secundarias, así como de las autopistas.

Detección Automática de Incidentes (DAI)

A diferencia de los centros de control operados por personal humano, en los últimos años se han buscado soluciones más eficientes aprovechando los avances tecnológicos. Hoel et al. (2011) destacan los sistemas de Detección Automática de Incidentes (DAI), los cuales emplean algoritmos que identifican eventos en tiempo real a partir de los datos recopilados por detectores de tráfico. Para evaluar el desempeño de estos algoritmos se utilizan tres indicadores principales: la Tasa de Detección (TD), la Tasa de Falsas Alarmas (TFA) y el Tiempo de Detección (TDD).

La Tasa de Detección (TD) mide la eficacia del algoritmo para identificar incidentes y se calcula como la razón entre el número de incidentes correctamente detectados y el número total de incidentes ocurridos. Sus valores suelen oscilar entre 0% y 100%; cuanto más se acerquen al 100%, mayor es la eficacia del algoritmo.

La Tasa de Falsas Alarmas (TFA) representa la proporción entre el número de detecciones erróneas y el número total de observaciones realizadas. Por lo general, los algoritmos analizan los datos a intervalos regulares, por ejemplo, cada 30 segundos o cada minuto, y la TFA se expresa como un porcentaje por estación detectora o como el número total de alertas falsas registradas durante el periodo de estudio.

El Tiempo de Detección (TDD) corresponde al intervalo transcurrido entre la ocurrencia de un incidente y su identificación por el algoritmo. A partir del TDD de varios eventos se obtiene el Tiempo Medio de Detección (TMD), que indica el promedio del tiempo de detección para el conjunto de incidentes analizados.

Los tres parámetros están correlacionados entre sí. Por ejemplo, el aumento del valor de la TD da como resultado un aumento correspondiente en la TFA. Si se aumenta el tiempo de detección TDD del algoritmo, tanto los valores de la TD como la TFA mejorarían.

Supongamos que, en la Ciudad de Xalapa, Veracruz cuentan con un centro de gestión de tráfico que emplea como herramienta el SIT que emplea la tecnología de DAI. El algoritmo se aplica cada 20 segundos. Para evaluar el rendimiento del algoritmo, se observó el tráfico durante un periodo de un mes (30 días) en el que se produjeron un total de 60 incidencias. De este número, el algoritmo detectó correctamente un total de 48 incidentes. El algoritmo proporcionó 1000 falsas alarmas durante el periodo de observación, por lo que se determinará la Tasa de Detección TD y la Tasa de Falsas Alarmas TFA.

Para la obtención de la TD se considera la relación entre el número de incidentes detectados y el número total de incidentes que ocurren.

$$DR = \frac{48}{60} * 100 = 80\%$$

Para la obtención de la TFA se considera la relación entre el número de detecciones incorrectas y el número total de veces que se aplicó el algoritmo. Por lo tanto, primero es necesario determinar el número de veces que se aplicó el algoritmo. Dado que el algoritmo se aplica cada 40 s y el periodo de observación fue un mes de 30 días, el número de veces que se aplicó el algoritmo es de:

$$30 \text{ dias} * 24 \text{ horas} * 60 \text{ minutos} * 3 \frac{\text{aplicaciones}}{\text{minuto}} = 129,600 \text{ veces}$$

Por lo tanto:

$$TFA = \frac{1000}{129,600} * 100 = 0.7716\%$$

Una vez obtenido las tasas de la DAI, se puede obtener un Índice de Rendimiento (IR), el cual es una medida que se utiliza para calibrar los algoritmos DAI. Esta medida también se puede utilizar para calibrar los algoritmos para una ubicación determinada, en la siguiente ecuación se muestra la forma para determinar el IR (Hoel et al.,2011):

$$IR = \left[\frac{100 - TD}{100} \right]^m * TFA^n * TMD^p$$

Dónde:

TD: Tasa de Detección

TFA: Tasa de Falsas Alarmas

TMD: Tiempo Medio de Detección (minutos)

m, n y p: coeficientes que se pueden usar para enfatizar o ponderar como se usan las tres medidas de rendimiento de un algoritmo (por ejemplo, el uso de valores más altos para el coeficiente m en comparación con n y p enfatizaría el papel de la tasa de detección del algoritmo en el juicio de su rendimiento).

Supongamos que una empresa de logística de camiones de carga desea comparar el rendimiento de 6 algoritmos DAI, contando con los registros de TD, TFA y TMD y se espera escoger el algoritmo con mejor rendimiento. Para ello, la empresa de logística del doble de peso a la detección y la tasa de falsas alarmas por lo que la expresión algebraica quedaría de la siguiente manera, la Tabla 1 muestra los resultados de los Índices de Rendimiento que se obtienen con las fórmulas de IR y TFA.

$$IR = \left[\frac{100 - TD}{100} \right]^2 * TFA^2 * TMD^1$$

Tabla 1 Resultados del algoritmo DAI

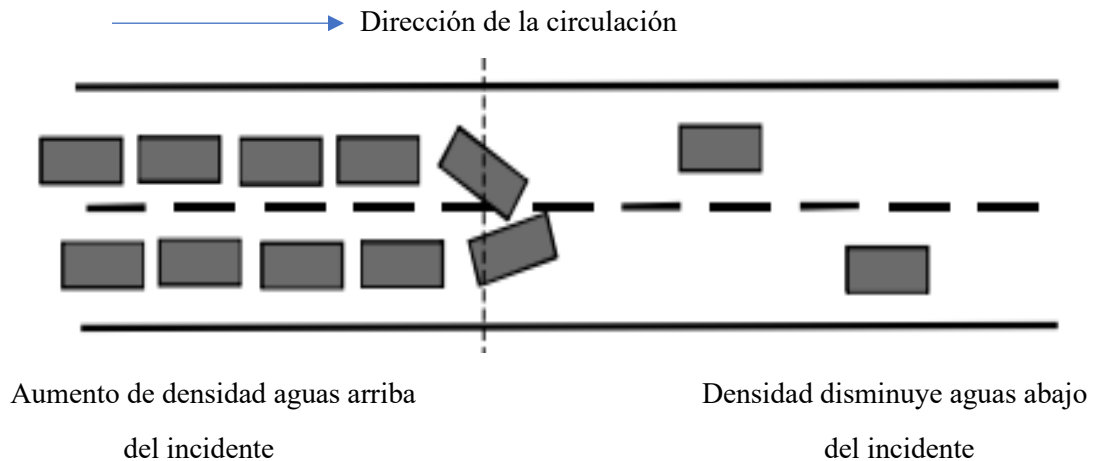
Algoritmo	TD (%)	TFA (%)	TMD (min)	IR
DAI 1	86	0.57	2.3	1.46E-02
DAI 2	95	1.14	1.4	4.55E-03
DAI 3	92	0.4	0.6	6.14E-04
DAI 4	91	1.52	0.9	1.68E-02
DAI 5	77	0.65	0.4	8.94E-03
DAI 6	84	0.89	0.5	1.01E-02

De la tabla anterior observamos que el DAI 3 cuenta con el IR más bajo y con un mejor rendimiento, por lo tanto, es la mejor opción para la empresa de logística de camiones. Continuando con los sistemas DAI, estos tienen divisiones que se encuentran en 4 sectores fundamentales del funcionamiento de estos SIT que son:

- I. Algoritmos de reconocimiento de patrones o de tipo comparativo:
- II. Algoritmos de la teoría de catástrofes
- III. Algoritmos basados en estadísticas
- IV. Algoritmos basados en inteligencia artificial

Algoritmos de reconocimiento de patrones o de tipo comparativo: Estos tipos de algoritmos se basan en la premisa de que la ocurrencia de un incidente dando como resultado un aumento en la densidad de los detectores de tráfico aguas arriba y una disminución en la densidad de los detectores aguas abajo. En la Figura 16 se muestra el funcionamiento de este sistema:

Figura 16 Cambios de ocupación como resultado de un incidente



Los algoritmos de tipo comparativo buscan distinguir entre patrones de tráfico “habituales” e “inusuales” comparando los volúmenes, densidades y velocidades de tráfico en las estaciones detectoras aguas arriba y aguas abajo con umbrales preestablecidos. Si los valores observados en el campo superan los umbrales establecidos, se activa una alarma que indica que pudo haber ocurrido un incidente. La parte más desafiante en la implementación de los algoritmos tipos comparativos consiste en establecer valores para umbrales preestablecidos, ya que los valores difieren para ubicaciones específicas de autopistas.

Uno de los algoritmos pioneros, según, Hoel et al. (2011) en los tipos comparativos es el llamado “California”, este sistema DAI comprueba un incidente comparando los valores de ocupación (densidad) de dos estaciones de detección adyacentes, de acuerdo con la siguiente lógica:

Paso 1: La diferencia entre la ocupación de la estación aguas arriba (OCC arriba) y la ocupación de la estación aguas abajo (OCC abajo) se compara con el umbral T1. Si se supera el valor umbral del algoritmo se continua con el paso 2.

Paso 2: La relación entre la diferencia en las ocupaciones aguas arriba y aguas abajo y la ocupación de la estación aguas arriba $((OCC \text{ arriba} - OCC \text{ abajo}) / OCC \text{ arriba})$ se verifica con el umbral T2. Si se supera este umbral, el algoritmo continuo con el paso 3.

Paso 3: La relación entre la diferencia en las ocupaciones aguas arriba y aguas abajo y la ocupación de la estación aguas abajo $((OCC \text{ arriba} - OCC \text{ abajo}) / OCC \text{ abajo})$ se compara con el umbral T3. Si se supera este umbral, se indica un posible incidente. No se indica ninguna alarma, pero el paso 2 se repite para el siguiente intervalo de tiempo. Si se vuelven a superar los umbrales T2 y T3, se supone que hay un posible accidente.

Un estado de incidente finaliza cuando ya no se supera el umbral T2. Los umbrales se calibran a partir de datos empíricos. La aplicación del algoritmo de California es bastante sencilla, pero es difícil de determinar los valores apropiados de los umbrales del algoritmo (T1, T2 y T3) para cada ubicación.

En la Tabla 2, se proporciona las lecturas de ocupación para dos estaciones de detección a lo largo de una autopista equipadas con el algoritmo DAI tipo California. Si el algoritmo se aplica a intervalos de tiempo regulares de 30s. sobre la base de la calibración, se determinaron tres valores de umbral T1: 20 T2: 0.25 y T3: 0.50. Por medio del algoritmo de California se busca determinar el periodo de tiempo en el que se activara una alarma de incidente:

Tabla 2 Lectura de ocupación por dos estaciones DAI

Dato 1	Dato 2	Dato 3	Dato 4	Dato 5	Dato 6
Tiempo	OCCarriba (%)	OCCabajo (%)			
1	63	13	50	0.79	3.85
2	65	18	47	0.72	2.61
3	62	20	42	0.68	2.10
4	68	17	51	0.75	3.00
5	70	25	45	0.64	1.80
6	67	22	45	0.67	2.05
7	62	25	37	0.60	1.48
8	51	30	21	0.41	0.70
9	40	32	8	0.20	0.25
10	35	32	3	0.09	0.09

$$\text{Dato 4: } (OCC_{arriba} - OCC_{abajo})$$

$$\text{Dato 5: } \frac{(OCC_{arriba} - OCC_{abajo})}{OCC_{arriba}}$$

$$\text{Dato 6: } \frac{(OCC_{arriba} - OCC_{abajo})}{OCC_{abajo}}$$

Después de las operaciones pertinentes, las columnas de datos 4 al 6 se comparan con los tres valores de umbral, T1, T2 y T3, respectivamente, para determinar si se superan los valores de umbral. Los resultados se muestran en la Tabla 3 donde se observa que se activaría después del tiempo 2 ya que el algoritmo necesita dos pasos de tiempo en los que se supere los umbrales antes de que se active la alarma para posteriormente terminar después del periodo 9.

Tabla 3 Determinación de incidentes por medio del sistema DAI

Dato 1	Dato 2	Dato 3	Dato 4 >T1	Dato 5 >T2	Dato 6 >T3
Tiempo	OCCarriba (%)	OCCabajo (%)			
1	63	13	si	si	si
2	65	18	si	si	si
3	62	20	si	si	si
4	68	17	si	si	si
5	70	25	si	si	si
6	67	22	si	si	si
7	62	25	si	si	si
8	51	30	si	si	si
9	40	32	no	no	no
10	35	32	no	no	no

Durante los últimos años, se han realizado mejoramientos en el algoritmo California. El algoritmo más complejo de la rama es el TSC 8 el cual proporciona una prueba repetitiva para la propagación de los efectos de congestión aguas arriba del incidente. También clasifica los volúmenes de tráfico en diferentes estados, que requieren que se calibren con más parámetros.

3.2. SISTEMAS AVANZADOS DE CONTROL DE TRÁFICO

Los sistemas viales que conforman la red de carreteras y vialidades urbanas como la señalización vertical y horizontal, así como los sistemas de semaforización crean la base física necesaria para la implementación eficaz de los SIT. En este marco, los Sistemas Avanzados de Control de Tráfico (SACT) se valen de dispositivos capaces de supervisar las condiciones de circulación, procesar la información recopilada y, con base en parámetros previamente definidos, regular las señales de tráfico y otros elementos que orientan la movilidad vehicular y peatonal (Grava, 2004).

El propósito principal de los SACT es optimizar la infraestructura existente mediante la incorporación de tecnologías de vanguardia del siglo XXI, con el fin de gestionar el flujo vehicular en tiempo real. Entre las herramientas más extendidas se encuentran los semáforos inteligentes, situados en puntos estratégicos, entronques, cruces peatonales e intersecciones urbanas donde actúan como nodos de control de tránsito.

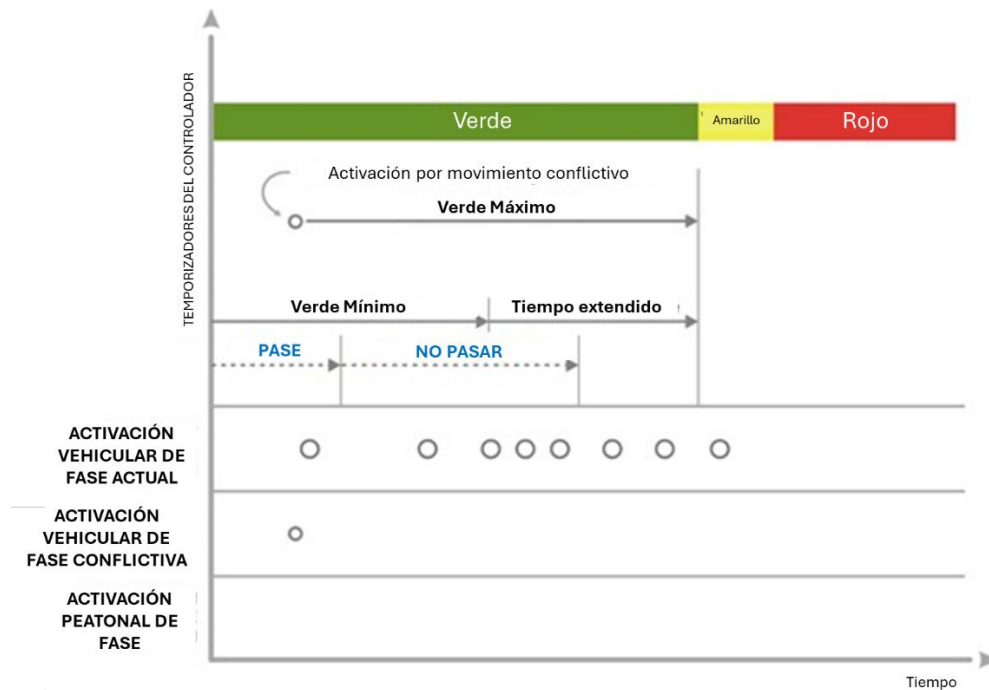
A diferencia de los semáforos convencionales, cuyo ciclo de luces se rige por programas fijos, los sistemas inteligentes ajustan automáticamente la longitud del ciclo y la repartición de tiempos verdes según las condiciones instantáneas del tráfico. Esta capacidad de adaptación resulta crucial, dado que el flujo vehicular varía a lo largo del día entre horas pico y horas valle. Sin una coordinación que responda a estas variaciones, los ciclos predeterminados pueden provocar congestión y pérdidas de eficiencia de la red. Los semáforos inteligentes, al integrar datos en tiempo real y algoritmos de optimización, reducen la acumulación de vehículos y mejoran tanto la capacidad operativa como la experiencia de los usuarios (Grava, 2004).

Semáforos Actuados

Los semáforos actuados fueron una de las primeras aplicaciones de los SIT y la primera iteración de los semáforos inteligentes. Su operación es por medio de sensores inductivos, radares o cámaras instaladas en la intersección, los cuales miden la demanda real de tráfico. Un controlador electrónico procesa continuamente estos datos y ajusta en tiempo real la duración de cada fase según el nivel de congestión a lo largo del día. Gracias a esta capacidad de adaptación se optimiza el flujo vehicular; en contraste, los semáforos de ciclo fijo mantienen tiempos predeterminados que no responden a las variaciones de volumen y, por tanto, reducen la eficiencia de la red.

El U.S. Department of transportation Federal Highway Administration (2021) detalla la lógica de estos dispositivos a través de diversos parámetros de programación. El primero es el verde mínimo, es decir, el intervalo más corto durante el cual la indicación verde debe permanecer activa para un movimiento específico. Este lapso garantiza que los conductores perciban a tiempo el inicio de la fase y que la cola de vehículos ubicada entre la línea de detección y el detector pueda ingresar completamente a la intersección como se muestra en la Figura 17:

Figura 17 Configuración que definen la duración de una fase del vehículo



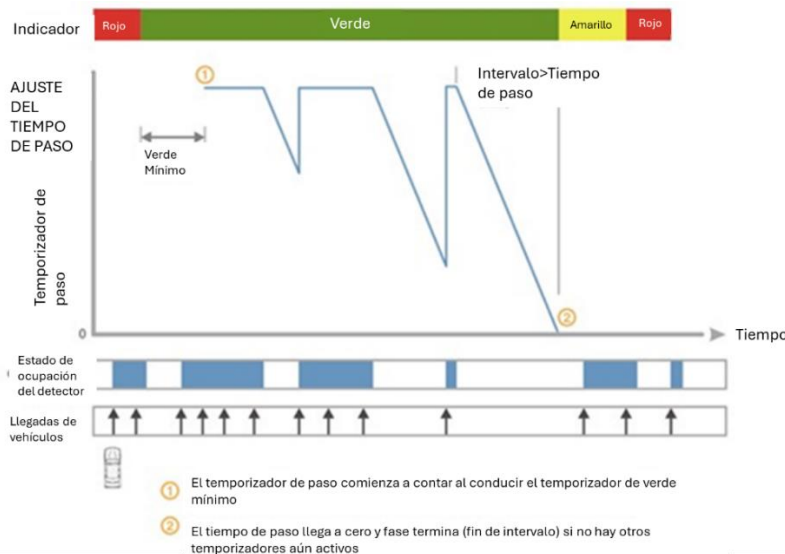
Fuente: U.S. Department of transportation Federal Highway Administration (2021)

El segundo parámetro es el tiempo entre vehículos o tiempo de paso, que define la separación máxima que puede registrarse entre dos llamadas de vehículos sin interrumpir la fase. Representa el intervalo máximo permitido entre las llegadas de los vehículos al detector para mantener la luz verde; no obstante, el verde posee un límite superior para evitar que la fase se prolongue indefinidamente cuando el tiempo de paso se cumple de forma continua. Este parámetro se emplea para identificar un hueco en el flujo vehicular que permita finalizar la fase antes de alcanzar un verde máximo durante la operación aislada.

Si el tiempo de paso es demasiado corto, la luz verde puede terminar prematuramente, antes de que el movimiento vehicular haya sido atendido adecuadamente. Por el contrario, si se establece demasiado largo, la fase se prolongará innecesariamente y provocará demoras en los movimientos competidores.

El tiempo de paso apropiado para una fase de señal específica depende de varios factores, entre ellos: el tipo y número de zonas de detección por carril; la ubicación y longitud de cada zona; la memoria de llamada del detector (bloqueo o no bloqueo); el modo de detección (pulso o presencia); la velocidad de aproximación; y el uso de detección carril por carril o de aproximación completa, tal como se muestra en la Figura 18.

Figura 18 Aplicación del tiempo de paso

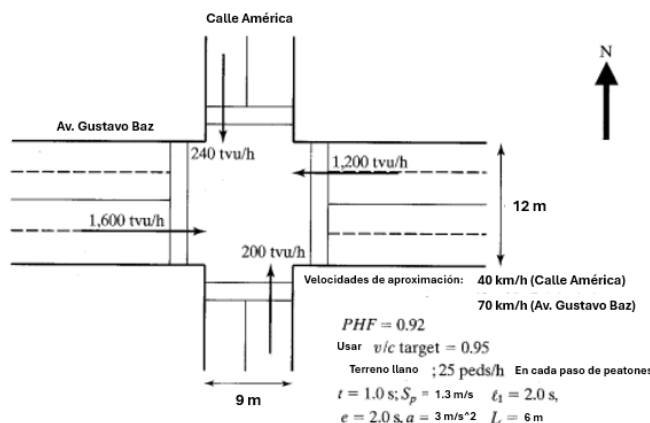


Fuente: U.S. Department of transportation Federal Highway Administration (2021)

Por último, el tiempo máximo de verde determina el intervalo más prolongado durante el cual la luz verde puede permanecer activa para un movimiento específico, particularmente cuando existe una demanda conflictiva. Este límite sirve para reducir la demora que sufrirían los demás movimientos de la intersección y para mantener la duración del ciclo dentro de los valores preestablecidos. Asimismo, protege contra extensiones excesivas de verde provocadas por una demanda continua o por detectores averiados.

Para cerrar con los semáforos actuados de manera clara, se hará un ejercicio práctico que permita al lector tener un ejemplo práctico de cómo funcionan las señales actuadas en las vías urbanas que cuentan con un semáforo. El ejercicio de semáforos actuados por parte del Traffic Engineering (Roess et al., 2019) determina los tiempos semafóricos de una avenida principal con una calle secundaria. En la Figura 19 se muestra una intersección que será semaforizada con un semáforo actuado. Por convivencia, los volúmenes de demanda mostrados ya se han convertido a unidades de vehículos equivalentes (tvus).

Figura 19. Intersección semafórica



Fuente: Traffic Engineering (Roess et al., 2019)

El semáforo cuenta con dos fases; La Fase 1 donde todos los movimientos calle America (calle secundaria) y Fase 2 de todos los movimientos de Av. Gustavo Baz (calle principal). Para esta intersección, solo la calle secundaria es actuada y solo los accesos de la calle secundaria tienen detectores. En tales casos, el objetivo será proporcionar solo la cantidad de tiempo verde necesario para despejar los vehículos de la calle secundaria, con la menor cantidad posible de tiempo en verde.

Por lo tanto, el tiempo de verde mínimo para la calle America debe ser lo más bajo posible. Usando un tiempo de arranque de 2.0 s, el tiempo de verde mínimo podría asignarse sería de 4.0 s ya que sería lo mínimo indispensable para que el conductor reaccione y el auto acelere y cruce la línea. Si el G_{min} se establece en 4.0 s, entonces la ubicación del detector se determina resolviendo la siguiente ecuación:

$$G_{min} = l_1 + 2 * Int \left(\frac{d}{6} \right)$$

Dónde:

G min: Tiempo mínimo de luz verde (s)

l1: Tiempo perdido de arranque (s)

d: distancia entre lector y la línea de Alto (m)

20: espaciamiento supuesto entre vehículos en la cola (m)

Por lo tanto, la operación sería:

$$G_{min} = 4 = 2 + 2 * Int \left(\frac{d}{6} \right)$$

$$Int \left(\frac{d}{6} \right) = \frac{4 - 2}{2} = 1$$

$$d = 0.1 - 6 \text{ m}$$

El detector se colocaría en cualquier lugar entre 0.1 y 6 metros de la línea de alto. Debe colocarse de tal manera que ningún vehículo pueda entrar al acceso sin pisar por el detector. Ahora para los accesos a la calle secundaria, con una velocidad de aproximación de 40 km/h, la extensión unitaria recomendada, U, es de 3.0 s. Esta debe ser mayor que el tiempo de paso desde el detector hasta la línea de alto, asumiendo el retroceso máximo de 6 m, o como se muestra en la siguiente ecuación:

$$U \geq P = \left(\frac{d}{1.47 S_{15}} \right)$$

Dónde:

U: Extensión de la unidad (s)

P: Tiempo de paso (s)

d: Distancia del detector a la línea de alto (m)

S15: Velocidad de aproximación del percentil (km/h)

Por lo tanto, la operación sería:

$$U \geq P = \left(\frac{6}{1.47 * 40} \right) = 0.10 \text{ s}$$

La extensión unitaria de 3 segundos es segura y será implementada. El siguiente paso es concentrar todos los vehículos equivalentes por cada movimiento de análisis. El movimiento en dirección sur (SB) cuenta con mayor volumen que en dirección norte. (NB), en ambos casos es un carril por sentido. Así, el volumen de carril crítico para la Fase 1 es de 240 tvu/h. El volumen este (EB) de 1,600 tvu/h es crítico para la Fase 2, pero está dividido en dos carriles por sentido. Por lo tanto, el volumen de carril crítico para la Fase 2 es de $1600/2 = 800$ tvu/h. La suma de volúmenes críticos es $V_c = 240 + 800 = 1,040$ tvu/h.

Ahora, se determinará otros parámetros de los tiempos de semáforo, se debe seleccionar una longitud de ciclo inicial. Esto requiere de establecer los intervalos de amarillo y todo en rojo. La velocidad del percentil 85 se estima como 8 km/h más que el promedio, mientras que el percentil 15 se estima con 8 km/h menos que el promedio. El cálculo de amarillo y rojo se estima con las siguientes ecuaciones:

$$y(\text{amarillo}) = t + \frac{S_{85/3.6}}{2a + 19.62 * 0.01G}$$

$$ar(\text{todo rojo}) = \frac{w + L}{S_{15/3.6}} \text{ o } \frac{P + L}{S_{15/3.6}}$$

Dónde:

y: intervalo en amarillo (s)

ar: todo intervalo en rojo (s)

s85: velocidad del percentil 85 (km/h)

s15: velocidad del percentil 15 (km/h)

a: tasa de aceleración (3.048m/s²)

G: pendiente (%)

W: ancho de la calle que cruza (m)

P: Distancia desde el bordillo más cercano hasta el lado más alejado del paso de peatones más alejado, (m)

Resolviendo a continuación

$$y_1 = 1 + \frac{(40 + 8)/3.6}{2 * 3.048 + 19.62 * 0.01 * 0} = 3.18 \text{ s}$$

$$y_2 = 1 + \frac{(70 + 8)/3.6}{2 * 3.048 + 19.62 * 0.01 * 0} = 4.55 \text{ s}$$

$$ar_1 = \frac{12 + 6}{(40 - 8)/3.6} = 2 \text{ s}$$

$$ar_2 = \frac{9 + 6}{(70 - 8)/3.6} = 0.9 \text{ s}$$

Con los valores por defecto de 2 s usados tanto en l_1 como para e , el tiempo perdido del ciclo es:

$$L = 3.18 + 4.55 + 2 + 0.9 = 10.63 \text{ s/ciclo}$$

El siguiente paso son las fases en verde, para esta intercepción el ciclo está compuesto por el verde máximo de la calle secundaria (Fase 1), el verde mínimo de la calle principal (Fase 2), y los intervalos de amarillo y todo rojo de cada una. La longitud del ciclo inicial se estima usando la siguiente ecuación 20-7:

$$C_i = \frac{L}{1 - \left(\frac{V_c}{1,615 * PHF * \left(\frac{v}{c}\right)} \right)}$$

Dónde:

C_i : duración del ciclo inicial (s)

V_c : los volúmenes críticos de carril veh/h

PHF: Factor de hora punta

v/c : relación v/c deseada que se debe alcanzar

Por lo tanto, el caculo es:

$$C_i = \frac{10.63}{1 - \left(\frac{1,040}{1,615 * 0.92 * (0.95)} \right)} = 40.3 \text{ s}$$

Las divisiones de verde basadas en esta longitud de ciclo se determinan con la siguiente ecuación:

$$g_i = (C - L) * \left(\frac{V_{ci}}{V_c} \right)$$

Dónde:

g_i : tiempo de verde efectivo para la fase i (s)

V_{ci} : volumen crítico de carril para la fase i (veh/h)

Por lo tanto, el cálculo será:

$$g_1 = G_1 = (40.3 - 10.63) * \left(\frac{240}{1040} \right) = 6.84 \text{ s}$$

$$g_2 = G_2 = (40.3 - 10.63) * \left(\frac{800}{1040} \right) = 22.82 \text{ s}$$

En la practica estándar establece el verde máximo para la calle menor y el verde mínimo para la calle mayor como 1.50 veces los valores anteriores:

$$G_{max1} = 1.5 * 6.84 = 10.26 \text{ s}$$

$$G_{min2} = 1.5 * 22.82 = 34.23 \text{ s}$$

Por último, la longitud del ciclo crítico es la suma de $G_{max1} + G_{min2} + Y_1 + Y_2 + ar_1 + ar_2$:

$$C_c = 10.26 + 34.25 + 3.18 + 4.55 + 2 + 0.9 = 55.14 \text{ s}$$

El cruce se encuentra en una vía urbana, por lo que se debe contar con los tiempos de cruce de los peatones. Los peatones que cruzan la calle menor durante la fase 2 se comparará con el verde mínimo más el amarillo y todo rojo de la fase 2.

$$N_{peat} = \frac{25}{\left(\frac{3600}{55.14}\right)} = 0.38 \text{ peatones/ciclo}$$

$$G_p = 3.2 + \left(\frac{L}{Sp}\right) + 0.27N_{peat}$$

Donde:

G_p : Tiempo mínimo de luz verde en peatones (s)

L : Longitud del paso de peatones, (m)

Sp : Velocidad de marcha de los peatones, valor de 1.22 m/s

N_{peat} : Número promedio de peatones que cruzan la calle en un paso de peatones por ciclo.

$$G_{p2} = 3.2 + \left(\frac{9}{1.22}\right) + 0.27 * (0.38) = 10.67 \text{ s}$$

$$G_{p2} = 10.67 \leq G_{min2} + Y_2 = 34.23 + 4.55 + 0.9 = 39.68 \text{ s}$$

Con este resultado, se observa que cruzar la calle secundaria es fácil por que es angosta y la fase 2 (verde para la vía principal) dura más y los peatones solo necesitan 10.67 s. Ahora se calculará los peatones que crucen la calle principal.

$$G_{p1} = 3.2 + \left(\frac{12}{1.22}\right) + 0.27 * (0.38) = 13.13 \text{ s}$$

$$G_{p2} = 13.13 \leq G_{min1} + Y_1 = 4 + 3.18 + 2 = 9.18 \text{ s}$$

Los peatones no están acomodados de forma segura debido al G_{min1} . Así que se debe proveer un botón peatonal, y las señales peatonales son obligatorias, cuando se presiona la siguiente fase verde proveerá un tiempo de verde mínimo de:

$$G_{min1,peat} = 13.13 - 3.18 - 2 = 7.95 \text{ s}$$

Los intervalos peatonales de caminar y despeje serían:

$$Caminar_1 = 3.2 + 0.27 * (0.38) = 3.3 \text{ s}$$

$$Mano_{parpadenante} = \frac{12}{1.22} = 9.83 \text{ s}$$

El resultado final muestra que en el cruce de la calle principal se cuenta con un botón, lo que obliga al semáforo a sobrescribir el verde mínimo y obliga al controlador dar 13.13 s para que las personas pasen de forma segura.

En conclusión, el ejercicio permitió determinar un ciclo crítico de 55.14 s diseñado para mantener el flujo constante en una avenida principal, garantizando los patrones de viaje de cada uno de los usuarios. La avenida principal concentrará el mayor tiempo de verde, mientras que la avenida secundaria contará con un verde de menor tiempo. Lo importante del ejercicio es abarcar todo el sistema con los peatones lo que resulto a contar con un botón peatonal que obligue al semáforo extender el tiempo verde para que la gente puede cruzar la vía ancha.

Coordinación de señales

Los sistemas de coordinación semafórica requieren determinados parámetros para cumplir su función principal: generar una ola verde a lo largo de una vialidad compuesta por manzanas pequeñas y calles rectas. Según Hoel et al. (2011), cuando varias señales de tráfico se encuentran próximas entre sí a lo largo de un corredor principal, es posible sincronizarlas para establecer una progresión continua de luces verdes a lo largo del recorrido.

Un requisito clave para dicha coordinación es que los semáforos estén lo suficientemente cercanos unos de otros, de manera que los vehículos arriben a las intersecciones en grupos compactos. Si las intersecciones se hallan demasiado separadas, la estructura del flujo tiende a desintegrarse debido a las variaciones de velocidad entre los conductores, lo que provoca que el grupo se disperse. En la Figura 20 se muestra un conjunto de semáforos con el sistema de ola verde.

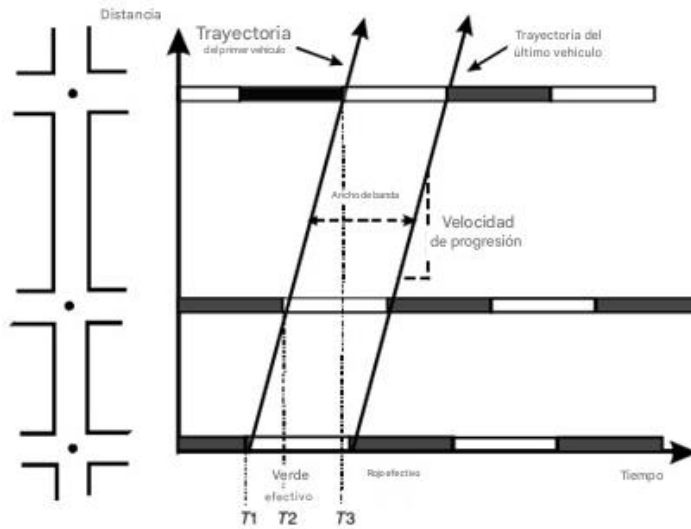
Figura 20 Ola verde



Fuente: Imaginelifestyles (2014)

Un requisito fundamental del SIT es la sincronización de los ciclos de verde, amarillo y rojo. Los semáforos de un mismo corredor deben compartir un ciclo base, aunque la duración del verde puede ajustarse a mayor distancia. La coordinación se diseña mediante el diagrama espacio-tiempo, herramienta clásica para elaborar planes de semaforización; hoy, sin embargo, suele sustituirse por software de simulación de tráfico que ofrece análisis más detallados. En el diagrama de la Figura 21, el eje izquierdo representa el corredor vial y el derecho muestra los ciclos para cada intersección y sentido de circulación; el verde efectivo (verde más amarillo) se dibuja con línea blanca mientras que el rojo efectivo se traza con una línea negra.

Figura 21 Diagrama Espacio - Tiempo



Fuente: Hoel et. Al. (2011)

Continuando con el diagrama, contamos con el desplazamiento como el resultado de la diferencia entre el momento en que un semáforo se pone en verde y el siguiente semáforo se pone en verde. Este término se entiende como $(T_2 - T_1)$ o $(T_3 - T_2)$, por lo tanto, el resultado de la adición es un número positivo o 0. Por último el segundo concepto es el ancho de banda, el cual es utilizada por el pelotón de vehículos que se mueven a través de una serie de intersecciones sin necesidad de detenerse en una intersección. Por último, para poder determinar los desplazamientos ideales a través de una vialidad que está conformada por un conjunto de intersecciones de similar longitud, con el fin de coordinar de que el pelotón llegue aguas arriba al próximo semáforo se requiere de la siguiente ecuación (Hoel et al. ,2011).

$$O_{ideal} = \frac{L}{S}$$

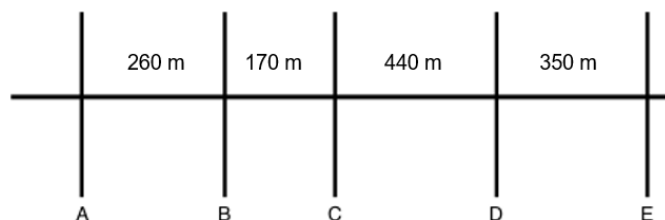
Dónde:

L: Distancia entre semáforos

S: Velocidad promedio del vehículo

Supongamos en un caso hipotético que se requiere de coordinar los semáforos a lo largo de corredor que se muestra en la Figura 22 con solo una dirección de flujo. Para que el sistema funcione, se manejaran ciclos de 80s y el verde efectivo para la dirección a coordinar todas las señales es de 60% de la longitud del ciclo. Además de que la velocidad media es de 50 km/h al ser una vialidad primaria. En esquema que se muestra en la Figura 22 se muestra los desplazamientos ideales para las señales.

Figura 22 Corredor de semáforos



El resultado de la división de la distancia entre semáforos y la velocidad promedio se muestra en la Tabla 4 en segundos, una vez realizada la conversión de unidades.

Tabla 4 Desplazamiento ideal entre semáforos

Semáforo	Relativo al Semáforo:	Desplazamiento Ideal (Seg)
B	A	18.72
C	B	12.24
D	C	31.68
E	D	25.20

Posteriormente, se requiere calcular la eficiencia del ancho de banda el cual es un indicador que se define como la relación entre la banda de sincronía y la longitud del ciclo como se expresa en la siguiente ecuación matemática Hoel et al. (2011):

$$Eficiencia\ del\ ancho\ de\ banda = \left(\frac{BW}{C}\right) * 100$$

Dónde:

BW: Segundos que dura la banda de sincronía

C: Duración del ciclo en segundos (verde, amarillo y rojo), donde en general una eficiencia de aproximadamente 50% es un indicador de buena coordinación.

Por lo tanto, la capacidad de ancho de banda indica el número de vehículos/h que pueden pasar por el sistema coordinado sin detenerse en la llamada “Ola verde” y la expresión matemática esta dada por:

$$Capacidad\ de\ ancho\ de\ banda \left(\frac{veh}{h}\right) = \frac{3600 * BW * N}{C * h}$$

Dónde:

BW: Segundos que dura la banda de sincronía

N: Número de carriles por dirección

C: Duración del ciclo semafórico en segundos

h: espacio entre coches en segundos (usualmente es 2seg entre vehículos)

En una vialidad, se cuenta con tres semáforos a lo largo de un eje con dos carriles en cada dirección. Las señales se coordinan principalmente para la dirección norte. La longitud del ciclo, la duración del semáforo en verde para la fase N-S y el desplazamiento para cada uno de los semáforos se muestra en la Tabla 5:

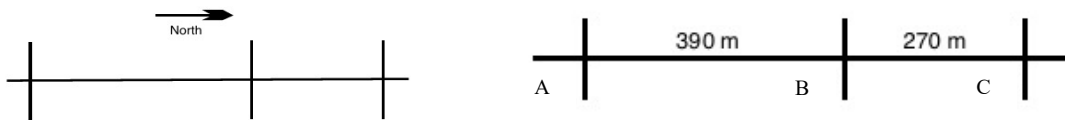
Tabla 5 Datos de información de las tres señales

Semáforo	Duración del Ciclo (s)	Verde para la Fase N-S (s)	Desplazamiento relativo a la señal ascendente(s)
A	80	35	0
B	80	45	20

Semáforo	Duración del Ciclo (s)	Verde para la Fase N-S (s)	Desplazamiento relativo a la señal ascendente(s)
C	80	40	15

De acuerdo con estudios de vehículo flotante a lo largo del corredor, se contó con una velocidad promedio de 66 km/h y se requiere obtener la eficiencia del ancho de banda para la dirección norte como se muestra en la Figura 23.

Figura 23 Corredor de estudio



En la dirección norte, la anchura de banda es de 35 segundos, teniendo en cuenta esto, la eficiencia del ancho de banda se puede calcular fácilmente con la ecuación vista anteriormente:

$$\text{Eficiencia del ancho de banda} = \left(\frac{35}{80}\right) * 100 = 43.75\%$$

Una vez obtenida la eficiencia del ancho de banda, procedemos a obtener el cálculo de la capacidad de ancho de la banda:

$$\text{Capacidad de ancho de banda} \left(\frac{veh}{h}\right) = \frac{3600 * 35 * 2}{80 * 2} = 1575 \text{ veh/h}$$

Software de Control de Tráfico

En la actualidad, los sistemas computacionales han proporcionado el desarrollo de programas capaces de optimizar una amplia variedad de tareas. Dentro de la ingeniería civil, existen numerosas herramientas que permiten encontrar soluciones apropiadas a los problemas que se deben resolver. En particular, los ingenieros responsables del diseño de soluciones viales emplean diversos programas de cómputo de control de tráfico, entre los cuales destaca Synchro. Este programa se encarga de la programación y temporización de señales, y brinda a ingenieros y planificadores la posibilidad de diseñar, modelar, optimizar, simular y visualizar de forma integrada intersecciones semaforizadas, no semaforizadas y glorietas, con el fin de simplificar la gestión de tráfico y maximizar la eficiencia (Cubic, 2025).

Además de Synchro, existen otras aplicaciones especializadas como TRANSYT-7F, diseñada para simular y optimizar el flujo vehicular en intersecciones señalizadas. Entre sus ventajas se encuentra la integración del Highway Capacity Software, basado en el Highway Capacity Manual, lo que permite al modelador analizar distintos escenarios de saturación vial y proponer proyectos o soluciones adecuadas (McTrans Center, 2024).

La mayoría de estos programas requiere la adquisición de licencias para acceder a todas sus funciones; no obstante, existe el software de código abierto SUMO, que posibilita la simulación de tráfico multimodal, la generación de redes viales y la modelación detallada de vehículos. SUMO incorpora, además herramientas de apoyo para la gestión del tráfico, la simulación de intersecciones, la asignación de líneas y la generación de demanda, entre otras funcionalidades (Eclipse foundation, s.f.).

Sistemas Adaptativos de control de tráfico

Los Sistemas Adaptativos representan una de las tecnologías más recientes, hasta el 2025, en control de tráfico. Tienen la capacidad de medir en tiempo real las condiciones de circulación y generar nuevos tiempos de semáforo sobre la marcha. Estos sistemas se fundamentan en ajustes incrementales de la temporización, según el flujo vehicular registrado por detectores especializados; algunos, incluso, emplean esos datos para predecir el tráfico con segundos o minutos de anticipación. Aunque su implementación exige una calibración minuciosa, a diferencia de los planes fijos de control semafóricos, los sistemas adaptativos pueden seguir las tendencias a largo plazo y evitar el recalcu periódico de las fases semafóricas.

No obstante, existen consideraciones importantes. Los especialistas aún no concuerdan plenamente sobre los objetivos ni sobre el método óptimo para calcular planes fijos de control semafórico mediante técnicas off-line. Esta subcategoría de métodos requiere volúmenes sustanciales de datos, recursos y capacidad de cómputo, en contraste con los algoritmos que operan en tiempo real en los sistemas adaptativos de control de tráfico (Bronzini, 2004).

Uno de los principales ejemplos de Sistemas Adaptativos de Control de Tráfico es SCOOT (Split, Cycle, Offset Optimization Technique), un software que aplica control de señales en tiempo real. Su objetivo es minimizar la longitud promedio de las colas y el número de paradas a lo largo de los accesos de la red. Para ello, ajusta en tiempo real los ciclos semafóricos con base en la información obtenida de los detectores de tráfico instalados a mitad de cuadra en puntos estratégicos (SCOOT, 2025).

Otro sistema destacado es SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System), una plataforma inteligente que supervisa controla y optimiza el movimiento de personas y mercancías en las ciudades. A diferencia de SCOOT, SCATS coloca los detectores en las intersecciones y no a mitad de la cuadra lo que representa una ventaja en urbes que ya cuentan con sensores en esos puntos.

La principal fortaleza de SCATS radica en su capacidad para optimizar la longitud de los ciclos semafóricos y los desplazamientos ideales a lo largo de corredores con múltiples semáforos, evitando congestión en los movimientos vehiculares. Además, SCATS divide la red en subsistemas de hasta diez intersecciones; cada uno opera de forma independiente, salvo que las condiciones del tráfico requieran la fusión de dos o más subsistemas.

3.3. SISTEMAS AVANZADOS DE TRANSPORTE PÚBLICO

Los SIT han permitido a los automovilistas encontrar rutas más cortas, reducir los tiempos de recorrido y acceder a información para el viajero; por ello, la mayoría de estas soluciones se orienta a la red vial y a los vehículos particulares. No obstante, en gran parte del mundo el transporte público es el modo principal de desplazamiento para un amplio sector de la población, donde los tiempos de traslado suelen ser elevados porque los distintos sistemas no están plenamente integrados y los transbordos incrementan la duración de viaje.

Ante este panorama, resulta fundamental modernizar la infraestructura del transporte público, mejorar el confort del usuario y ofrecer una alternativa competitiva al automóvil particular que contribuya a descongestionar las vías de las grandes urbes. La incorporación de tecnologías avanzadas para el transporte público eliminará la brecha de prioridad entre usuarios del transporte público y del transporte privado. Según el IMT (1999), los Sistemas Avanzados de Transporte Público (SATP) tiene como objetivos principales incrementar la eficiencia, la productividad y la seguridad del sistema de transporte público.

3.3.1. Sistemas de Ubicación Automática de Vehículos

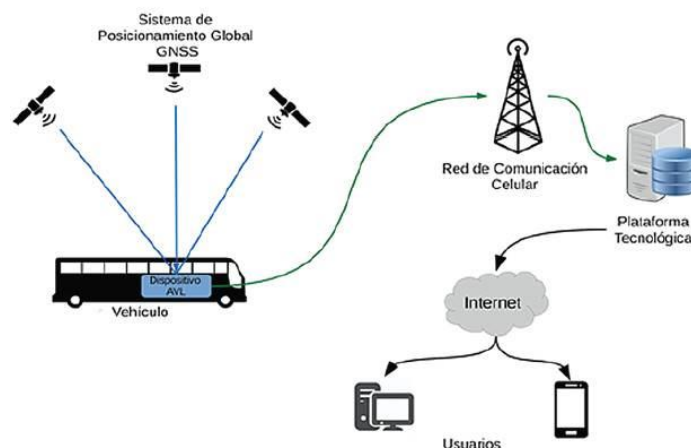
La Ubicación Automática de Vehículos (UAV) permite rastrear en tiempo real todos los vehículos de una flota ya sean urbanos, de paquetería o de transporte masivo como los sistemas Bus Rapid Transit (BRT) así como los trenes metropolitanos. Generalmente se emplea el GPS, aunque también pueden utilizarse sensores instalados en la infraestructura vial. Estos detectan un transpondedor con identificador único ubicado en cada unidad, registran su posición y transmiten la información a un centro de control. De este modo, es posible identificar y ubicar los autobuses de transporte público, optimizar la asignación de rutas y mejoras de programación de los tiempos de recorrido. Para el usuario que desea desplazarse del punto A al punto B, resulta decisivo elegir la opción con menor tiempo de espera o mayor disponibilidad de flota (Sussman, 2000).

El seguimiento de la ubicación de vehículos de transporte público también ofrece ventajas en materia de seguridad. Al contar con monitoreo en tiempo real (ver Figura 24), un botón de pánico puede enviar una alerta inmediata al centro de control y permitir el rastreo de la unidad en caso de incidentes. Asimismo, los usuarios pueden verificar la posición del vehículo, lo que genera mayor confianza del servicio. No obstante, la implementación de estos sistemas suscita polémica en torno a la privacidad, pues los sistemas UAV podrían emplearse con fines de vigilancia no autorizada; ello ha provocado la oposición de ciertos grupos.

Entre los principales objetivos de los sistemas UAV para transporte público destaca la reducción del fenómeno conocido como “bus bunching”, es decir, la pérdida de intervalos regulares entre unidades que provoca agrupamientos incrementa los tiempos de traslado y disminuye la eficiencia del servicio.

Según Sussman (2000), el UAV también permite responder con rapidez a interrupciones del servicio y redistribuir las unidades hacia los puntos más críticos de la red. Además, proporciona datos valiosos a los sistemas de control de tráfico, fomentando la colaboración entre distintos SIT y mejorando la movilidad urbana. Por último, al incrementar la seguridad de conductores y pasajeros mediante un centro de monitoreo, se genera mayor confianza en el transporte público y se potencia la demanda, alentando a los usuarios de automóvil a optar por este medio.

Figura 24 Sistema de funcionamiento de los AVL



Fuente: Universidad del Norte (2018)

3.3.2. Software de operaciones

Un recurso adicional para optimizar en el transporte público es el empleo de software de gestión operativa, que permite el despacho asistido por ordenador mediante un centro de servidores. Además de coordinar la flota, estas herramientas facilitan el control de servicios mecánicos preventivos; al monitorear continuamente las unidades, el sistema puede generar nuevos itinerarios sin afectar los tiempos de traslado. También, integra funciones de supervisión y mapeo en tiempo real y gestiona los itinerarios de frecuencia y horarios, información que se comunica tanto a los usuarios como a los conductores (Digital 55, 2024).

3.3.3. Información de tráfico

La información de tráfico puede obtenerse a través de diversas aplicaciones o software diseñado para programar un viaje, estimar tiempos y rutas, y brindar al usuario alternativas rápidas o rutas complementarias. Esto se refleja en los siguientes puntos (Johnson Víctor y Ponnuswamy, 2012):

- A. Sistemas previos de viaje:
Estos sistemas permiten planificar una ruta y estimar el tiempo de llegada. Algunas aplicaciones de viajes sobre demanda permiten al usuario programar un viaje y conocer el tiempo estimado de arribo. Otras herramientas son los servicios de mapa en aplicaciones (por ejemplo, Google Maps, Moovit, Transit, entre otros), que permite seleccionar rutas en transporte público y muestran diversas opciones para el destino seleccionado. Sin embargo, no es 100% certero, ya que muchas rutas son agregadas por usuarios y los tiempos de espera pueden ser solo estimaciones, pero no cuentan con datos reales. Asimismo, los sistemas de transporte público suelen ofrecer en sus sitios web los intervalos de paso por estación de BRT, metro, autobuses de ruta entre otros transportes, lo que facilita la planificación de viaje.
- B. Sistemas de Terminal o paradas:
Todo sistema de movilidad debe contar con centros de transferencia modal estilo “HUB” que conectan con diferentes sistemas de transporte, ya sea ferroviario, terrestre y en algunos casos aéreo. Para ello se requiere contar con pantallas de información y kioscos que proporcionen datos relevantes a los usuarios. Sin embargo, este tipo de información aún es limitada, debido a la falta de interoperabilidad entre sistemas de transporte. Por ello, es fundamental contar con una planeación adecuada que garantice una comunicación efectiva con el usuario
- C. Sistemas de información dentro del vehículo:
Tanto en transporte terrestre como ferroviario, existen sistemas que proporcionan información en tiempo real a los usuarios durante su trayecto. Por ejemplo, mediante pantallas con o sin audio, se puede informar sobre el estado de servicio. En los sistemas BRT, las pantallas en los autobuses notifican las próximas estaciones, así como manifestaciones o cortes en el servicio como se muestra en la Figura 25.

Figura 25 Sistema de información al vehículo



3.3.4. Sistemas de pago electrónico

En el pasado, los sistemas de pago eran independientes entre sí, entre cada modo de transporte, donde podría ser mediante boletos o únicamente el pago directo al operador. Sin embargo, con el avance de los SIT, se han desarrollado mecanismos que optimizan la intermodalidad y facilitan la conexión entre sistemas de transporte. Estos sistemas requieren de dos componentes: una tarjeta, la cual pueda recargarse mediante máquinas fijas o aplicaciones digitales; y un lector de tarjetas. La principal ventaja del sistema de pago electrónico es el control en la recaudación y gestión de pagos. Además de brindar comodidad al usuario, posibilitan un control tarifario y por distancia, al identificar el origen y destino de cada viaje. Con estas bases de datos se pueden generar estudios de demanda por medio de matrices Origen – Destino.

Este funcionamiento es posible gracias a la tecnología de radiofrecuencia o de tecnología de comunicación de corto alcance (NFC). De acuerdo con Dipolerfid (2025) el NFC opera mediante un principio físico conocido como inducción electromagnética. Cuando dos equipos cuentan con la tecnología NFC ya sea el emisor o el receptor, se acercan a una distancia mínima, se genera un campo electromagnético de baja frecuencia. Es por ello por lo que se pueden acceder a diferentes sistemas de transporte sin la necesidad de contar con los tickets físicos.

3.4. SISTEMAS AVANZADOS DE INFORMACIÓN AL VIAJERO

Los Sistemas Avanzados de Información al Viajero (SAIV) son muy comunes hoy en día. Estos sistemas se pueden vincular con los diferentes SIT que se han abordado a lo largo de estos capítulos, esto es, los SAIV integran elementos de los SGVCI, SACT y SATP. Los SAIV tienen como principal función que los usuarios conozcan el estado actual de los sistemas de transporte, independientemente del modo en el que se desplacen. Para ello se requiere de un sistema de telecomunicación, como el internet, que permita enviar señales en tiempo real, ya sea el usuario de un vehículo, las personas que esperan el camión en una parada o para conocer si un sistema masivo como el metro presenta retraso en la red. Los SAIV generan una red de decisiones que facilita al usuario del modo de transporte más conveniente, generando así mayor eficiencia en los traslados dentro de las metrópolis o en viajes de largo recorrido.

Como lo mencionan Johnson & Ponnuswamy (2012), los SAIV obtienen la información sobre el estado del flujo de tráfico en los principales corredores de la ciudad, proporcionando datos de manera continua. Esta información puede obtenerse mediante internet, lo que permite que los usuarios conectados a la red puedan planificar su viaje o elegir alternativas que se adecuen mejor a sus necesidades.

De acuerdo con la perspectiva de Meyer (2016) los SAIV son fundamentales para informar al público viajero sobre las condiciones del sistema de transporte y las rutas recomendadas más recomendables desde el punto de vista de seguridad. Además, estos sistemas pueden utilizarse en rutas alternas habilitadas ante situaciones de emergencia, y también tienen la función de brindar mensajes de advertencia a lo largo del trayecto en caso de cambios en el flujo vehicular o en las condiciones climáticas.

Una vez expuestas las perspectivas de Johnson & Ponnuswamy (2012) y Meyer (2016), se puede considerar que los SAIV, buscan proporcionar la mayor cantidad de información posible al viajero en tiempo real, siempre y cuando tenga una conexión a internet. Dicha información tiene como objetivo ahorrar tiempo, ofrecer múltiples opciones de ruta para que el usuario seleccione la más óptima, emitir señales de advertencia durante el trayecto, incrementar la seguridad en los desplazamientos y generar una mayor eficiencia en términos de movilidad.

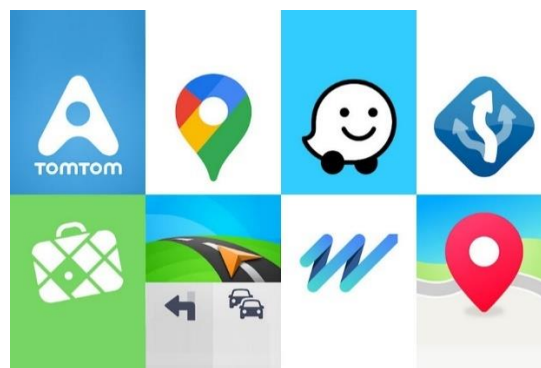
Algunas aplicaciones móviles pueden tener funciones emergentes de un SAIV. Un ejemplo es la plataforma “X”, que permite a los sistemas de transporte público y a las operadoras de autopistas informar en tiempo real sobre el estado de la red. Así, si una línea de metro se encuentra saturada o si una autopista de cuota presenta un desplazamiento de talud que obliga a tomar una vía alterna, el usuario puede anticipar su viaje y evitar una mayor congestión al saber que en cierto punto de su ruta se formará un cuello de botella. No solo “X”, cumple esta función informativa; en otras redes sociales también se crean grupos de chat donde se reporta la situación en tiempo real del transporte público, de carreteras e incluso cruces fronterizos (El Sol de México, 2024).

De todos los SIT, los SAIV son los que más se han desarrollado en la última década. Esto se debe al aumento en el uso de teléfonos inteligentes, que entre 2010 y 2020 pasaron de tecnología 3G a 5G. Además, los vehículos motorizados empezaron a incorporar sistemas móviles, ya sea sistema “Android” o sistema “iOS”, lo que ha permitido perfeccionar continuamente estas aplicaciones. Algunas apps dedicadas específicamente a la movilidad son:

- Google Maps
- Moovit
- Waze
- Citymapper
- Apple Maps
- 511.org
- Baidu Maps

En el mundo occidental, las aplicaciones más utilizadas son Google Maps y Waze. Sin embargo, en el mercado chino predominan otras aplicaciones debido a restricciones de red, y la plataforma más empleada es Baidu Maps. Los objetivos principales de estos sistemas son minimizar los tiempos de traslados o transferencia, y ofrecer la ruta más rápida y directa hacia un destino. También, estas aplicaciones buscan reducir los tiempos de espera en las paradas, optimizar el costo de viaje (el usuario puede elegir entre una ruta más rápida pero más costosa o una más económica, pero con mayor tiempo de traslado) y, por último, señalar fisuras o baches sobre la vía que puedan dañar los vehículos, lo que genera mayor confianza en la conducción. Las apps mostradas en la Figura 26 son algunas de las más utilizadas por los usuarios.

Figura 26 Sistema Avanzados de Información al Viajero



Fuente: Xatakandroid (2024)

3.5. EL FUTURO DE LOS SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE

La inteligencia artificial (IA) opera mediante algoritmos y modelos matemáticos capaces de procesar datos, aprender de ellos y tomar decisiones o ejecutar tareas. Esta capacidad se ha

aprovechado para mejorar la tecnología existente; desde los teléfonos móviles y las aplicaciones, hasta los sistemas de transporte, como se analizará a continuación.

Uno de los avances más significativos en la industria automotriz es el desarrollo de vehículos inteligentes, cuyo objetivo es lograr una conducción autónoma sin que el usuario requiera de entrar en contacto constante con el volante o los pedales. Diversas marcas automotrices trabajan en esta tecnología, sin embargo, la empresa que encabeza el sector es Tesla. De acuerdo con la página oficial (Tesla, 2025), el piloto automático integra funciones avanzadas de asistencia al conductor. El piloto automático funciona a través de un conjunto de cámaras que monitorean el entorno y detectan a otros vehículos, peatones, marcas viales y obstáculos como barreras y bordillos. Entre sus funciones esenciales se encuentran: ajustar la velocidad del auto de acuerdo con el tráfico y las señales de tránsito, mantener la trayectoria dentro del carril a partir de las líneas de la calzada (National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, 2022).

La implementación de una flota interconectada de vehículos autónomos permitiría que todo un sistema pueda funcionar sin la intervención humana, con beneficios potenciales en temas de seguridad y reducción de tráfico. Retomando el ejemplo de los autos Tesla, en situaciones de neblina, o baja visibilidad los sensores ofrecen al automóvil una percepción de la vía y reducen la probabilidad de accidentes ya que gran parte de los accidentes se deben a errores humanos. Algunos de los puntos que serán clave en el futuro de los SIT, de acuerdo con Dimitrakopoulos (2020), son los siguientes:

Aplicaciones de redes de transporte

Con la llegada de los autos conectados y autónomos, y próximamente los vehículos sin volante ni pedales, el ecosistema de transporte experimentará una transformación profunda. Esta evolución introduce soluciones innovadoras, pero también plantea retos técnicos, normativos y éticos. Se prevé un incremento sostenido en la demanda de vehículos autónomos, acompañado del despliegue de los primeros sistemas de transporte público completamente automatizados y de terminales de transferencia modal que operen de forma independientes. Posteriormente, se avanzará en el desarrollo de vehículos controlados a distancia como aviones o barcos (actualmente se cuentan con los drones que asemejan ese futuro). Se espera que las ciudades del futuro, con las redes de transporte de la nueva década cuenten con los siguientes parámetros:

- Coches automatizados que conectan los aeropuertos con las estaciones de aparcamiento cercanas
- Centros de tránsito inteligentes que servirán como centros para automóviles autónomos y conectados, taxis y transporte urbano.
- Servicios de movilidad de uso compartido, como el sistema de bicicletas compartidas.
- Corredores inteligentes que proporcionarán la conexión de última milla entre los servicios de tránsito y los centros de empleo
- Transporte bajo demanda para ciudadanos y visitantes, con opción de pago integradas información en tiempo real.

Entre los sistemas de transporte con visión de futuro destacan el Hyperloop, un tren de alta velocidad capaz de alcanzar una velocidad de 1,126 km/h, y los primeros helicópteros inteligentes que desarrolla Airbus. Para disponer de redes eficientes se requiere un avance sociotécnico que posibilite una implementación exitosa y una amplia aceptación por parte de los usuarios.

Niveles y facilitadores de conducción autónoma

Como se mencionó anteriormente, la tecnología ha avanzado hacia la autonomía mediante el uso de sensores, cámaras e información en tiempo real a través de internet. Para alcanzar niveles superiores de automatización, la mayoría de las empresas automotrices del mundo deben empezar a incorporar sistemas complementarios a los descritos en estos apuntes, como los sistemas avanzados

de asistencia al conductor, que facilitan la conducción, la hacen más segura y añaden equipamientos inexistentes en el pasado.

Estos sistemas se sustentan en cámaras y sensores que constituyen el pilar de la conducción autónoma. Sin embargo, todo debe integrarse en una arquitectura que evite fallos, pues la recopilación de datos exige un sistema de procesamiento capaz de actuar según lo requiera la situación. Actualmente, las compañías que ofrecen conducción autónoma son pocas, aunque se espera que su número crezca en el futuro.

La conducción autónoma requiere de varios componentes, entre ellos medidas de seguridad mediante radares y cámaras de proximidad para evitar colisiones, además de una infraestructura adecuada. Los vehículos autónomos dependen de la señalización vertical y horizontal y, si esta se encuentra en mal estado, puede afectar su desempeño. En consecuencia, las empresas automotrices y las entidades responsables de las vías deben garantizar la infraestructura necesaria para el funcionamiento correcto de estos vehículos (Dimitrakopoulos, 2020).

Sistemas de transporte y movilidad inteligente

Dimitrakopoulos (2020) dice que el transporte y la movilidad operan como un conjunto que evolucionan simultáneamente. Por ello, se ha impulsado la innovación coordinada para ofrecer soluciones en las grandes ciudades. Este enfoque apunta a incorporar tecnologías nuevas y ecológicas. La movilidad urbana inteligente fomenta tecnologías limpias al aprovechar los dispositivos móviles y controlar las emisiones vehiculares. Asimismo, las ciudades inteligentes buscan optimizar los tiempos de traslado, pues un trayecto más breve reduce la cantidad de emisiones liberadas a la atmósfera. Para lograr una movilidad inteligente se deben considerar los siguientes cuatro puntos:

1. Mejoramiento de la movilidad pública: que tiene como objetivo mejorar el transporte público de múltiples maneras, por ejemplo, mediante la modernización de los vehículos de transporte y poder reemplazar los camiones de combustión por vehículos eléctricos y de bajas emisiones, al igual que el mejoramiento de la calidad de los servicios públicos. Un ejemplo sería optimizando el sistema de cobro y los centros de transferencia modal, optimizando los espacios destinados para el transporte público y así contar con un sistema integrado.
2. Mejoramiento en la movilidad privada y comercial: a diferencia del transporte público, el usuario decide cuando cambiar su vehículo y para el transporte de carga, las empresas en cierto periodo de tiempo renuevan su flota vehicular. Lo que se puede hacer para aumentar la flota de vehículos autónomos es promover subsidios a los usuarios en adquirir vehículos especiales o con sistemas autónomos, con el fin de permitir un aumento en la flota de vehículos inteligentes.
3. Proyectos de infraestructura: se debe contar con zonas de tráfico controlado que faciliten la movilidad inteligente y ecológica, y el desarrollo de políticas que mejoren el sistema. Al contar con sistemas inteligentes se puede crear un sistema de vías óptimo con semaforización inteligente que permitirá un flujo continuo y seguro para peatones y automovilistas.
4. Sistemas avanzados de información al viajero: es el punto restante para contar con la visión de una movilidad inteligente ya que mejoran la eficiencia en los traslados de los usuarios como se ha mencionado en secciones anteriores. Posteriormente, se busca que estas herramientas puedan proporcionar asistencia en áreas como estacionamientos, mejora el sistema de control de tráfico, vigilancia y detección de áreas inseguras, así como avisos meteorológicos en la zona.

Vehículos conectados

Las Redes Vehiculares Ad-Hoc (VANET, por sus siglas en inglés: Vehicular Ad-Hoc Networks) operan mediante comunicación interna en el vehículo y la interacción entre múltiples entidades a

bordo. Estas redes permiten la transferencia de datos e información entre sistemas con el fin de tomar decisiones de manera colectiva sobre el comportamiento del vehículo, ya sea de forma anticipada (sistemas cognitivos) o como respuesta a condiciones externas (sistemas adaptativos). Este enfoque se conoce como inteligencia a bordo, y constituye la base de los nodos móviles inteligentes dentro del Internet de los Vehículos (IoV: Internet of Vehicles), el cual parte del supuesto de que todos los dispositivos electrónicos del vehículo pueden comunicarse entre sí (Dimitrakopoulos, 2020).

La comunicación vehículo a vehículo (V2V: Vehicle-to-Vehicle) implica la interacción entre sensores, actuadores y otros dispositivos electrónicos con las unidades de control y los módulos de apoyo a la toma de decisiones. El propósito de esta comunicación es proporcionar información significativa en tiempo real, como coordenadas de ubicación, dirección, velocidad o alertas ante situaciones de emergencia.

Por su parte, la comunicación vehículo a infraestructura (V2I: Vehicle-to-Infrastructure) se refiere al intercambio de información entre el vehículo en movimiento y la infraestructura vial circundante, como semáforos, señales de tránsito, centros de control en autopistas, antenas u otros dispositivos instalados sobre las vías. Esta interacción permite que el vehículo obtenga una descripción del entorno para adaptarse a las condiciones externas y a las solicitudes del sistema.

La comunicación vehículo a red eléctrica (V2G: Vehicle-to-Grid) se asocia principalmente con vehículos eléctricos e híbridos que pueden conectarse al sistema eléctrico. Cuando el vehículo se recarga, puede interactuar con los servicios que ofrece la red, integrándose a un sistema conectado y optimizado energéticamente. Esta interacción no solo permite la recarga de energía, sino también la posibilidad de devolver electricidad a la red cuando sea necesario, lo que convierte al vehículo en un recurso energético distribuido. De esta forma, el vehículo se integra a un sistema inteligente y conectado que favorece la eficiencia energética y la sostenibilidad, representando un elemento clave dentro de las futuras redes eléctricas inteligentes (smart grids).

Todos estos tipos de comunicación se utilizan actualmente para describir las interacciones entre las unidades de control, los sensores y los actuadores del vehículo con su entorno. En conjunto, se agrupan bajo el término general vehículo a todo (V2X: Vehicle-to-Everything) el cual constituye el marco integral de comunicación vehicular en los sistemas inteligentes de transporte (SIT). El enfoque V2X permite que los vehículos formen parte de una red distribuida de intercambio de información, donde cada unidad actúa como un nodo inteligente capaz de percibir, comunicar, procesar y reaccionar ante estímulos externos. Esto posibilita la coordinación entre vehículos, infraestructura, peatones y servicios, incrementando la seguridad vial, optimizando el flujo de tráfico y reduciendo tiempos de viaje.

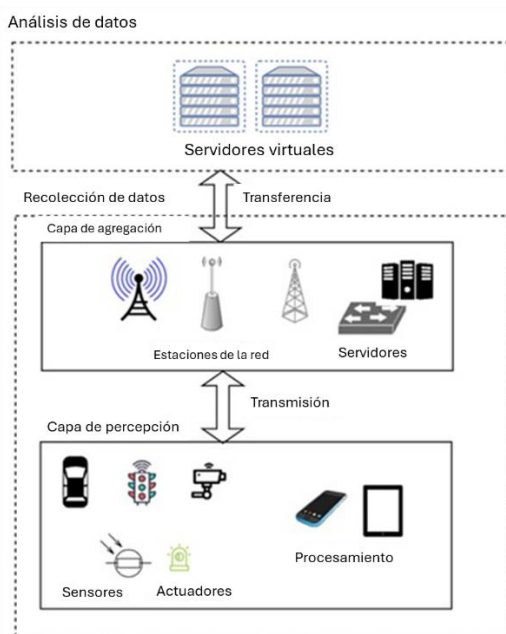
Además, el paradigma V2X se perfila como uno de los pilares tecnológicos para la transición hacia ciudades inteligentes (smart cities), ya que facilitará la integración con sistemas de gestión del tráfico, plataformas de movilidad como servicio (MaaS: Mobility as a Service), sistemas de emergencia, redes eléctricas inteligentes e incluso algoritmos de predicción basados en inteligencia artificial. De esta manera, V2X no solo representa una tecnología de comunicación, sino un ecosistema conectado, preparado para soportar niveles avanzados de automatización y toma de decisiones colaborativa entre todos los elementos de un sistema de transporte (Dimitrakopoulos, 2020).

Análisis de Big Data para sistemas inteligentes de transporte

En el ámbito del transporte, se generan diariamente grandes volúmenes de información, por ello, el *Big Data* se presenta como la herramienta idónea para gestionar datos masivos y complejos. En los sistemas de movilidad, los macrodatos provienen de sensores y medidores inteligentes que rastrean los objetos en movimiento e informan su posición y estado, desde plataformas de teledetección de área amplia que supervisan la red vehicular. Dichos sistemas se utilizan de forma extensiva para detectar infracciones y rastrear vehículos, ya que registran marca, matrícula y placas. Y los resultados se procesan con fines legales. Según el modo de transporte, se aplican distintas técnicas de captura, lo que implica la obtención de datos brutos.

Dimitrakopoulos (2020) indica que la forma óptima de procesar esta información es en tiempo real, para fin de evitar el uso innecesario de espacio en los servidores. Esta tecnología refuerza la seguridad, pues permite rastrear vehículos con reporte de robo u otras incidencias. Para operar este SIT se requiere una infraestructura integral que incluya software, hardware y mantenimiento continuo. La ventaja es su aplicabilidad a todos los modos de transporte, optimizando rutas de transporte público, privado, aéreo y marítimo. Con un amplio historial de registros es posible analizar las rutas comerciales y pronosticar con precisión las condiciones futuras. Al adoptar *Big Data* como herramienta de desarrollo, los sistemas de transporte logran avances en redes, logística y seguridad, mejorando así el procesamiento de la movilidad mundial. En la Figura 27 se muestra como es el funcionamiento del sistema *Big Data*.

Figura 27 Estructura de los SIT desde la perspectiva de datos



Fuente: Dimitrakopoulos (2020)

Servicios de movilidad personalizados e Inteligencia Artificial

La tecnología predominante desde la década de 2020 ha sido la inteligencia artificial, la cual emula procesos de la inteligencia humana mediante algoritmos capaces de resolver problemas de diversa complejidad. El uso de aprendizaje automático sobre los datos recopilados por múltiples sensores conectados a conductores, vehículos y la red vial permite desarrollar soluciones inteligentes y atrae a empresas especializadas en software y hardware que firman convenios con diferentes automotrices.

No obstante, cuando la IA asume la responsabilidad de la conducción surgen nuevos retos, pues el diseño deja de centrarse en el usuario y se orienta hacia las máquinas. Al estar conectado a la red y al sistema completo, el vehículo expone la integridad del ocupante a la vulnerabilidad de ciberataques, además de plantear dilemas legales y de privacidad.

Mediante el procesamiento algorítmico la IA pretende resolver problemas de tránsito, como establecer sistemas de rutas que envíen un autobús a una estación que presente saturación o distribuir la flota con respecto a la demanda. Sin embargo, a medida que la conducción autónoma sustituye los sistemas de asistencia, aparecen cuestiones complejas sobre la toma de decisiones críticas que pueden derivar en accidentes de tránsito. En un caso hipotético, con daños materiales y lesiones, la responsabilidad recaería en el usuario ya que aún no existe una legislación que atribuya culpa a la IA; por ello, estas tecnologías seguirán enfrentando grandes desafíos pese a su notable avance (Dimitrakopoulos, 2020).

Movilidad Integrada para ciudades inteligentes

En el pasado, el crecimiento poblacional era desequilibrado y la planificación urbana se orientaba hacia la expansión suburbana, lo que aceleraba el desarrollo en zonas de difícil acceso y provocaba tiempos de traslado elevados en los principales puntos de interés. Para corregir esta mala planificación urbana y resolver el problema del crecimiento poblacional era desequilibrado han surgido propuestas como las ciudades inteligentes, cuyo objetivo es implementar un modelo de desarrollo urbano avanzado y ecológico; por ello, la movilidad ocupa un lugar prioritario. La aplicación de los SIT se divide en las siguientes categorías:

- Sistemas de información para viajeros y conductores a partir de instrucciones de navegación en diferentes horarios, notificaciones sobre el estado actual de la vía, alerta de accidentes, clima y advertencia de reparaciones en la vía primaria o en la carretera
- Sistemas de gestión de transporte, que permiten la gestión del tráfico mediante el control remoto de las señales de tránsito, así como pantallas con mensajes de información
- Sistemas de tarifas inteligentes que controlen el pago de peajes y poder proporcionar una mayor facilidad y flexibilidad con respecto a la demanda, al tener un sistema de peaje basado en las horas pico y las horas valle.
- Sistemas que proporcionan información analítica sobre el transporte público como lo son los informes de posición de trenes o autobuses en tiempo real, además de los tiempos de espera en estaciones o terminales.
- Integración completa de los sistemas inteligentes para la comunicación entre vehículos, a partir de semáforos, carreteras, otros vehículos y cualquier SIT.

En conclusión, los SIT aplican tecnologías y sistemas de comunicación a los medios de transporte. En los últimos años y hacia el futuro, la tecnología seguirá desarrollándose en áreas específicas como la planificación de viajes, los tableros de mensajes inteligentes, la semaforización avanzada y la gestión de tráfico, entre otras. También, se pretende que, a mediano plazo, los vehículos estén conectados a internet y conformen un conjunto de datos que interactúen entre sí. Sin embargo, para que esto funcione es necesario mejorar la infraestructura existente, pues todos los componentes deben estar interconectados.

Los SIT se consolidan y perfeccionan con el paso de los años. Las nuevas tendencias, apuntan al mejoramiento de la infraestructura vial y de los sistemas de seguridad de vehicular para reducir la tasa de incidentes, también se buscará un mayor desarrollo en ciudades a partir de planes integrados de control de tráfico. Se impulsará la incorporación de la IA en los vehículos para lograr una conducción plenamente autónoma, y las aplicaciones móviles añadirán funciones como alertas meteorológicas y avisos de obras. Por último, se prevé que las empresas privadas ofrezcan más

servicios a menor costo, lo que permitirá una mayor cantidad de usuarios y una mejor movilidad en el futuro (Dimitrakopoulos, 2020).

Bibliografía recomendada del capítulo

1. Bronzini M. Handbook of Transportation Engineering. 1st edition. Virginia. McGraw-Hill, 2004.
2. D.Johnson Victor y S. Ponnuswamy. Urban Transportation Planning, Operation and Management. 1st edition. India. McGraw Hill Education. 2012.
3. Dimitrakopoulos George, Uden Lorna, Varlamis Iraklis. The future of intelligent transport systems. 1st edition. Amsterdam. Elsevier. 2020.
4. Fricker Jon D. y Whitford Robert K. Fundamentals of Transportation Engineering a Multimodal Systems Approach. 2nd edition. New Jersey: Prentice Hall, 2018.
5. Garber Nicholas J., Hoel Lester A. Traffic and Highway Engineering. 5th edition. Virginia, CENGAGE. 2018.
6. Grava S. Urban Transportation Systems. 1st edition. New York: McGraw -Hill, 2004.
7. Hoel, Lester A., Nicholas, J. Garber. Transportation Infrastructure Engineering. A Multimodal Integration. 2nd edition. Stamford, C. T. Cengage Learning, 2011.
8. Meyer D. Michael. Transportation Planning Handbook. 4th. Edition. New Jersey. Wiley. 2016.
9. National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. (2022). Highway Capacity Manual: a guide for multimodal mobility análisis. 7ma edition. National Academies Press.
10. Papacostas, C.S. Transportation Engineering and Planning. 3rd edition. New Jersey. Pearson/Prentice Hall, 2007.
11. Roess, R. P., Prassas, E. S., y McShane, W. R. (2019). Traffic engineering (5ta ed.). Pearson.
12. Sussman Joseph M. Perspectives On Intelligent Transportation Systems (ITS). 1st edition. New York: Springer, 2005.
13. Sussman Joseph. Introduction to Transportation System. 1st edition. Boston. Artech House, 2000.
14. William W. Hay. An Introduction to Transportation Engineering. 2nd edition. New York: Wiley, 1977.

4. SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE EN EL MUNDO

Alrededor del mundo, la tecnología ha facilitado el acceso a los SIT mediante los teléfonos inteligentes. No obstante, existen casos particulares que se abordarán en este capítulo. Comenzamos con el transporte público, específicamente con el Sistema de Autobús Rápido (Bus Rapid Transit, BRT) implementado en la India.

Este ejemplo resulta relevante, ya que la India es el país más poblado del mundo y, por ende, enfrenta uno de los mayores retos de movilidad debido al volumen de usuarios. En la ciudad de Delhi se puso en marcha un plan maestro de movilidad de aproximadamente 300 km de red; Sin embargo, surgieron diferentes desafíos. Uno de ellos las múltiples intersecciones, sobresaliendo la zona de Chirag Delhi, donde en horas de máximo aforo llegaban a cruzar hasta 135 mil personas.

Dicho cruce está compuesto por automóviles, motocicletas y transporte público como camiones. Ante esta problemática, el gobierno implementó un sistema en el que los BRT cuentan con una señal de prioridad en las intersecciones, otorgándoles mayor tiempo de luz verde dentro de la jerarquía de circulación. Este SIT integra puntos de control de tráfico mediante la semaforización; no obstante, ha recibido críticas de los demás usuarios y sufre de invasiones constantes en su carril confinado (Johnson, 2012).

A pesar de la incorporación de SIT, la India aún enfrenta numerosos retos debido a su crecimiento exponencial en los últimos años, lo que ha impactado directamente en el incremento de vehículos motorizados de las ciudades. De acuerdo con los registros históricos, la flota vehicular del país paso de 5.4 millones de unidades en 1981 a 210 millones en 2015 (Dimitrakopoulos, 2020). Las grandes urbes, como Delhi, deben poner en marcha soluciones óptimas a mediano plazo, pues los problemas de congestión persisten en la actualidad.

Algunas de las soluciones que pueden aplicarse en casos con el de la India incluyen la construcción de nueva infraestructura que integre SIT, dado que los periodos de máxima demanda se prolongan cada vez más. Asimismo, es necesario modernizar el transporte público para evitar una mayor congestión en las vías existentes y trasladar parte del mercado automotriz al transporte masivo. Para lograrlo, el sistema debe ser óptimo y eficiente; esto puede alcanzarse mediante pantallas de información al viajero, peajes inteligentes, como tarjetas de movilidad únicas con tarifas dinámicas, y la integración total de todos los modos de transporte. Estas medidas no solo benefician la infraestructura vial, sino que también mejoran la calidad de vida de la población (Dimitrakopoulos, 2020).

La siguiente ciudad de análisis es Dublín, Irlanda. El ayuntamiento equipó múltiples estaciones de transporte público con pantallas de información al viajero como se muestra en la Figura 28. Estas pantallas funcionan como un sistema de información al viajero que proporciona, en tiempo real, los horarios de llegada de autobuses en aproximadamente 1000 paradas de la ciudad. La comunicación entre estaciones y autobuses se realiza mediante fibra óptica de alta velocidad, cada estación dispone de su propia red LAN inalámbrica, y cada autobús cuenta con una dirección IP única. Además el sistema está conectado a una red de 140 cámaras de vigilancia ubicada en cruces y calles de importancia, y cada autobús cuenta con una cámara frontal que permite checar las condiciones de tráfico (Kumar, 2018).

Entre los principales beneficios observados tras la implementación de este SIT se encuentran la mejora en la calidad de servicio de los autobuses, una mayor fiabilidad en los tiempos de traslado, la comodidad y practicidad de ofrecer información en tiempo real al usuario, la reducción de los intervalos irregulares entre autobuses, la precisión en la gestión de la demanda en horas de pico y la

recopilación de datos, así como la velocidad de operación, que facilita la identificación de puntos conflictivos o de alta congestión vehicular (Kumar, 2018).

Figura 28 Sistema de información al viajero en Dublin



Fuente: siliconrepublic (2020)

Continuando, en el continente europeo, la ciudad de Florencia, Italia, cuenta con sistemas de autobuses operados por ATAF (que sus siglas en italiano son Azienda Transporti dell'Area Fiorentina), las cuales incorporan tecnologías similares a las de Dublin, mediante un sistema de localización y control de vehículos. Cada autobús dispone de GPS, radio troncalizado y otras funciones de mejora. Los objetivos, semejantes a la ciudad anterior, son gestionar los tiempos de recorrido, distribuir las unidades y generar registros de viajes, análisis e informes solicitados por la provincia de Florencia, además de fomentar el uso de boletos digitales y permitir el monitoreo dentro de las unidades (Kumar, 2018).

En Esmirna, Turquía, el sistema gubernamental opera una flota de aproximadamente 1,500 autobuses distribuidos en cerca de 400 rutas que trasladan alrededor de 2.8 millones de pasajeros al día, la ciudad también dispone de otros modos de transporte como metro, ferrocarril, y ferri. El servicio funciona de manera metropolitana, integrado y coordinando las rutas existentes.

Asimismo, se implementó el sistema ESHOT (Elektrik Su Havagazi Otobüs Trolleybüs), una plataforma de pagos electrónicos que no solo procesa transacciones, sino que establece tarifas escalonadas para cada modo de transporte. El sistema registra en tiempo real a los usuarios dentro de la red, lo que permite conocer el número de pasajeros, la ocupación y la demanda en las diferentes rutas del sistema. Entre sus ventajas destacan la gestión eficiente de ingresos evitando el manejo de efectivo, una mejor coordinación en los transbordos y un aumento de la seguridad mediante vigilancia a bordo (Kumar, 2018).

Los SIT, no se han aplicado únicamente en el transporte público. Un país con grandes avances en tecnologías de movilidad es Japón, el cual ha desarrollado sus ciudades, carreteras y vehículos con el objetivo de mejorar su sistema de movilidad. El país aspira a presentar uno de los índices más bajos de incidentes automovilísticos, así como ofrecer entornos seguros a los peatones, En consecuencia, ha promovido e implementado los SIT en las siguientes áreas (Kumar, 2018).

- Avances en los sistemas de navegación
- Cobro electrónico de peajes (telepeaje)
- Asistencia para una conducción segura en sus vehículos
- Optimización en la gestión de tráfico
- Aumentar la eficiencia en la gestión de carreteras
- Apoyo al transporte público
- Aumentar la eficiencia en el ámbito comercial
- Apoyo a los peatones

Las empresas japonesas del sector automotriz trabajan en un sistema de coordinación entre autopista y vehículo denominado ETC 2.0 (Electronic Toll Collection). Este sistema, puesto en marcha en el 2011, transmite información sobre el tráfico usando dispositivos similares a los lectores de TAG instalados a lo largo de las carreteras (TEA, 2014). A continuación, se muestra el funcionamiento del sistema a nivel vehículo y a nivel carretera como se muestra en la Figura 29:

Figura 29 Sistema ITS de gestión de vías controladas e incidentes



Fuente ITS – TEA (2014) y ATTAP (2025)

Además, las empresas de tecnología japonesas buscarán continuar el desarrollo de software y hardware e incursionar en la inteligencia artificial, mientras que firmas automotrices como Toyota, Mazda, Nissan y Honda pretenden avanzar en la conducción autónoma para reducir la tasa de incidentes de alto impacto en el país. Paralelamente, se plantea mejorar el transporte público para que los usuarios se beneficien del mismo nivel de innovación. Estos objetivos se desarrollarán en plazos corto, mediano y largo, con el propósito de mantener a Japón a la vanguardia tecnológica.

Continuando con el continente asiático, China ha incrementado su capacidad tecnológica y de investigación. En los últimos años, su dinamismo económico ha impulsado la renovación de la infraestructura, de modo que, en las grandes ciudades como Beijing, las autoridades dispongan de información del conductor mediante cámaras de vigilancia. Al mismo tiempo, el gobierno fomenta el sector automotriz, y prepara las futuras ciudades inteligentes para mitigar problemas propios de las megalópolis, como lo es la congestión y los accidentes viales (Kumar, 2018).

No obstante, China no se limita a adoptar tecnologías existentes; abre institutos de investigación en el desarrollo de nuevas tecnologías. La inversión en SIT creció de 25.28 mil millones de yuanes en 2011 a 200 mil millones en 2020 (Dimitrakopoulos, 2020). Como se indicó en el Capítulo 3, Sección 3.5, la inteligencia artificial cobrará relevancia en la movilidad y China ha conseguido integrar sus grandes empresas tecnológicas en un mismo sistema, respaldado por el financiamiento gubernamental, de modo que los fabricantes de hardware colaboren con áreas de investigación de transporte.

Otra nación con planes de investigación en los SIT comparables a los de China son los Estados Unidos de América (EUA). Desde el siglo XX, el gobierno federal ha destinado recursos a tecnologías que mejoran la infraestructura vial. El Departamento de Transporte de Estados Unidos cuenta con una división dedicada a los SIT donde explican detalladamente, en que se ha invertido con la recaudación de los contribuyentes.

De acuerdo con Federal Highway Administration (2025), las tecnologías deben formar parte del sistema de movilidad del país para aumentar la seguridad de los usuarios. Entre los SIT que cuenta EUA son los siguientes:

Cámaras de seguridad: Los departamentos estatales instalan cámaras a lo largo de vías primarias para vigilar el flujo vehicular. Si un vehículo provoca retenciones sobre la vía, la policía de tránsito puede intervenir y restablecer la circulación. Las cámaras de tránsito también se usan en la investigación y rastreo de vehículos infractores, pues algunas pueden estar conectadas a sistemas de detección de infracciones, como vueltas prohibidas en U, saltarse el semáforo en rojo, pasar el límite de velocidad, entre otras. La implementación del sistema varía entre estados debido a las diferencias en sus reglamentos de tránsito.

Límites de velocidad variables: Mediante pantallas LED, el sistema ajusta el límite de velocidad según el volumen de tráfico, y el diseño geométrico de la carretera. También puede modificar la velocidad ante situaciones como incidentes, condiciones meteorológicas adversas o trabajos de mantenimiento, como se muestra en la Figura 30. Dado que muchos conductores no respetan los límites de velocidad, en carreteras accidentadas o con un estado de pavimento en malas condiciones, tienden a provocar una mayor tasa de accidentes sobre el camino. Al contar con un sistema de velocidad variable se pretende disminuir la frecuencia y gravedad de los accidentes en carreteras.

Figura 30 Límites de velocidad variables en carreteras

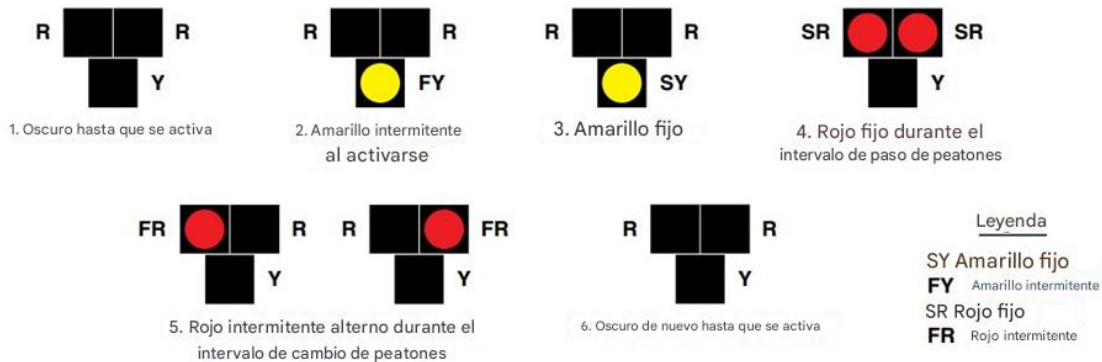


Fuente: Federal Highway Administration (2025)

Intervalo entre peatones libres: este sistema permite que las personas crucen una intersección entre 3 y 7 segundos antes de que los vehículos reciban la señal de avance (verde). Otorga prioridad a los peatones en vialidades donde los conductores giran a la derecha o a la izquierda. De este modo se incrementa la visibilidad del peatón y se reduce el conflicto con los vehículos, al tiempo que se brinda mayor seguridad a quienes necesitan más tiempo para cruzar una intersección y se eleva la probabilidad de que los automovilistas cedan el paso.

Balizas híbridas para peatones: se trata de dispositivos diseñados para regular el tráfico y facilitar cruces seguros en carreteras de alta velocidad, como las carreteras federales libres de cuota que atraviesan pequeños poblados. El cabezal de la baliza cuenta con dos farolas de luz rojas y abajo cuenta con una farola amarilla. Las farolas permanecen oscuras hasta que un peatón apriete el botón en caso de cruzar la carretera, una vez activada, se activará una secuencia de luz amarilla para posteriormente encender las luces rojas, una vez desactivada las luces rojas los automovilistas pueden seguir con el ritmo y continuar su ritmo en carretera (ver Figura 31). El sistema busca disminuir los accidentes en vías de alta velocidad, ofrecer a los peatones un cruce seguro, mejorar la visibilidad para los conductores y evitar el uso excesivo de reductores de velocidad sobre la carretera.

Figura 31 Balizas híbridas para carreteras



Fuente: Federal Highway Administration (2025)

También existen balizas para señalizaciones verticales de cruce peatonal en vías urbanas. Se trata de una tira de luz LED amarilla que se activa cuando la persona comienza a cruzar la calle. Este sistema resulta más sencillo que el empleado en carreteras, ya que las velocidades en ciudades son menores. La señal debe incluir una flecha que indique al automovilista la presencia del peatón y la necesidad de detenerse. Otro componente de los semáforos inteligentes es la programación de los tiempos de luz verde y luz roja (Federal Highway Administration, 2025).

Estos intervalos son esenciales porque advierten a los conductores que pronto se encenderá la luz roja de alto total. Uno de los principales factores de siniestralidad está vinculado a quienes cruzan con luz roja debido a que el periodo de luz amarilla resulta demasiado corto. El análisis de la fase amarilla debe ser preciso: si el intervalo es breve, los automovilistas frenaran bruscamente o aceleran, y en ambos casos se incrementa el riesgo de accidentes; si es demasiado largo, la luz amarilla se interpreta como una prolongación de la luz verde. Por ello, el gobierno de los EUA ha establecido que los semáforos inteligentes, ajusten la duración de la luz amarilla conforme a la velocidad permitida en la vía, el tiempo de percepción y reacción del conductor, la desaceleración del vehículo (de acuerdo con la composición de la vía) y geometría de la intersección (Federal Highway Administration, 2025).

Estos, son algunos de los SIT integrados a la infraestructura vial estadounidense. Al igual que China, el país ha invertido millones de dólares en nuevas tecnologías. La investigación en SIT busca mejorar la seguridad de los usuarios mediante la conectividad, unificando a los automovilistas, infraestructura vial y peatones dentro de un mismo sistema (Milenio, 2023).

Uno de los SIT que EUA implementará es el programa CARMA (por sus siglas en inglés Connected Automated Research Mobility Applications), orientado a la investigación colaborativa en tecnología, programación, seguridad y optimización del transporte. Su objetivo es perfeccionar la automatización del sistema vial. El programa CARMA es de código abierto y se espera que su uso se expanda de forma gradual. (Federal Highway Administration, 2025).

Además, la presencia de compañías líderes en la automatización vehicular, como Tesla, genera nuevos retos para la infraestructura carretera. La nueva infraestructura inteligente, requiere de estar conectada a la red para el control de vehículos. En la Las Vegas, por ejemplo, funciona un sistema de túneles donde vehículos autónomos circulan a velocidad constante y sin obstrucciones por medio de una conducción completamente autónoma (Tesla, 2025).

En conclusión, numerosos países han adoptado los SIT para resolver sus problemas de movilidad. A diferencia del siglo XX, cuando se prestaba poca atención a la seguridad del transporte, hoy se busca ofrecer mayor protección a usuarios y conductores mediante innovación

continua. Naciones como China y Estados Unidos siguen invirtiendo en nuevas tecnologías y en la modernización de la infraestructura que dará servicio a los vehículos autónomos. Por ello, muchos países asumen el compromiso de ampliar sus SIT para mejorar la movilidad y evitar rezagos tecnológicos; México enfrenta un escenario de oportunidades y desafíos en la implementación de estos sistemas.

Bibliografía recomendada del capítulo

1. D.Johnson Victor y S. Ponnuswamy. Urban Transportation Planning, Operation and Management. 1st edition. India. McGraw Hill Education. 2012.
2. Dimitrakopoulos George, Uden Lorna, Varlamis Iraklis. The future of intelligent transport systems. 1st edition. Amsterdam. Elsevier. 2020.
3. Federal Highway Administration (Enero 2025). Seguridad de los sistemas de transporte inteligentes. Obtenido de: <https://highways.dot.gov/safety/other/intelligent-transportation-systems-safety>
4. Kumar P. y Kumar A. Intelligent Transport Systems. 1st edition. Nueva Delhi. PHI Learning, 2018.

5. SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE PARA CIUDADES MEXICANAS

Una vez revisados los SIT alrededor del mundo, resulta fundamental precisar cuáles son los sistemas disponibles en México y cuáles se han aplicado en años recientes. En el país, una de las primeras publicaciones de los SIT fue publicada en mayo – junio de 1999 por parte del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). En la publicación se identificó los principales problemas en los sistemas de transporte siendo la saturación de los sistemas el más crítico. Ante ello, se plantearon dos soluciones principales basadas en aumentar la oferta de infraestructura. No obstante, la información pública sobre los SIT en México sigue siendo escasa y poco actualizada, lo que dificulta su difusión y, por ende, su implementación.

Cuando una vía se saturada o un sistema rebasa su capacidad, suele recurrirse a la construcción de nueva infraestructura para evitar la saturación. Esta alternativa implica costos elevados, pues exige construir, rehabilitar o modernizar caminos; por ejemplo, ampliar una autopista. Sin embargo, si se aplica de manera aislada, la saturación reaparece con el tiempo, de modo que no siempre constituye la respuesta más eficiente.

Resulta entonces implementar medidas de control de la demanda. Estas soluciones, con un menor costo a comparación de una nueva infraestructura, buscan redistribuir el flujo y reducir la congestión mediante la optimización de la red y la dispersión de los usuarios hacia rutas alternativas, mitigando los cuellos de botella. Para lograrlo se recurre a los SIT, que aprovechan tecnologías de la información y la comunicación, para enfrentar los problemas de movilidad del país.

En México, las principales características de los SIT son optimizar los viajes, acortar los tiempos de traslado y elevar la seguridad. Los Sistemas Avanzados de Manejo de Tráfico (SAMT) tienen el propósito de mejorar el nivel de servicio y, con ello, reducir los tiempos de traslado. Para conseguirlo emplean componentes de software y hardware que recopilan datos de una vía específica y los envían a un centro de control. Tras el procesamiento de la información, el viajero puede decidir cómo organizar su trayecto, elegir el modo de transporte, la ruta más conveniente y la hora de salida con menor congestión.

Para operar adecuadamente, los SAMT requieren equipos de captación de datos en la vía, un sistema de control eficiente apoyado en señalización horizontal y vertical, y un esquema de monitoreo de operadores y controladores viales. Entre los dispositivos que pueden incorporarse destacan los sistemas de telepeaje, paneles electrónicos de información variable, sensores de bucle inductivo, entre otros. Lo ideal es integrar todos estos elementos.

El siguiente SIT corresponde a los Sistemas Avanzados de Control de Vehículos (SACV), cuya esencia radica en la interacción de sensores, equipos de cómputo y dispositivos de control que alertan al conductor, incrementando la percepción de seguridad. Aunque su desarrollo ha estado liderado por empresas extranjeras, las computadoras de los vehículos pueden incorporar sensores que mejoren la conducción, por ejemplo, la velocidad crucero, y contribuyan al cumplimiento del reglamento de tránsito, reduciendo accidentes.

A diferencia de otros SIT, el SACV se orienta principalmente a la industria automotriz encargada de desarrollar estas tecnologías. No obstante, es crucial que el software se adapte a la normativa de cada país; en el caso de México, debería al menos incorporar los límites de velocidad definidos en la Red Nacional de Caminos de la SICT.

Entre los SIT adaptados en años recientes en las principales ciudades del país destacan los Sistemas Avanzados de Transporte Público (SATP). Sus rasgos esenciales son la provisión de

información electrónica al viajero y el control de tráfico en autobuses, trenes y otros vehículos. En México se busca equipar a estaciones de metro, sistemas de transporte BRT, teleféricos, trenes ligeros y trenes suburbanos con estos mecanismos. Asimismo, se pretende implementar una tarifa electrónica homologada en los distintos modos de transporte y, en materia de seguridad, utilizar rastreo GPS para proteger tanto la flota como a los usuarios.

Para que los SIT mejoren efectivamente el transporte público en México, deben introducirse primero en los sistemas de transporte masivo y luego escalar a los transportes de ruta. Además, su uso ha de ser sencillo para los usuarios; las estaciones y paradas deben mostrar los tiempos de espera y posibles incidencias, y todos los sistemas de transporte deberían aceptar pago electrónico con el fin de que el usuario optimice su tiempo.

En los sistemas con carril confinado, como los BRT, es indispensable instalar cámaras para la supervisión de los carriles y así evitar las invasiones. Para transportes masivos, es decir, trenes y metro, las estaciones requieren pantallas de información al viajero, incluido el intervalo entre trenes y, en pasillos de correspondencia, el tiempo de arribo de la línea conectada., Según el material rodante, conviene dotar a los trenes de sistemas visuales o auditivos de información, que avisen al usuario de rutas alternas ante fallas o incidente.

Otro sistema presente en México es el de los Sistemas Avanzados de Información al viajero (SAIV), accesibles para la mayoría de los usuarios y diseñados para informar sobre las condiciones de los diferentes sistemas de transporte. Su funcionamiento se basa en el monitoreo continuo del tránsito durante todo el día. La ventaja de este SIT es obtenida por los teléfonos inteligentes por medio de una red inalámbrica y su sistema GPS. Esto permite recabar la información generada por los propios usuarios que circulan sobre las vías

Para operar con eficacia, estos sistemas requieren de dispositivos que recopilen la información, principalmente de teléfonos celulares, y una conexión a internet que permita mostrar al usuario las rutas disponibles, los tiempos de trayecto y, en caso de vías de cuota, las tarifas correspondientes (IMT, 1999).

En México, la movilidad es uno de los temas prioritarios para la ciudadanía, debido a la necesidad de desplazarse a los centros de trabajo y a puntos de recreación o de atención de necesidades. En las grandes metrópolis, como la Ciudad de México, el transporte público es el principal medio de transporte, por lo que es indispensable optimizar los tiempos de traslado. Los usuarios llegan a realizar viajes mayores a 3 horas y en viaje redondo 6 horas, lo que equivale a $\frac{1}{4}$ parte de su día, siendo perjudicial para la salud y para el rendimiento de las empresas (Gobierno de la Ciudad de México. (2020).

Por otra parte, los viajes interestatales, se realizan mayormente por vía terrestre y no por vía aérea, lo que implica retos en la red nacional de carreteras y para las autopistas federales y estatales. La implementación de los SIT puede generar grandes ventajas significativas para la movilidad del país. Como se ha expuesto a lo largo de estos apuntes, los SIT buscan optimizar la oferta y la demanda de la red mediante equipos de control de tráfico. Sin embargo, en México no se han implementado a gran escala, por lo que a continuación se mostrarán los sistemas con los que cuenta el país, así como las ventajas que han aportado.

En el apartado de los SGVCI, México los ha empezado a utilizar principalmente en el cobro automático de peaje, con el fin de optimizar y agilizar el tránsito en las plazas de cobro. Algunas de las empresas de telepeaje en México son:

- Televía
- Viapass
- PASE

- IAVE
- Easytrip
- Quickroad

Las empresas antes mencionadas funcionan mediante una antena emisora que emite ondas de radio. La antena se puede ubicar en el techo de las plazas de cobro o también en un marco que únicamente sujeta la antena. Esta antena debe estar orientada hacia el vehículo para que sea detectado correctamente. También, se requiere un pequeño receptor, conocido como Transponder o coloquialmente como “TAG”, ubicado en la parte superior del parabrisas del automóvil. Por último, se integra un sistema informático, que lleva el control del cobro del telepeaje, como se muestra en la Figura 32.

Cada empresa encargada de los transponders puede disponer de diferentes esquemas de cobro, ya sea por una cuenta prepago con saldo por anticipado o por recibí mensual.

Figura 32 Sistema de Telepeaje en Plaza de Cobro Cantona en la Autopista Amozoc – Perote



Fuente: Google Maps (2025)

De acuerdo con en un estudio del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) de 2014, se analizó el funcionamiento de los sistemas de telepeajes a lo largo de las autopistas de cuota del país y se identificaron sus principales ventajas, que son:

- Permite mayor fluidez en el paso de vehículos con respecto a otros sistemas de pago utilizados en el cobro de peaje.
- Mejora en la capacidad de las casetas, ya que, en la hora de máxima demanda, el flujo será más constante y permitirá la llegada de más vehículos sin llegar a un mal nivel de servicio.
- La implementación de tecnologías que se usan alrededor del mundo, por lo que su mantenimiento es menos costoso al ser una tecnología de la cual ya se cuenta con información de su funcionamiento.
- Se puede implementar y poner en operación sin la necesidad de cerrar carriles en la autopista, esto puede permitir que en carreteras que no cuenta este sistema, se pueda adecuar sin intervenir en grandes lapsos de tiempo la circulación
- Mejoramiento en la seguridad vial ya que en vías que no existen las casetas como el “Viaducto Bicentenario” los vehículos no requieren de reducir su velocidad y en plazas

de cobro pueden contar con un carril exclusivo y así poder tomar un solo carril y evitar realizar maniobras que perjudiquen el tránsito.

- Continuando con el punto anterior, en autopistas que no cuentan con plazas de cobro, se puede optimizar los espacios en vialidades muy estrechas como lo son los carriles laterales de periférico en la Zona Metropolitana del Valle de México.
- Por último, las autopistas que cuentan con solo sistemas de telepeaje contarán con menor sistema de personal como cobradores. Sin embargo, en este punto es importante mencionar que ese personal se puede distribuir en otras áreas que llevan a la operación y conservación de una autopista.

Otro SIT del apartado de los SGVCI son los **sensores de mangueras neumáticas**. Este sistema consiste en instalar una manguera sobre la vía, de forma perpendicular a la circulación, conectada a un dispositivo que funciona como aforador. El sistema cuenta el número de ejes a partir de la presión del aire y, una vez identificando el vehículo, el equipo de conteo almacena la información en un software para su posterior extracción y así determinar el flujo de la autopista.

La información que puede recabar es amplia. Entre otros datos, permite obtener el volumen vehicular, la clasificación vehicular por número de ejes conforme a lo establecido por la SICT y la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017 “ 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”, con categorías como motos (M), autos (A), autobús (B), Camión (C), Camión – Remolque (C-R), Tractocamión articulado (T-S) y Tractocamión Semirremolque – Remolque (T-S-R). También puede registrar velocidades por sentidos de flujo, intervalo de tiempo entre vehículos y, en algunos casos, la longitud del vehículo. Todo depende del tipo de equipo con el que se afora, como se muestra en la Figura 33.

Los sensores de mangueras neumáticas presentan múltiples ventajas: bajo costo de mantenimiento, portabilidad, resistencia al paso de vehículos a altas velocidades e instalación sencilla y rápida. Son resistentes a la intemperie, pueden operar con baterías reemplazables en caso de descarga y facilitan la extracción de datos (IMT, 2023).

Otra ventaja, en una perspectiva más amplia, proviene de la modernización de la infraestructura vial. Con un registro vehicular y un aforo constante es posible identificar la hora de máxima demanda y determinar el nivel de servicio de la infraestructura existente para evaluar distintas alternativas, como crear nueva oferta mediante proyectos carreteros o ampliaciones de carriles, o bien implementar controles de tráfico y de demanda para organizar la red actual. Por ello, este SIT suele ser de los primeros en implementarse para habilitar otros sistemas.

Figura 33 Manguera neumática y su dispositivo de conteo sobre el Macro libramiento de Querétaro



Fuente: Propia (2025)

Los SACT, que consisten en la aplicación de Semáforos Inteligentes. En este caso de estudio se considera el caso de la Ciudad de México, que desde 2019 ha instalado semáforos inteligentes en diversas intersecciones que ya presentaban problemas de congestión y saturación vial, además de una tasa de accidentes superior a la de otros sitios. Estos SIT se monitorean las 24 horas del día durante todo el año por parte de la Secretaría de Seguridad Ciudadana. Desde el centro de control se optimiza el flujo conforme a las horas pico y valle con el fin de reducir incidentes de tránsito y tiempos de traslado (IMT, 2022).

En un futuro, se espera que los semáforos inteligentes mejoren la movilidad de las grandes ciudades. En 2024, la jefa de gobierno de la Ciudad de México anunció la modernización de la red semafórica con apoyo de la inteligencia artificial y otras tecnologías para optimizar los cruces. Su operación busca desahogar las avenidas principales mediante la optimización del tiempo en luz verde. Entre sus ventajas está la mejora del funcionamiento de las intersecciones y el desahogo de vialidades de alto flujo. No obstante, no se trata solo de vehículos; en cruces de gran escala, como el de Eje Central sobre Bellas Artes, también se pretende optimizar el paso peatonal y generar cruces seguros (Ovaciones, 2024).

Se han implementado radares para aplicar fotomultas y fotocívicas, como se muestra en la Figura 34. Este esquema opera desde el 22 de abril de 2019 y funciona mediante cámaras y radares distribuidos a lo largo de las vías principales en la Ciudad de México. El sistema se activa cuando un vehículo supera la velocidad programada para cada vía. En la Ciudad de México, las vías rápidas tienen velocidades máximas de 80 km/h en vías primarias, 50 km/h en vías secundarias y 30 km/h en el resto., Otras infracciones registradas por el sistema incluyen la invasión del cruce peatonal, llevar en el asiento del copiloto a niños menores de 12 años, cruzar la luz roja y usar el teléfono celular al conducir, entre otras (SEMOVI, 2025).

Cada gobierno cuenta con su reglamento de tránsito, por lo que la programación del sistema depende de cada entidad federativa, así como la sanción a pagar. La ventaja de este SIT es la reducción de accidentes en las principales ciudades. También se busca hacer más seguro los cruces en vías primarias, principalmente en escenarios de bajo flujo vehicular. Además, estos radares promueven un mayor control sobre la red vial urbana, por ejemplo, en vialidades con restricciones por exceso de peso y dimensiones.

Figura 34 Sistema de cámaras y radares de las fotos cívicas y foto multas de la Ciudad de México



Fuente: Excélsior (2025)

Los SATP, dirigidos a las grandes masas de población. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se realizó un censo en ciudades que cuentan con un sistema de transporte masivo, del cual se tomaron datos de las siguientes ciudades: Zona Metropolitana del Valle de México, Guadalajara, León, Monterrey, Puebla, Pachuca, Chihuahua y Querétaro, con el fin de conocer a los usuarios totales anuales. El resultado fue de 233 millones de pasajeros transportados y 45 millones de kilómetros recorridos. Como ejemplo de la ciudad más poblada del país, en el Valle de México se concentra una población de 21,804,515 habitantes, de acuerdo con Data México, y en 2024 se registraron 170.3 millones de pasajeros transportados en transporte público, cuyo principal medio de transporte es el Metro de la Ciudad de México (INEGI, 2025).

En 2024, el Metro de la Ciudad de México transportó 1,171 millones 859 mil 113 usuarios en 366 días, dando como resultado un promedio diario de 3,201,800 usuarios, equivalente al 15% de la población del Valle de México. Esto subraya la importancia de aplicar los SATP (STC, 2025). Sabiendo que la mayoría de la población se mueve en transporte público, deben crearse tecnologías que optimicen los viajes de los usuarios, como en las otras partes del mundo que se mencionaron en el capítulo anterior. Por ello, múltiples gobiernos estatales han empezado a implementar diferentes SATP como solución a la problemática de la oferta actual.

Los SATP incluyen múltiples herramientas, y una de ellas son las tarjetas de movilidad, cuyo objetivo es facilitar los desplazamientos dentro de las megalópolis. Las ventajas de estas tarjetas son el ahorro de costos al prescindir de boletos físicos y una mayor seguridad al utilizar un método de pago digital. Estas tarjetas se encuentran en múltiples ciudades de México, sin embargo, el ejemplo que abarca más sistemas de transporte es la tarjeta de movilidad de la Ciudad de México. La tarjeta es una llave de acceso a múltiples sistemas como el STC Metro, Metrobús, RTP, Cablebús, Ecobici, Transportes Eléctricos, Transporte Concesionario y también cuenta acceso al Tren Interurbano México – Toluca y algunas estaciones del Mexibús y Mexicable (Gobierno de la Ciudad de México, 2022).

La unificación del método de pago en una tarjeta permite que los usuarios paguen múltiples modos con una sola tarjeta y que esta reconozca la tarifa de cada sistema. Además, puede recargarse por medios digitales y en estaciones de toda la red de movilidad. Una aplicación emergente de las tarjetas, son los registros de origen del usuario al validar la tarjeta; esta herramienta puede ser de gran utilidad, ya que, para los estudios de tránsito, permite estimar las horas pico de los distintos sistemas y construir matrices orígenes – destino con el fin de optimizar rutas y desahogar el sistema mediante análisis de redes.

Continuando con el Gobierno de la Ciudad de México (2022), otro SATP utilizado son las herramientas de información al viajero difundidas por medio de pantallas y redes sociales. En las estaciones de distintos sistemas de transporte se puede encontrar una pantalla con datos de la red, como se muestra en la Figura 34. Para los sistemas BRT, cada estación cuenta con una pantalla con los tiempos aproximados de llegada de cada autobús; en otros sistemas, esta tecnología no ha avanzado tanto..

Por último, otra herramienta que se utiliza para informar a los usuarios son las redes sociales. Por medio de plataformas como WhatsApp, X, Facebook, entre otras. Los usuarios envían alertas sobre la situación actual de la red, para que quienes requieren hacer un viaje tomen rutas alternas. Este medio no solo es utilizado por los usuarios: las páginas oficiales de los sistemas de transporte también informan de manera anticipada el estado de la red, lo que genera una comunicación más directa. Este SATP tiene la ventaja de que la información se difunde en tiempo real por diferentes usuarios que pueden confirmarla; además, funciona como sistema de alerta para diversas situaciones como bloqueos, fallas del transporte, problemas de seguridad en la red, entre otros avisos que pueden notificarse (X, 2025).

Figura 35 Pantalla con tiempos de espera de autobuses de la línea 5 del Metrobús



The image shows a digital display at a Metrobús station. At the top, it displays the Metrobús logo (MB) and the station name 'Estación San Lázaro Norte L5'. To the right, it shows the date 'Dom 16 de Feb' and the time '20:52'. Below this is a table with the following data:

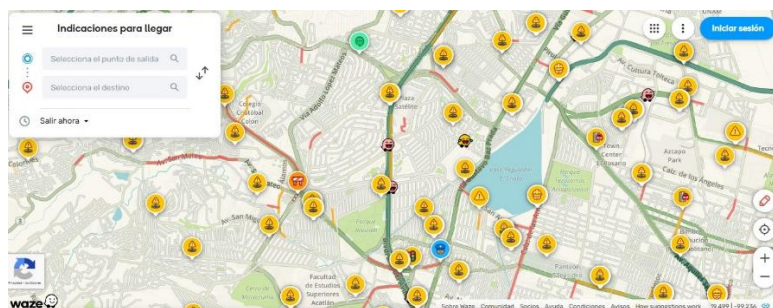
Línea	Dirección	Autobús	Minutos
5	Río de los Remedios	2611	15
5	Río de los Remedios	3314	25
5	Río de los Remedios	2617	25
5	Río de los Remedios	3316	26
5	Río de los Remedios	2639	34
5	Río de los Remedios	603	36

Continuando con los SIT aplicados en el país, se encuentran los Sistemas Avanzados de Información al Viajero (SAIV), específicamente las **Apps de los teléfonos inteligentes** cuyo fin es trazar rutas de un punto A a un punto B. Quienes cuenten con un teléfono con conexión a internet, sistema GPS y un sistema operativo compatible podrán acceder a un conjunto de herramientas de localización y generación de rutas. En México, se han posicionado empresas como Google Maps y Waze como herramientas que informan el estado actual de la vía, así como rutas alternas y tiempos de demora (Google, 2025).

La ventaja los SAIV es que puede beneficiar a un amplio conjunto de usuarios, como particulares, transportistas y pasajeros que requieren conocer la ruta más rápida de transporte público, entre otros. También facilita el trabajo de empresas como Uber o Didi en el traslado de pasajeros. Durante mucho tiempo los SAIV no se consideraban como SIT; sin embargo, en los últimos años han evolucionado para gestionar el tráfico y solucionar problemas de movilidad de los usuarios (ITM, 2022).

Los SAIV han estado en constante actualización. En México, Waze (ver Figura 36) permite a los usuarios informar sobre el estado del pavimento en la ruta elegida, como baches o tramos cerrados, y reportar contratiempos en el trayecto. A futuro, se espera que la mayoría de los vehículos que circulen en México cuenten con navegación integrada, aunque esto dependerá de las versiones de vehículo que saquen los fabricantes. Con el apoyo de los teléfonos celulares será posible avanzar en la conectividad entre cada medio de transporte.

Figura 36 Situación vial en Naucalpan en hora pico



Fuente: Waze (2025)

Los SIT mencionados en este capítulo son los más utilizados en el país. Aunque su alcance no esté a la par de otros países, representan un buen comienzo para la implementación de nuevas

tecnologías en la movilidad. El éxito de los SIT requiere una puesta en marcha adecuada y facilidad de uso. A modo de ejemplo, en el telepeaje la mayoría de las concesiones de autopistas cuentan con cobro electrónico y, en algunos casos, este es el único método de pago, como sucede en el Segundo Piso del Periférico ubicado en la ZMVM, conformado por un conjunto de autopistas operadas por Aleatica e IDEAL.

Sin embargo, los beneficios del telepeaje no se limitan a las vías de cuota que solo aceptan el cobro electrónico. Las autopistas que implementan un carril exclusivo de telepeaje hacen que un porcentaje de los usuarios tenga acceso más rápido a la caseta y evite las filas provocadas por el cobro manual. Al ofrecer una ventaja frente al pago en efectivo, se busca que la mayoría de las autopistas implementen un carril exclusivo de telepeaje, con su señalamiento correspondiente, para evitar maniobras de cambio de carril y optimizar los tiempos de espera en las casetas.

Las mangueras neumáticas utilizadas en proyectos de tránsito permiten conocer el comportamiento de las autopistas, así como su composición vehicular. Este punto es clave, ya que en proyectos nuevos se requiere estimar cuánta demanda potencial puede captar la infraestructura y así optimizar la red del país. Uno de los cambios que se han empezado a implementar es la sustitución de las mangueras neumáticas por videocámaras. No obstante, por el costo de procesamiento, los conteos suelen realizarse en gabinete por personal especializado una vez obtenido el video del tránsito. Se espera que en el futuro el conteo en México se optimice mediante inteligencia artificial que identifique que tipo de vehículo es y la hora de cruce, para determinar las horas de máxima demanda y los niveles de servicio de la red.

La implantación de las fotomultas ha traído beneficios considerables en las ciudades donde se han implementado. Al aplicar el reglamento de tránsito, se logra que la mayoría de los usuarios respeten los límites de velocidad, los semáforos en rojo, y eviten maniobras prohibidas, entre otras conductas. La ventaja principal es la reducción de la tasa de accidentes, especialmente por la noche, cuando aumenta la velocidad al haber menos vehículos en circulación. La recaudación de multas puede utilizarse para mejorar la vía o para instalar nuevas cámaras y fortalecer el control de tránsito. Otras ciudades del país empezaron a utilizar foto multas generando una mayor seguridad a los peatones y a los conductores (Gobierno de la Ciudad de México, 2025).

Otro sistema de gran importancia son los semáforos inteligentes. Su objetivo es optimizar los pasos en cruces. A futuro se plantea instalarlos en las avenidas principales del país, con el fin de maximizar el semáforo en verde. También se busca optimizar la luz amarilla y ordenar el cruce peatonal. La Ciudad de México y Guadalajara ya empezaron a utilizar la IA en la red semafórica, con reconocimiento de flujo vehicular, para generar olas verdes y desahogar las vialidades más congestionadas de la ciudad (El Economista, 2024)

Con respecto al transporte público, las grandes ciudades han implementado tarjetas inteligentes que permiten pagar en distintos sistemas y aplican la tarifa correspondiente. La tendencia es ampliar la interoperabilidad con redes de otras entidades. En la Ciudad de México, la expansión metropolitana alcanzó municipios del Estado de México y algunos del estado de Hidalgo. Para quienes viajan largas distancias, usar varias formas de pago en cada sistema complica el trayecto. Por eso la Tarjeta de Movilidad Integrada incorporó el pago a sistemas que no están administrados por la Ciudad de México, como el Mexibús y Mexicable, así como el Tren Interurbano. Con ello se simplifica el pago y se reduce el tiempo del usuario (Gobierno de la Ciudad de México, 2022).

En el transporte público, las pantallas de información al viajero instaladas en el Metrobús permiten planear el viaje y conocer el tiempo de llegada del siguiente autobús, lo que ayuda a prevenir incidentes de usuarios que se asoman al andén. Implementar esta herramienta en los sistemas masivos de Guadalajara y Monterrey permitirá a los usuarios elegir su modo de viaje o estimar su hora de arribo al destino de interés (Metrobús, 2025).

Por último, las aplicaciones móviles basadas en sistemas de posicionamiento global (GPS) han representado un avance significativo para la movilidad en México. Estas herramientas son utilizadas tanto por usuarios como por operadores del transporte público, por ejemplo, taxistas, conductores de servicios como Uber y transportistas, con el propósito de identificar las rutas más eficientes hacia un destino determinado. Además, funcionan como mecanismos de alerta preventiva ante la presencia de obras viales o incidentes en el trayecto.

Incluso las personas que utilizan el transporte público se benefician de estas tecnologías, ya que permiten conocer las rutas de viaje y las paradas intermedias antes de llegar al destino final. En consecuencia, los distintos sistemas de transporte con los que cuenta el país se han optimizado de manera considerable, contribuyendo así al bienestar y la eficiencia en la movilidad de sus habitantes. (IMT, 2022).

5.1. RETOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE EN MÉXICO.

México ha implementado varios SIT. Sin embargo, la variedad de sistemas ha sido limitada y su cobertura se ha concentrado únicamente en las grandes ciudades. La puesta en marcha de los SIT implica diversos retos que deben ser atendidos para garantizar su correcto funcionamiento.

Uno de los mayores desafíos está relacionado con la seguridad. En el caso del transporte público, el rastreo de unidades, al igual que ocurre con el transporte de carga, puede exponerlas a que bandas delictivas intercepten los vehículos y cometan delitos contra operadores o usuarios. Asimismo, la instalación de cámaras con tecnología de reconocimiento de aforo puede convertirse en un punto de conflicto, ya que las personas que habitan en los alrededores pueden desmantelarlas o incluso confrontar al personal encargado de la instalación.

Otro reto ligado a la seguridad es la falta de mantenimiento en los SIT. Si, por ejemplo, se implementa la sincronización de semáforos en “ola verde” y alguno de ellos llegara a fallar, podría ocasionar un incidente de tráfico. Esto se debe a que los conductores circulan a una velocidad constante y, al encontrarse con un semáforo descompuesto, los usuarios que intenten cruzar la intersección podrían realizar maniobras bruscas y generar riesgo de incidentes.

Ligado con el tema anterior, otro obstáculo en la implementación de los SIT son los costos. De acuerdo con Mordor Intelligence (2024), el elevado precio de estas tecnologías dificulta que los fabricantes ofrezcan soluciones accesibles al mercado. Este fenómeno se observa también en la industria automotriz, donde los vehículos más económicos suelen incluir sistemas de GPS y asistencias al viajero limitadas. En consecuencia, muchos usuarios prefieren adquirir autos que optimicen el consumo de combustible, aunque prescindan de SIT. Esta situación provoca que, en México, la oferta de automóviles equipados con SIT sea menor en comparación con otros países, dificultando alcanzar un estándar en el corto plazo.

Un reto considerable es la infraestructura vial existente. Gran parte de la infraestructura construida en México carece de tecnologías o diseños que permitan la adaptación de ciertos parámetros. En el caso de las olas verdes de semaforización, es necesaria una distancia adecuada entre intersecciones para que el sistema funcione de manera óptima. Sin embargo, muchas vialidades presentan distintos tipos de cruce, lo que limita su implementación o requiere adecuaciones. Durante décadas, el diseño de infraestructura carretera no estuvo acompañado de una legislación que facilitara la incorporación de los SIT en México. No obstante, en 2016 la SICT publicó el “Manual para proyectos de Sistemas Inteligentes de Transporte [ITS] en Carreteras” con el fin de aumentar el uso de los SIT para que se pueda implementar y su funcionamiento sea más óptimo con el avanzar de los años.

La incorporación de nuevos SIT a la red carretera implica retos de normativa e infraestructura, por lo que es necesario iniciar con la modernización de los principales ejes troncales del país. Esto permitiría que su instalación genere beneficios a toda la red. México, a diferencia de otros países, comenzó a implementar estas tecnologías hasta el siglo XXI, lo que presenta un desafío adicional. Por ello, resulta prioritario que las autopistas operadas por el Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN), así como las concesiones privadas y estatales, incorporen estos sistemas (ITM, 2022).

Con el Manual para proyectos de Sistemas Inteligentes de Transporte [ITS] en Carreteras, se busca que las concesionarias adquieran el conocimiento necesario para implementar nuevas tecnologías y capaciten a su personal en la operación y mantenimiento de los equipos inteligentes. Sin embargo, dado que el manual solo cuenta con una edición, su enfoque es general, lo que hace indispensable que la SICT, continúe estudiando el tema y emita normas que incentiven a las concesionarias a implementar estas tecnologías en las autopistas, mejorando la movilidad de los usuarios (ITM, 2022).

Cabe destacar que el manual detalla los SIT que pueden implementarse en carreteras; no obstante, en la práctica solo se han instalado sistemas como el telepeaje, la detección de tránsito, asistencia de postes de SOS, entre otros. Sin embargo, aún no se logra cubrir el 50% de la red carretera con los SIT mencionados. El manual concluye con aspectos clave para la implementación, que constituyen los principales retos para la SICT (SICT, 2016):

1. Aspectos Tecnológicos: El problema de la tecnología es la obsolescencia y la incompatibilidad entre sistemas actuales y nuevos, lo que implica problemas de costos y reemplazos lo que las concesionarias buscan evitar. Además de que estas tecnologías requieren de un mantenimiento constante y de una manera puntal y precisa como lo indica el proveedor, por lo que el reto es optimizar los costos de operación y mantenimiento.
2. Aspectos Legales: Las legislaciones de tránsito en todo el país, no consideran los SIT, por lo que su implementación, llevará a cabo un cambio sobre las leyes lo que implicará tiempo en aprobaciones, así como encontrar la solución en las personas que hagan respetar las leyes de tránsito. Las leyes, no solo son a nivel de los usuarios si no también los nuevos títulos de concesión, ya que ahora también será el responsable su instalación, así como su operación y mantenimiento y esto resultará en la modificación de los títulos de concesión de todas las autopistas del país. Estos aspectos generarán nuevos ajustes en materia económica, así como en las vigencias y modalidades de subcontratación previstas en los títulos de concesión. En diversos casos, los SIT operan mediante esquemas de subcontratación, lo que implica la participación de terceros en los contratos. Además, el manejo de datos no se encuentra plenamente regulado por la legislación vigente, lo que genera vacíos normativos en torno a la operación y supervisión de los SIT.
3. Aspectos de Viabilidad: Para que se logre la viabilidad de los SIT, debe de contar con beneficios en ambas partes tanto a los usuarios como a las empresas que ofrecen un servicio. El reto es que la mayoría de los usuarios no estarían dispuestos a pagar el costo que representa la implementación de los SIT además que el riesgo de la implementación es demasiado alto. Una vez con un Análisis Costo Beneficio de los SIT, se podrá encontrar una solución entre ambas partes y así poder implementar las nuevas tecnologías.

Otro reto importante será la coordinación entre distintos niveles de gobierno (federal, municipal y estatal). Es indispensable fomentar la cooperación y evitar confrontaciones derivadas de diferencias normativas o de responsabilidades. Un ejemplo claro se observa en la Zona Metropolitana del Valle de México, donde las leyes de tránsito y las concesiones de transporte público difieren entre la Ciudad de México y el Estado de México, generando conflictos entre ambas administraciones. En la zona limítrofe del “Toreo” ubicado en la Ciudad de México y Estado de México, se aprecia un cambio abrupto en el estado del pavimento y la señalización al cruzar de

una entidad a otra. En estos casos, si se pretende implementar un SIT en una vialidad que atraviesa más de un estado, es fundamental garantizar la continuidad del proyecto y evitar que se quede inconcluso.

La implementación de los SIT también enfrenta retos relacionados con la seguridad y la privacidad de datos. El manejo de los datos es un tema que genera controversia al contar con datos de los usuarios de la red (SACATI, 2024). Por medio de las cámaras de vigilancia se podrán monitorear los vehículos de una red, contar con su ubicación en tiempo real por medio de GPS, así como los datos de pago en vías de cuota. Estas características lo vuelven vulnerables a ciberataques, lo que podría derivar en la filtración de datos personales o un aumento en los delitos asociados.

Finalmente, uno de los retos más significativos para los SIT en México es la cultura vial. A diferencia de otros países, donde obtener una licencia de conducir requiere de la aprobación de un examen teórico y práctico para obtenerla, en México solo se aplica un examen teórico y en algunos estados no se aplica ninguna prueba. Esto genera una deficiente cultura vial y un incremento en los incidentes de tránsito.

De acuerdo con un estudio de la SICT (2024), el 71% de los siniestros de tránsito en el país son atribuibles al conductor. Entre las principales causas se encuentran: imprudencia o intención (20%), exceso de velocidad (12%), invasión del carril contrario (11%) y falta de distancia adecuada entre vehículos (11%). La imprudencia se relaciona principalmente con el uso del teléfono celular durante la conducción, mientras que la invasión de carril y la falta de distancia entre vehículos responden, en gran medida, a la desatención de la señalización vial y al desconocimiento de los tiempos de frenado adecuados según la velocidad y el peso de la unidad (SICT, 2024).

Los SIT, buscan ofrecer mayor seguridad a los usuarios; sin embargo, es indispensable acompañar su implementación con una nueva educación vial. Según INEGI (2023), en México se registraron 381,048 accidentes de tránsito terrestre, lo que significó un crecimiento con respecto al año anterior. Estos accidentes dejaron un saldo de 90,500 heridos y 4,803 personas fallecidas. Estas cifras evidencian la urgencia de reforzar la enseñanza, el respeto y el uso adecuado de la señalización vial, prevenir incidentes por imprudencia, mejorar la movilidad y hacerla más sostenible. Asimismo, es fundamental impulsar el uso de ciclovías y andadores peatonales que brinden seguridad a la población (INEGI, 2023).

Las entidades federativas con mayor número de víctimas mortales son: Estado de México, Ciudad de México, Puebla, Michoacán, Jalisco, Nuevo León, Chihuahua y Jalisco de acuerdo con INEGI como se muestra en la Figura 37.

2. IMT (2023). Estudio exploratorio sobre las tecnologías automatizadas de aforos vehiculares para proyectos de análisis de movilidad urbano-portuaria. Obtenido de: <https://imt.mx/download-archivo.html?l=YXJjaGl2b3MvUHVibGljYWNPb25lcy9QdWJsaWNhY2lvdjRlY25pY2EvcHQ3NjMucGRm>
3. IMT (Mayo 1999). Sistemas Inteligentes de Transporte. Obtenido de: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=127&IdBoletin=41>
4. IMT (Mayo 2022). Uso de nuevas tecnologías y plataformas digitales para la gestión de la seguridad y operación del transporte. Obtenido de: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=558&IdBoletin=198>
5. SICT (2016). Manual para proyectos de Sistemas Inteligentes [ITS] en Carreteras. Obtenido de: https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manuales-2016/manual-proyectos-ITS-_carreteras.pdf

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) han contribuido de manera significativa a la solución de los problemas de movilidad de las personas. Cada uno de ellos se encuentra enfocado en un propósito específico dentro de tres ámbitos fundamentales: el medio, la infraestructura y el usuario. La tecnología debe considerar esos tres ámbitos para lograr un éxito en su funcionamiento, permitiendo un desarrollo en conjunto. Es importante entender que los SIT avanzarán a la misma velocidad que otras tecnologías, y que se buscará optimizar y reducir costos para su uso común.

Es importante mencionar que, en los próximos años, ciertos SIT quedarán obsoletos al ser reemplazados por tecnologías emergentes. En el caso de los sistemas de gestión de vías controladas e incidentes (SGVCI) algunas de las herramientas tecnológicas mencionadas fueron los radares infrarrojos o tecnologías acústicas pasivas, tecnologías que se implementaron a finales del siglo XX y que actualmente están siendo reemplazados por videocámaras con la capacidad de procesar imágenes del video.

Una de las tecnologías que ha sido mejor recibida es la de identificación automática de vehículos, cuyo uso se ha extendido principalmente en los sistemas de telepeaje. El propósito de la implementación y diversificación de estas tecnologías es adaptar las ya existentes y optimizarlas, con el fin de lograr un uso más eficiente y reducir los costos de inversión. Los SGVCI han sido aplicados en muchos lugares alrededor del mundo, lo que conlleva que el desarrollo de estos SIT sea mayor con respecto a otras. El futuro de los SGVCI es poder desarrollar herramientas de inteligencia artificial aplicadas a las cámaras de video a lo largo de un corredor vial o carretero.

También se recomienda que para los SGVCI se pueda contar con una base de datos “Big Data” que sea la encargada de almacenar y procesar la información. Como objetivo principal de los SGVCI es poder gestionar la demanda en la oferta actual de una manera óptima y eficaz, con el fin de reducir la tasa de accidentes viales. Una recomendación final a los SGVCI es que se logre contar con un plan para la actualización de los sistemas existentes, con el propósito de evitar deterioros en los equipos y evitar mayores costos de mantenimiento, además que si se tiene la tecnología más reciente se podrá gestionar mejor la demanda y poder contar con vialidades más seguras.

La siguiente categoría vista en los apuntes fueron SACT, que son enfocados mayormente a la infraestructura vial, como lo son los semáforos actuados, que contaban con bucles de horario diferentes a lo largo del día, evitando las aglomeraciones que se pueden provocar las horas de máxima demanda. Los semáforos son parte de la infraestructura vial, por lo que su estudio para la aplicación de nuevas tecnologías tiende a ser de gran importancia.

Por ello, se ha promovido la coordinación de semáforos y señalizaciones en las vías urbanas. Para alcanzar un sistema óptimo, es necesario maximizar los tiempos de luz verde y ajustar la duración de la luz amarilla de acuerdo con el tipo de cruce. Para ello, se requiere recopilar información clave, como las horas de máxima demanda, las velocidades de diseño y de operación, así como la presencia de cruces peatonales o ciclistas. Asimismo, deben considerarse parámetros adicionales, como la interacción con sistemas de transporte masivo tales como los BRT o tranvías.

Para que se pueda optimizar los equipos, se requiere de manejos de software que está disponible para los ingenieros civiles especializados en el área de transporte. Estos programas como lo es TransCAD o Sychro, tienen la función de modelar el sistema de redes, donde se le asignan parámetros como la demanda actual, el tipo de vía y velocidad de diseño, con el fin de resolver y obtener la maximización del tiempo en verde de acuerdo con las condiciones de la vía. La ventaja de estos programas de cómputo es que buscan reducir los costos a comparación de contar con cámaras de vigilancia en cada cruce para determinar los tiempos en verde.

La recomendación primordial con el software de modelación es optimizar la infraestructura actual por medio de la semaforización y la modelación del transporte. Es indispensable que los nuevos ingenieros, empiecen a desarrollar las nuevas habilidades que brindan los sistemas de transporte. El manejo de herramientas permitirá una optimización en los resultados obtenidos. También es indispensable cambiar periódicamente los semáforos de bucle común por nuevos semáforos inteligentes que permita que las ciudades sean más inteligentes buscando una integridad entre transporte privado, público y peatones.

El siguiente sistema visto en los apuntes fueron los SATP, que ha tomado relevancia, en el mundo y actualmente se ha implementado en las grandes ciudades de México. La herramienta de los sistemas de ubicación automática permitirá al usuario de transporte público, identificar la posición en tiempo real de la unidad que espera abordar, esta herramienta permite generar mayor seguridad al usuario, al estar monitoreado él y la unidad.

En las estaciones de tren de diversos países del mundo se dispone de pantallas informativas que proporcionan datos en tiempo real a los usuarios; entre los mensajes más relevantes se encuentra el tiempo de espera entre la llegada de trenes, cuya precisión es notable en lugares como Japón o Alemania. Como recomendación para el contexto mexicano, sería pertinente implementar este tipo de sistemas en los trenes urbanos y suburbanos, como el Metro de la Ciudad de México, el Metro de Monterrey y el de Guadalajara, así como en los trenes de cercanías. Cabe destacar que algunos sistemas BRT del país ya cuentan con estas tecnologías, lo que permite al viajero estimar con mayor exactitud su tiempo de llegada al destino.

Otra tecnología que se ha implementado con éxito es el sistema de pago por medio de tarjetas inteligentes, con el fin de optimizar la forma de pago en diferentes sistemas de transporte. Esta herramienta está pensada para los usuarios de grandes metrópolis, que requieren de transportarse por más de un medio de transporte, agilizando los transbordos y reduciendo los tiempos de espera. Es importante, que en un futuro se logre implementar más sistemas de transporte en las tarjetas de movilidad, al igual que conexión entre diferentes entidades estatales.

El cuarto SIT visto fueron los SAIV siendo de los más recientes en incorporarse como herramientas inteligentes que ayudan a mejorar el sistema vial. Los SAIV son de gran utilidad por un porcentaje alto en la población, debido a que son de fácil acceso. Estas herramientas se pueden consultar por medio de un teléfono inteligente. Las apps como Google Maps o Waze, permiten que los usuarios puedan conocer el estado de la red en tiempo real, además de poder planificar una ruta y tomar decisiones en la forma de trasladarse.

Los SAIV son herramientas interactivas con los usuarios, por lo que se puede informar sobre alguna problemática en una vía. Anteriormente, no se catalogaban como SIT, sin embargo, en los últimos años se revocó esa decisión al permitir controlar la demanda de una vía, así como la distribución de los orígenes destinos en los viajes de corto y largo recorrido. Es que los SAIV puedan agregar más de un sistema de rutas de transporte público, así como la intermodalidad del transporte, teniendo como ejemplo personas que se transportan en largos recorridos o que requieran realizar un viaje multimodal.

En el siglo XXI, se han implementado nuevas tecnologías que revolucionarán el mundo incluyendo la movilidad y su infraestructura. Una tecnología que está revolucionando en los últimos 5 años, es la inteligencia artificial (IA), que permite encontrar casi cualquier tipo de soluciones por medio de modelos matemáticos y bases de datos con millones de entradas. La IA se pretende implementar en la detección de infracciones o identificación de vehículos robados. La herramienta funciona por medio de un conjunto de cámaras de vigilancia que estén en operación en 24 horas y pueda monitorear a cada vehículo de la red.

Otro de los usos previstos para la inteligencia artificial (IA) se encuentra en los sistemas de semaforización, con el objetivo de determinar soluciones óptimas en distintos cruces viales. El desarrollo tecnológico actual apunta hacia una integración cada vez mayor de la IA en la gestión del tránsito, lo que implicará ajustes e inversiones significativas a nivel global.

Ciudades como Las Vegas ya están implementando infraestructura para vehículos autónomos, mientras que en diversas partes del mundo existen sistemas de trenes automatizados que operan sin la necesidad de conductores, como ocurre en las nuevas líneas del metro de París.

Los vehículos autónomos tendrán que superar temas de seguridad y legislación. Por ejemplo, si un vehículo autónomo falla, se encontraría en un limbo legal entre si el responsable del incidente es el conductor, o el auto. Además de que no todas las ciudades cuentan con las condiciones para implementar los sistemas autónomos en sus redes. Los vehículos autónomos han empezado a generar controversia en el futuro pues se deberá empezar con una nueva metodología en el diseño de vías. Uno de los casos que se presentaron en esta tesis fue el “Highway Capacity Manual 2022” que cuenta con un capítulo dedicado a vehículos autónomos y como afectan la infraestructura vial.

Es importante que, para el futuro, las naciones puedan implementar un mayor gasto en mejorar sus redes viales, incluyendo los SIT, que se puedan adecuar a nuevas tecnologías con el fin de mejorar su seguridad vial. Por ello, en los apuntes se hace mención a los SIT que se han implementado alrededor del mundo incluyendo México para conocer el campo de retos y oportunidades que se enfrenta.

Alrededor del mundo se han implementado múltiples SIT, principalmente en Estados Unidos y China por ser potencias tecnológicas al igual que Japón y Alemania. Estos países han sido pioneros en las nuevas tecnologías que se han desarrollado para el mejoramiento vial. México se encuentra en un escenario de oportunidades, al estar en cercanía con Estados Unidos, lo que puede generar un asesoramiento en el uso de sus tecnologías. El reto que enfrenta México viene en el tema económico, ya que se debe de generar un mayor gasto en el porcentaje que se le dan a las diferentes instituciones, en caso de México la SICT.

Los SIT son herramientas que permiten distribuir la demanda y mejorar el sistema vial existente. Permiten que los viajes sean más seguros, al implementar sistemas de información al viajero, informando del tiempo real sobre la vía de circulación. Además, tienen como finalidad disminuir los tiempos de traslado con herramientas como tarjetas inteligentes, planificadores de rutas, sistemas de cobro por telepeaje, entre otros rublos. También, los SIT buscan ser más seguros al tener sistemas de radares y cámaras de vigilancia que permita rastrear vehículos que exceden el límite de velocidad establecido o realicen otra acción que vaya en contra del reglamento de tránsito.

Los SIT no solo contribuyen a mejorar la red existente, sino que también, mediante el uso de herramientas de modelación, permiten analizar las posibles soluciones a la oferta actual. Estas herramientas facilitan la estimación de la distribución de viajes que generará un nuevo proyecto, proporcionando así una base técnica para su planeación y evaluación. Cada punto mencionado anteriormente, está enfocado en el mejoramiento de los sistemas de transporte, permitiendo que las carreteras y vías urbanas sean más seguras. Para que los SIT tengan una mejor aceptación, se debe de invitar al usuario a que se adapte a las nuevas tecnologías ofreciendo mayores ahorros de tiempo o un mayor confort.

El estudio de los SIT deberá ser mayor en los próximos años, para lograr el aprovechamiento de las herramientas tecnológicas que se cuentan en la actualidad, también se deberá fortalecer los sistemas de seguridad en los servidores que cuenten con la base de datos de millones de usuarios que puede contar un país. Además de hacer más accesible estas tecnologías, tanto para el usuario como a las empresas que cuentan con una concesión de una vía. Al permitir un mayor acceso a la

tecnología, se logrará una disminución en los costos, generando un menor riesgo y así tener un mayor éxito en la implementación de los SIT.

7. RESUMEN

Los Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) son tecnologías que son aplicadas en la infraestructura vial, en los vehículos, y en tecnologías de uso cotidiano como teléfonos inteligentes con el fin de mejorar la seguridad, el confort, la eficiencia e infraestructura de una red de transporte. El origen de esta tecnología se remonta en el siglo XX por medio de investigaciones del gobierno de Estados Unidos y Japón.

Los SIT dependen de tecnologías como sensores, encargados de tener la información aproximada de un vehículo a la vía, además de funcionar como herramientas que permiten una conducción segura para los automovilistas. El segundo punto es el radar, que notifican a la computadora la cercanía de un objeto, además que estima la velocidad de un auto sobre una vía. El tercero es la comunicación inalámbrica, que permite a todo el sistema estar conectado a un servidor y mandar mensajes en tiempo real el estado de la red u otra señal de alarma. El cuarto punto son los sistemas computacionales y electrónica que será encargada de almacenar la información y procesamiento de datos, el quinto son los sistemas GPS, que brindan la posición de un vehículo además de planificar rutas por medio de transporte. Estas tecnologías son compartidas entre los diferentes SIT, que subdividen de acuerdo con la tecnología aplicada.

La aplicación de los SIT ofrece un catálogo de beneficios para los usuarios y operadores de la red, como la reducción del congestionamiento vial al optimizar los sistemas de semaforización, así como gestionar el tránsito en tiempo real. Mejoramiento en la seguridad vial al disminuir los accidentes a partir de alertas al usuario tanto en la red como en los vehículos. Mejoramiento en la oferta, al generar nuevos proyectos que optimizan la demanda por medio de programas de modelación. Optimización del transporte público, por medio de sistemas únicos de pago, sistemas de información al viajero y monitoreo y control a las flotas de transporte y reducción en el impacto ambiental al reducir la cantidad de gases contaminantes a la atmosfera al optimizar los tiempos de máxima demanda, así como el mejoramiento de la flota vehicular.

Los SIT se dividen en 4 categorías que son los Sistemas de Gestión de Vías Controladas e Incidentes (SGVCI) encargadas de supervisar, regular e informar sobre situaciones extemporáneas sobre una vía, con el fin de optimizar el flujo vehicular y poder gestionar el tránsito de las carreteras. El segundo son los Sistemas Avanzados de Control de Tráfico (SACT) encargados del monitoreo y gestión de tráfico en carreteras y vialidades urbanas. A partir de semáforos, sistemas de sensores y programas se optimiza la infraestructura existente teniendo como objetivo ser un sistema de control y optimización de la oferta actual. La tercera categoría son los Sistemas Avanzados de Transporte Público (SATP) que, por medio de tecnologías de información al viajero, GPS, en las flotillas de transporte y tarjetas inteligentes permite optimizar el transporte público, además de brindar un mayor confort al usuario y seguridad en el viaje. La cuarta categoría son los Sistemas Avanzados de Información al Viajero (SAIV), son herramientas tecnológicas que proporcionan al usuario información en tiempo real de las vías de transporte. El objetivo es mejorar la movilidad urbana e interurbana. Estas herramientas son de mayor accesibilidad al estar disponible en teléfonos móviles y en la mayoría de los vehículos.

Los SIT, han mejorado su tecnología lo largo de los años, relacionado directamente con el software y hardware de cada década. Actualmente se han desarrollado tecnologías que permitieron generar un salto en el desarrollo como las redes inalámbricas. Actualmente se ha empezado con el desarrollo de una tecnología que será implementado en múltiples sectores, incluyendo el área de transporte. La inteligencia artificial, será el nuevo caso de estudio en la implementación a los sistemas de transporte, que permita gestionar el tráfico y desarrollar soluciones a las alternativas a

problemáticas en tiempo real, como el congestionamiento en cruces, plazas de cobro, carriles reversibles, etc. La siguiente tecnología del futuro cercano es la automatización de los vehículos, y el aumento de su flota vehicular lo que permitirá que las vías tengan que contar con un diseño que permita leer a los autos inteligentes la velocidad de operación, los carriles, los cruces de cebra entre otras infraestructuras para su funcionamiento.

Los SIT, se han aplicado alrededor del mundo principalmente por los Estados Unidos de América y la República Popular China, encargados en el desarrollo de nuevas tecnologías de transporte. Naciones de la Unión Europea, Japón, Corea, Australia, entre otras naciones han implementado un conjunto de SIT sobre su red de caminos al igual que el transporte público. Las naciones que han implementado estas tecnologías han logrado solucionar sus problemas de movilidad al optimizar su demanda con sistemas de control de tráfico, por otra parte, la implementación de los SIT en el transporte público ha permitido que el confort del usuario aumente al tener un transporte seguro y preciso distribuyendo la demanda en un sistema multimodal.

En México, los SIT se han empezado a implementar en el siglo XXI, principalmente en autopistas y las grandes metrópolis. Las tecnologías aplicadas en el país son inferiores a otras naciones. Esta problemática es causada por el riesgo de inversión en su aplicación y la incertidumbre en ser aplicada sobre la red. Los sistemas que actualmente cuenta el país son: sistemas de telepeaje, tarjetas inteligentes de transporte público, sistemas de radares de velocidad sobre las principales ciudades, semaforización inteligente, entre otros.

Actualmente la cobertura de los SIT en el país es baja, el Manual para proyectos de Sistemas Inteligentes de Transporte [ITS] en Carreteras, establece un conjunto de tecnologías que son aplicables en la red nacional, sin embargo, las concesiones no cuentan con todas las tecnologías publicadas en el manual, además que los títulos de concesión a las autopistas del país no cuenta con un apartado de obligación en la implementación de un número determinado en los SIT, provocando una falta de homogeneidad en la red.

Los retos que implica la colocación de SIT en México es la infraestructura en mal estado, ya que la oferta actual carece de infraestructura para adecuar tecnologías como sensores, cámaras de velocidad o semáforos inteligentes, por lo que la implementación requerirá de una inversión significativa. La falta de regulación entre las diferentes entidades federativas hace que la implementación de los SIT se dificulte al no tener una norma para todas las redes del país. Los costos elevados en mantenimiento, así como en sus tecnologías, ocasiona que no se haga una inversión en la mejora de la red. Los problemas de seguridad implican de manera indirecta en la colocación de SIT, principalmente las videocámaras ocasionando un riesgo para la integridad de los trabajadores de la autopista. Por último, la falta de cultura vial genera como consecuencia el desconocimiento o desinterés en respetar las nuevas normativas viales generando una mayor deficiencia en la efectividad de los sistemas.

La aplicación de los SIT es una inversión que generará soluciones a la oferta existente, con el fin de distribuir la demanda con tecnologías de control de tráfico. Al implementarse la tecnología se lograrán reducir problemas de congestionamiento vial, reducción en la tasa de incidentes, mejoramiento en seguridad del viajero, optimizaciones en los tiempos de traslado, generación de rutas multimodales y modelación de futuros proyectos. Los SIT son herramientas que debe contar la red vial a nivel urbano e interurbano siendo un parámetro en el diseño de carreteras y vialidades.

REFERENCIAS

- A21 (2025). Situación actual del programa GPS estadounidense. Obtenido de: <https://a21.com.mx/cafe-espacial/2025/02/21/situacion-actual-del-programa-gps-estadounidense>
- ALDF (2018). ALDF insiste en evitar accidentes en el transporte público con capacitación a choferes. Obtenido de: <http://aldf.gob.mx/comsoc-aldf-insiste-evitar-accidentes-transporte-publico-con-capacitacion-choferes--38300.html>
- BeiDou (2025). Sistema. Obtenido de: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/>
- Bronzini M. Handbook of Transportation Engineering. 1st edition. Virginia. McGraw-Hill, 2004.
- Cubic Transportation Systems. (Enero 2024). SYNCHROSTUDIO. Obtenido de: [Trafficware Synchro Studio Overview.pdf](https://www.cubic.com/trafficware-synchro-studio-overview.pdf)
- D.Johnson Victor y S. Ponnuswamy. Urban Transportation Planning, Operation and Management. 1st edition. India. McGraw Hill Education. 2012.
- Data México. (febrero 2025). Valle de México. Obtenido de: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/valle-de-mexico>
- Diario Oficial de la Federación (diciembre de 2017). NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, 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. Obtenido de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5508944&fecha=26/12/2017#gsc.tab=0
- Digital 55 (2024). Software en Transporte y Logística: TMS (Transport Management System). Obtenido de: <https://digital55.com/transport-management-system>
- Dimitrakopoulos George, Uden Lorna, Varlamis Iraklis. The future of intelligent transport systems. 1st edition. Amsterdam. Elsevier. 2020.
- Eclipse Foundation. (s.f.). SUMO - Simulation of Urban Mobility. <https://eclipse.dev/sumo/>
- El Economista (2024). Presenta Clara Brugada estrategia de semaforización inteligente para la Ciudad de México. Obtenido de: <https://www.eleconomista.com.mx/politica/Presenta-Clara-Brugada-estrategia-de-semaforizacion-inteligente-para-la-Ciudad-de-Mexico-20240314-0085.html>
- El Sol de México (2024). App CDMX mostrará en tiempo real los horarios y rutas del Metro: así puedes consultarlos. Obtenido de: <https://oem.com.mx/elsoldemexico/metropoli/app-cdmx-la-aplicacion-donde-podras-ver-en-tiempo-real-los-horarios-y-rutas-del-metro-18397959>
- Federal Highway Administration (Enero 2025). Seguridad de los sistemas de transporte inteligentes. Obtenido de: <https://highways.dot.gov/safety/other/intelligent-transportation-systems-safety>
- Fricke Jon D. y Whitford Robert K. Fundamentals of Transportation Engineering a Multimodal Systems Approach. 2nd edition. New Jersey: Prentice Hall, 2018.
- Garber Nicholas J., Hoel Lester A. Traffic and Highway Engineering. 5th edition. Virginia, CENGAGE. 2018.
- GLONASS (2025). Sobre el sistema GLONASS. Obtenido de: https://glonass-iac.ru/spa/about_glonass/
- Gobierno de la Ciudad de México (2025). Conoce todo sobre las fotocivicas. Obtenido de <https://semovi.cdmx.gob.mx/blog/post/conoce-todo-sobre-las-fotocivicas>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2020). Programa Integral de Movilidad de la Ciudad de México 2020-2024). Obtenido de: <https://semovi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/diagnostico-tecnico-de-movilidad-pim.pdf>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2022). Movilidad Inteligente en la Ciudad. Obtenido de: <https://gobierno.cdmx.gob.mx/noticias/movilidad-inteligente-en-la-ciudad/>
- Google (2025). 20 cosas que no sabías que podías hacer con Google Maps. Obtenido de: <https://blog.google/intl/es-419/actualizaciones-de-producto/informacion/20-cosas-que-no-sabias-que-podias-hacer-con-google-maps>
- Grava S. *Urban Transportation Systems*. 1st edition. New York: McGraw -Hill, 2004.

- Hay., W. W. An Introduction to Transportation Engineering. 2nd edition. New York: John & Wiley & Sons, 1997.
- Hoel, Lester A., Nicholas, J. Garber. Transportation Infrastructure Engineering. A Multimodal Integration. 2nd edition. Stamford, C. T. Cengage Learning, 2011.
- IMT (2014). Telepeaje e Infoviaje en México. Obtenido de: <https://imt.mx/descarga-archivo.html?l=YXJjaGl2b3MvUHVibGljYWNPb25lc9QdWJsaWNhY2l2b2RlRlY25pY2EvcHQ0MjkucGRm>
- IMT (2023). Estudio exploratorio sobre las tecnologías automatizadas de aforos vehiculares para proyectos de análisis de movilidad urbano-portuaria. Obtenido de: <https://imt.mx/descarga-archivo.html?l=YXJjaGl2b3MvUHVibGljYWNPb25lc9QdWJsaWNhY2l2b2RlRlY25pY2EvcHQ3NjMucGRm>
- IMT (Mayo 1999). Sistemas Inteligentes de Transporte. Obtenido de: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=127&IdBoletin=41>
- IMT (Mayo 2022). Uso de nuevas tecnologías y plataformas digitales para la gestión de la seguridad y operación del transporte. Obtenido de: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=558&IdBoletin=198>
- INEGI (2023). Accidentes de tránsito. Obtenido de: <https://www.inegi.org.mx/temas/accidentes/>
- INEGI (Febrero 2025). Estadística De Transporte Urbano De Pasajeros (ETUP). Obtenido de : <https://www.inegi.org.mx/programas/transporteurbano/#publicaciones>
- INTA (2025). Servicio PRS de Galileo. Obtenido de: <https://www.inta.es/CPA/es/prs/>
- ITM (2022). Desarrollo de mapas resultado del asistente automático para el diseño de rutas de distribución. Obtenido de: <https://imt.mx/descarga-archivo.html?l=YXJjaGl2b3MvUHVibGljYWNPb25lc9QdWJsaWNhY2l2b2RlRlY25pY2EvcHQ2NzUucGRm>
- Kumar P. y Kumar A. Intelligent Transport Systems. 1st edition. Nueva Delhi. PHI Learning, 2018.
- McTrans Center. (2024, 20 de noviembre). TRANSYT-7F. <https://mctrans.ce.ufl.edu/highway-capacity-software-hcs/transyt-7f/>
- Metrobús. Registro de acceso a datos abiertos de Metrobús. Obtenido de <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/portal-ciudadano/datos-abiertos>.
- Meyer D. Michael. Transportation Planning Handbook. 4th. Edition. New Jersey. Wiley. 2016.
- Milenio. (2023). China honra el compromiso sostenible con un transporte más ecológico e inteligente. Obtenido de: <https://www.milenio.com/asia-y-oceania/la-ruta-de-la-seda/china-tiene-el-transporte-mas-ecologico-e-inteligente-del-mundo>.
- Mordor Intelligence. (2024). Análisis de participación y tamaño del mercado de sistemas de transporte inteligentes tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029). Obtenido de: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/global-intelligent-transportation-systems-market>
- Narayanaswami, S. Intelligent Transportation Systems: Concepts and Cases. Newcastle upon Tyne, England: Cambridge Scholars Publishing, 2023.
- National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. (2022). Highway Capacity Manual: a guide for multimodal mobility análisis. 7ma edition. National Academies Press.
- Novack et. al. Transportation a Global Supply Chain Perspective. 9th edition. Boston. Cengage, 2018.
- Ovaciones (Octubre 2024). Semáforos inteligentes en CDMX: La clave para reducir contaminación y mejorar movilidad Obtenido de: <https://ovaciones.com/semaforos-inteligentes-en-cdmx-la-clave-para-reducir-contaminacion-y-mejorar-movilidad/>
- Papacostas, C.S. *Transportation Engineering and Planning*. 3rd edition. New Jersey. Pearson/Prentice Hall, 2007.
- PIARC (2024). Manual Explotación de la Red Vial & Sistemas Inteligentes de Transporte. Obtenido de: <https://rno-its.piarc.org/es/conceptos-basicos-rno-que-significa-rno/proposito-y-objetivos>
- Roess, R. P., Prassas, E. S., y McShane, W. R. (2019). Traffic engineering (5ta ed.). Pearson.

- SACATI (2024). ¿Cómo afectan las leyes de protección de datos a la videovigilancia? Obtenido de: <https://www.scati.com/2024/01/31/como-afectan-las-leyes-de-proteccion-de-datos-a-la-videovigilancia/>
- SCATS (Enero 2025). An Intelligent, Adaptive Traffic Control System. Obtenido de: <https://www.scats.nsw.gov.au/home>
- SCOOT (Enero 2025). Traffic signal optimisation and coordination for connected networks. Obtenido de: <https://trlsoftware.com/software/intelligent-signal-control/scoot/>
- Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes [SICT]. Manual Para Proyectos de Sistemas Inteligentes de Transporte [ITS] en Carreteras. Ciudad de México: SICT, 2019.
- SEMOVI (2025). ¿Qué son las fotocívicas?. Obtenido de: <https://www.semovi.cdmx.gob.mx/tramites-y-servicios/vehiculosparticulares/fotocivicas/preguntas-frecuentes-sobre-fotocivicas>
- SICE (2024). Tráfico Interurbano. Obtenido de: <https://www.sice.com/trafico-interurbano/>
- SICT (2016). Manual para proyectos de Sistemas Inteligentes [ITS] en Carreteras. Obtenido de: <https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manuales-2016/manual-proyectos-ITS-carreteras.pdf>
- SICT (marzo 2024). Uso del celular, una de las principales causas de accidentes viales. Obtenido de: <https://www.gob.mx/sct/prensa/uso-del-celular-una-de-las-principales-causas-de-accidentes-viales>
- STC (febrero de 2025). Cifras de Operación en el STC. Obtenido de: <https://www.metro.cdmx.gob.mx/operacion/cifras-de-operacion>
- Sussman Joseph M. Perspectives On Intelligent Transportation Systems (ITS). 1st edition. New York: Springer, 2005.
- Sussman Joseph. Introduction to Transportation System. 1st edition. Boston. Artech House, 2000.
- Tesla. (Enero 2025). Acerca del Piloto automático. Obtenido de: https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/es_pr/GUID-101D1BF5-52D2-469A-A57D-E7230BBEE94B.html
- U.S. Department of transportation Federal Highway Administration. (Abril 2021). Traffic Signal Timing Manual. Obtenido de: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08024/chapter5.htm#:~:text=Traffic%20signals%20operate%20in%20either,detail%20in%20the%20following%20subsections.>
- U.S. Department of Transportation. History of Intelligent Transportation Systems. 1st edition. New Jersey, 2023.
- William W. Hay. An Introduction to Transportation Engineering. 2nd edition. New York: Wiley, 1977.
- X. (2025). MetroCDMX. Obtenido de: <https://x.com/MetroCDMX>

BIBLIOGRAFÍA DE IMAGENES

- Appiah O. et. al. (Septiembre de 2020). Ultrasonic sensor based traffic information acquisition system; a cheaper alternative for ITS application in developing countries. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227620302258>
- ATTAP (Enero 2025). Connected Vehicles (CV). Obtenido de: <https://attap.umd.edu/cvs-and-avs/connected-vehicles-cvs/>
- Coifman B. et. al. (Noviembre de 2016). Collecting ambient vehicle trajectories from an instrumented probe vehicle: High quality data for microscopic traffic flow studies. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X16301577>
- Crossroads. (Mayo de 2020). Improving Traffic Volume Estimates By Monitoring Health of Loop Detectors. Obtenido de: <https://mntransportationresearch.org/tag/software-tool/>
- Dahhua technology. (Julio de 2022). Getting to Know The Dahua WizMind Illegal Parking Detection. Obtenido de: <https://www.dahuasecurity.com/pt/newsEvents/blog/847>
- ECM. (Diciembre de 2024). Inductive Loop. Obtenido de: <https://www.ecm-france.com/en/areas-of-activity/weigh-in-motion/inductive-loop/>
- Ecomovilidad. (Julio 2010). Propuesta: mostrar información del trayecto en las pantallas del metro. Obtenido de: <https://ecomovilidad.net/madrid/pantallas-informacion-metro/>
- Excelsior (Diciembre 2024). Todo sobre el regreso de Fotomultas en CDMX en 2025. Obtenido de: <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/todo-sobre-el-regreso-de-fotomultas-en-cdmx-en-2025/1688896>
- Henning T. (Septiembre de 2006). Opel Omega B Caravan Thermography. Obtenido de: https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:OpelOmegaBCaravanThermography_ty_200609205col1.jpg
- Imaginelifestyles. (Febrero de 2014). Audi Gets Street Smart: Are Smart Roads Just Around the Corner?. Obtenido de: <https://imaginelifestyles.com/audis-traffic-light-assist/>
- INDRA. (Febrero de 2019). La solución de Indra para detectar vehículos de alta ocupación y facilitar modelos avanzados de movilidad, logra la mayor precisión en un piloto en Estados Unidos. Obtenido de: <https://www.indracompany.com/pt-br/node/76199>
- Infonegocios. (Junio de 2013 Toyota y Waze: novedades en el tránsito. Obtenido de: <https://infonegocios.info/infotecnologia/toyota-y-waze-novedades-en-el-transito>
- ITS-TEA (Enero 2025). About ITS. Obtenido de: https://www.its-tea.or.jp/english/its_etc/about_its.html
- MO DRIVE. (Diciembre de 2024). MO DRIVE. Obtenido de: <https://www.modrive.com/noticias/sistema-bsm/>
- NEDAP. (Diciembre de 2024). Understanding RFID read ranges for automatic vehicle identification. Obtenido de: <https://www.nedapidentification.com/nl/insights/understanding-rfid-read-ranges-for-automatic-vehicle-identification/>
- Siliconrepublic (Febrero 2011). Electronic signs launched to tell commuters when buses are due. Obtenido de: <https://www.siliconrepublic.com/gear/electronic-signs-launched-to-tell-commuters-when-buses-are-due>
- Universidad del Norte. (Marzo 2018). Análisis de requisitos para dispositivos de localización vehicular seguros para sistemas de transporte público terrestre en Colombia. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/852/85259689003/html/>
- Wahhab A. (Junio de 2018). Ultrasonic Sensor-Based Traffic Monitoring System Mounted on an Overhead Structure. Obtenido de: https://www.researchgate.net/figure/Ultrasonic-Sensor-Based-Traffic-Monitoring-System-Mounted-on-an-Overhead-Structure-13_fig5_346309374
- Waze (2025). Información de tráfico. Obtenido de: <https://www.waze.com/es/live-map/>
- Wazir M. (Diciembre de 2024). Traffic Survey. Obtenido de: http://epsmsg.jkr.gov.my/images/a/ad/Traffic_Survey.pdf

Xatakandroid (Abril 2024). Los mejores navegadores GPS para Android, comparativa a fondo. Obtenido de: <https://www.xatakandroid.com/listas/mejores-navegadores-gps-para-android-comparativa-a-fondo>

Yueyue N. (Marzo de 2016). Cross Array and Rank-1 MUSIC Algorithm for Acoustic Highway Lane Detection. Obtenido de: https://www.researchgate.net/figure/Acoustic-highway-traffic-monitoring-The-lengths-are-in-centimeters-and-the-angles-are_fig4_299431291